Brazilian Journal of Development

Escoamento superficial e perdas de solo em sub-bacia florestal, município de Eldorado do Sul, RS

Surface runoff and soil losses in forest sub-basin, municipality of Eldorado do Sul, RS

DOI:10.34117/bjdv6n8-283

Recebimento dos originais:08/07/2020
Aceitação para publicação:17/08/2020

Anna Hoffmann Oliveira
Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras
Professora, Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Agrárias - Rodovia Anhanguera, km 174 - SP-330. Araras - SP, Brasil. 13600-970
E-mail: annahoffmann@ufscar.br

Marx Leandro Naves Silva
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Lavras
Professor, Universidade Federal de Lavras
Campus Universitário. Lavras – MG, Brasil. 37200-900
E-mail: marx@dcs.ufla.br

Gustavo Klinke Neto
Mestre em Geociências pela Universidade Estadual de Campinas
Professor, Centro Universitário Fundação de Ensino Octávio Bastos
Av. Dr. Otávio da Silva Bastos, 23 - Jardim Nova São João, São João da Boa Vista - SP, Brasil. 13874-149
E-mail: gus.klinke@gmail.com

RESUMO
O objetivo do presente trabalho foi identificar o potencial de escoamento superficial e suscetibilidade à erosão hídrica da sub-bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, situada no município de Eldorado do Sul, RS. Em relação à cobertura vegetal, foram analisadas as perdas de solo e água por escoamento superficial em dois sistemas florestais de eucalipto que representam o uso do solo designados FE1 e FE2; e dois sistemas de referência: a floresta nativa (FN) e o solo descoberto (SD). O potencial da paisagem em gerar escoamento foi avaliado por meio das características fisiográficas e do índice de umidade do solo (W). A quantificação do escoamento superficial e perdas de solo nos diferentes usos do solo seguiram a sequência SD > FE1 > FE2 > FN. O sistema florestal e o tipo de manejo adotados favoreceram a interceptação e infiltração de água, diminuindo o potencial de escoamento, erosão e aporte de sedimentos na bacia e, portanto, são sustentáveis do ponto de vista da erosão hídrica. Os parâmetros fisiográficos associados ao relevo, forma e sistema de drenagem da sub-bacia indicaram uma área de elevado potencial de escoamento superficial. Durante os eventos de máxima precipitação diária, o índice de umidade dos solos revelou um alto potencial de escoamento superficial e erosão hídrica em cerca de 15%, 61% e 88% da sub-bacia, respectivamente. As práticas conservacionistas adotadas devem ser mantidas, principalmente em áreas de cabeceira, de forma a reduzir o potencial de escoamento superficial e erosão na sub-bacia.

Brazilian Journal of Development

Palavras-chave: erosão hídrica, morfometria, saturação do solo.

ABSTRACT
The objective of this study was to identify the surface runoff potential and the susceptibility to water erosion of the sub-basin Terra Dura forestry garden, located in Eldorado do Sul, RS. Regarding vegetation, were analyzed soil loss and water by surface runoff in the main class of soil sub-basin in two eucalyptus forest systems which represent the soil use designated as FE1 and FE2; and two reference systems: the native forest (NF) and bare soil (BS). The potential of the landscape to generate surface runoff was assessed by physiographic characteristics and soil moisture index (W). The quantification of surface runoff and soil loss in different uses of soils for the RA followed the sequence BS> FE1> FE2> NF. The forest system and the type of forest management adopted favoring the interception and infiltration of water, reducing the surface runoff potential, erosion and sediment delivery in the basin, therefore are sustainable in terms of water erosion. The parameters physiographic associated with the relief, shape and drainage of sub-basin indicated an area of high surface runoff potential. During the events of maximum daily precipitation, the soil moisture index showed a high surface runoff potential and water erosion about 15%, 61% and 88% of sub-basin, respectively. The conservation practices adopted should be maintained, especially in headwater areas, in order to reduce the surface runoff potential and erosion in the sub-basin.

Keywords: water erosion, morphometry, soil saturation.

1 INTRODUÇÃO

Considerando a usual vulnerabilidade dos ecossistemas em plantações florestais relacionada, entre outros, à baixa fertilidade natural do solo (FERREIRA et al., 2020), relevo movimentado e mecanização, o uso sustentável do solo exige o conhecimento das potencialidades e limitações dos componentes ambientais para subsidiar o planejamento das atividades produtivas e gerenciamento dos recursos naturais (SILVA et al., 2014). O estudo das características hidrológicas da bacia hidrográfica, como aspectos de vegetação, clima, geomorfologia, solo e escoamento superficial, é condicionante para a definição do potencial de uso e manejo florestal do solo pela avaliação da erosão hídrica.

Em relação aos impactos da mudança do uso e manejo do solo sobre as variáveis hidrológicas e erosivas, a floresta desempenha papel fundamental na distribuição de energia e água na superfície, influenciando nos processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão. Sendo o escoamento superficial a fase do ciclo hidrológico mais diretamente associada ao desenvolvimento do processo erosivo, é imprescindível considerar em sua análise tanto parâmetros agroclimáticos como parâmetros fisiográficos (PRUSKI; SILVA, 1997). Os parâmetros agroclimáticos incluem o uso do solo, a precipitação e a evapotranspiração. Os parâmetros fisiográficos, por sua vez, incluem: área, forma e declividade da bacia os quais, quanto maiores, tanto maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial.

Brazilian Journal of Development

A cobertura e condições de uso do solo exercem influência considerável na capacidade de infiltração de água do solo, na interceptação da água advinda da precipitação e na evapotranspiração. A precipitação, conforme se eleva em magnitude, intensidade e duração tende a aumentar o escoamento superficial. E, durante o evento de precipitação, uma taxa de evapotranspiração elevada acarreta em uma menor umidade do solo e, consequentemente, uma maior taxa de infiltração. Há ainda as condições de superfície decorrentes do tipo de solo, da topografia e da rede de drenagem. O tipo de solo interfere na taxa de infiltração da água no solo e na capacidade de retenção de água sobre a superfície; a topografia influencia na velocidade da água e capacidade de armazenamento da água sobre o solo; e a rede de drenagem permite a rápida concentração do escoamento favorecendo, consequentemente, a ocorrência de elevadas vazões de escoamento superficial (PRUSKI; SILVA, 1997).

O movimento da água no solo causado pela infiltração e escoamento pode ser determinado através de modelos hidrológicos que descrevem matematicamente a distribuição espacial destes processos (SABZEVARI et al., 2010). Um modelo que descreve o índice de umidade do solo permite analisar o comportamento hidráulico e a propensão dos solos ao escoamento superficial, haja vista a significativa influência da umidade do solo na coesão e desagregação das partículas do solo, influenciando as fases iniciais da erosão causada pela precipitação (DAMACENA et al., 2010).

No presente trabalho objetivou-se identificar o potencial de escoamento superficial e suscetibilidade à erosão da sub-bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, situada no município de Eldorado do Sul, RS, para dois sistemas florestais de eucalipto que representaram o uso atual e dois sistemas de referência: a floresta nativa e o solo descoberto. O potencial da paisagem em gerar escoamento foi avaliado por meio das características fisiográficas e do índice de umidade do solo (O' LOUGHLIN, 1986).

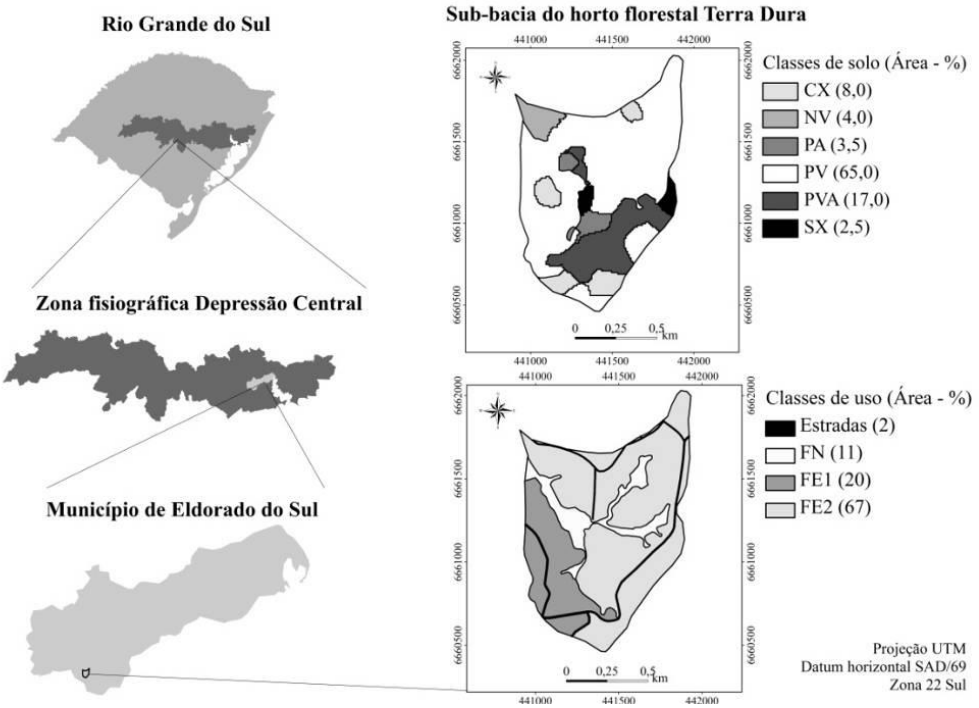
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

A área de estudo abrange a sub-bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, localizada no município de Eldorado do Sul e inserida na região fisiográfica Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul. A sub-bacia compreende uma área de 101,5 ha, sendo delimitada pelas coordenadas UTM 22J 440.902 e 441.931E e 6.662.028 e 6.660.462 S (Datum SAD 69) (Figura 1).

Brazilian Journal of Development

FIGURA 1: Mapas de localização, classes de uso e solo na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS).



De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Cfa, subtropical úmido. A precipitação média anual é de 1.500 mm, bem distribuída durante todos os meses do ano. O uso do solo predominante na sub-bacia é o cultivo de florestas de eucalipto designadas FE1 e FE2 (Figura 1), com as principais características podendo ser observadas na Tabela 1. O restante da área refere-se à floresta nativa preservada, representada pela formação florestal designada Floresta Estacional Decidual Aluvial, e às estradas (Figura 1).

TABELA 1: Características dos sistemas florestais de eucalipto na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS).

Sistema	Referência	Ano plantio	Manejo	Prática conservacionista
Hibrído de *E. saligna*	FE1	2004	cultivo mínimo; 3x3 m	plantio em nível; manutenção resíduos colheita
Híbrido de *E. urophila, E. maidenii e E. globulus*	FE2	2001	cultivo mínimo; 3x3 m	plantio em nível; manutenção resíduos colheita

As classes de solo mais frequentes na sub-bacia são Argissolo Vermelho distrófico típico (PV) e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (PVA), seguidas de Cambissolo Háplico Tb distrófico típico (CX), Argissolo Amarelo distrófico típico (PA), Nitossolo Vermelho distrófico típico (NV) e Planossolo Háplico eutrófico gleissólico (SX) (Figura 1). As informações de textura e matéria orgânica (MO) referentes ao horizonte superficial (0-20 cm), bem como profundidade,

Brazilian Journal of Development

relevo e expressão geográfica predominante dos solos da sub-bacia do horto florestal Terra Dura podem ser observadas na Tabela 2.

TABELA 2: Atributos físicos, matéria orgânica (MO), características e expressão geográfica dos solos na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS).

	Argila	Silte	Areia	Relação textural	MO	Prof. *solum**	Prof. efetiva	Relevo
	------- g kg^{-1} -------				g kg^{-1}	-------m-------		
PA	230	390	380	2,14	14,0	1,5	1,0	ondulado
PV	240	140	620	2,90	15,6	2,0	1,0	ondulado
PVA	140	350	510	2,51	21,4	2,0	1,0	ondulado/forte ondulado
CX	360	170	470	1,32	25,0	0,8	0,6	ondulado
NV	250	310	440	1,06	16,1	2,0	1,0	ondulado
SX	170	410	420	2,09	25,1	1,5	0,7	plano

*Profundidade do *solum* (horizonte A+B). PV: Argissolo Vermelho; PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo; NV: Nitossolo Vermelho; CX: Cambissolo Háplico; SX: Planossolo Háplico.

Utilizando um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e o conjunto de ferramentas denominado TauDEM 5.0 (TARBOTON; MOHAMMED, 2010) foi organizada uma base cartográfica da área de estudo, contendo os seguintes planos de informação: altimetria - mapa das curvas de nível com equidistância vertical de 5 m e modelo de elevação digital hidrologicamente consistente (MEDHC) (OLIVEIRA et al., 2012) obtido pelo interpolador Topogrid; hidrografia - rede hidrográfica (rios, córregos e nascentes) do terreno; classe de solo e cobertura vegetal.

2.2 ESCOAMENTO SUPERFICIAL E PERDAS DE SOLO

O monitoramento do escoamento superficial e das perdas de solo foi estimado para a principal classe de solo da sub-bacia, Argissolo Vermelho (PV). Os quatro sistemas estudados foram: solo sob cultivo de eucalipto, um sistema de clone híbrido natural de *Eucalyptus saligna* instalado em 2004 (FE1) e um de clone híbrido de *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus maidenii* e *Eucalyptus globulus* plantado em 2001 (FE2); solo sob floresta nativa (FN), como referência de sistema em equilíbrio; e solo descoberto (SD), preparado inicialmente com uma gradagem e mantido sem vegetação através de capina manual, como referência de máxima perda de solo.

Em cada sistema foi instalada uma parcela de erosão, de onde se coletaram dados no período de novembro de 2006 a outubro de 2010. As parcelas possuem dimensões de 12,0 x 12,0 m em FE1 e FE2, e 4,0 x 12,0 m em FN e SD, sendo a maior dimensão localizada no sentido máximo do declive (20%) da classe de solo. A construção das parcelas e o método de coleta das amostras de solo e água foram realizados conforme Oliveira et al. (2013).

Os dados pluviométricos utilizados são referentes ao período de setembro de 2007 a agosto de 2010, obtidos da estação meteorológica instalada na sub-bacia, a qual gerou dados no intervalo de 30 minutos. A erosividade da chuva foi calculada pelo índice EI_{30}, utilizando as equações mensais ajustadas por Santos (2008) para o município limítrofe, Porto Alegre, RS. O EI_{30} anual foi obtido pelo somatório dos índices em cada mês do ano (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

O critério da eficácia do sistema de manejo do solo na redução da erosão foi definido a partir do cálculo da tolerância de perdas do solo (BERTOL; ALMEIDA, 2000), através dos seguintes atributos extraídos de Costa et al. (2009): profundidade efetiva do solo, relação textural entre os horizontes sub-superficial e superficial, permeabilidade e o teor de matéria orgânica.

2.3 CARACTERIZAÇÃO FISIOGRÁFICA

A partir de mapas digitalizados da sub-bacia, implementou-se um inventário com as seguintes características físicas: área de drenagem, perímetro, comprimento axial, largura média, coeficiente de compacidade, fator de forma, comprimento total dos cursos de água, comprimento do curso de água principal, densidade de drenagem, extensão média do escoamento superficial, desnível topográfico máximo da bacia e declividade. Os coeficientes de avaliação da forma, drenagem e relevo da sub-bacia foram calculados segundo Tucci (2002) e Vilella e Mattos (1975). As classes do mapa de declividade foram definidas conforme EMBRAPA (2006), utilizando-se o MEDHC.

2.4 ÍNDICE DE UMIDADE DO SOLO

Na sub-bacia do horto florestal Terra Dura, o padrão espacial da umidade do solo foi determinado a partir do modelo hidrológico desenvolvido por O'Loughlin (1986): $W = (Q/T) * [a / (b* \text{sen}\theta)]$, onde: W = Índice de umidade do solo (adimensional); Q = precipitação (mm); T = transmissividade do solo ($m^2\ s^{-1}$); a = área de contribuição (m^2); b = tamanho do pixel (m); sen θ = seno da declividade (radianos).

As chuvas máximas e médias diárias referentes ao período de setembro de 2007 a agosto de 2010 foram identificadas e separadas mensalmente para a escolha dos cenários de escoamento superficial. A transmissividade do solo foi calculada através do produto da condutividade hidráulica pela profundidade do *solum* (horizonte A + B) (Tabela 1), adaptado de Montgomery e Dietrich (1994): $T = k * b_a$, onde: T = transmissividade do solo ($m^2\ s^{-1}$); k = condutividade hidráulica ($m\ s^{-1}$); b_a = profundidade do solum (m). A condutividade hidráulica saturada dos solos da sub-bacia foi estimada através da equação de Dane e Puckett (1994): ks = 303,84 (- 0,144 * Arg), onde: ks =

Brazilian Journal of Development

condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}); Arg = argila (%) da camada de 0 a 20 cm (Tabela 1).

A área de contribuição foi calculada segundo Moore et al. (1993): $A = \chi\eta$, onde: A =área de contribuição (m^2); χ = fluxo acumulado (pixel); η = área da célula (25 m^2). O fluxo de cada célula foi obtido pelo método D∞ (TARBOTON, 1997), pois foi o que melhor descreveu os caminhos do fluxo superficial na sub-bacia (OLIVEIRA et al., 2012).

O modelo matemático de O'Loughlin (1986) estabelece que os resultados superiores a 1 correspondem a zonas que possuem condições suficientes para saturar e ocorrer fluxo superficial. Quando o índice de umidade do solo for menor ou igual a 1, toda a água da chuva infiltra no solo, não havendo água disponível para o escoamento superficial e, portanto, reduzindo a propensão à erosão e transporte de sedimentos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESCOAMENTO SUPERFICIAL E PERDAS DE SOLO

Os resultados mais elevados de escoamento superficial foram verificados em SD e os menores em FN, enquanto os sistemas FE1 e FE2 apresentaram taxas intermediárias (Tabela 3). Os sistemas com eucalipto apresentaram valores de escoamento superficial, relativamente, reduzidos e similares, porém, cerca de 3 vezes maiores comparados à FN (Tabela 3). Conforme verificado por Silva et al. (2011), Oliveira et al. (2013), Avanzi et al. (2013) e Silva et al. (2014), a mata nativa é a cobertura que proporciona menor escoamento superficial para todos os solos, devido a sua complexidade estrutural. O controle da erosão pela espécie arbórea se dá devido à interceptação da chuva pelo dossel, aumento da infiltração de água, manutenção do teor adequado de matéria orgânica e efeito agregador nas partículas de solo.

TABELA 3: Escoamento superficial em Argissolo Vermelho (PV) na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS), para as florestas de eucalipto e sistemas de referência, no período de 11/2006 a 10/2010.

		FE1		FE2		FN		SD	
	Precipitação	mm	%	mm	%	Mm	%	mm	%
2006	257	13	5	14	5	7	3	70	27
2007	1.487	155	10	181	12	38	3	1.147	77
2008	1.460	93	6	95	7	30	2	923	63
2009	1.833	142	8	116	6	55	3	888	48
2010	1.134	97	9	74	7	37	3	376	33
Média	1.542	125	8	120	8	42	3	851	55

FE1: Floresta de eucalipto plantada em 2004; FE2: Floresta de eucalipto plantada em 2001; FN: Floresta nativa, referencial de mínima perda de solo e água; SD: solo descoberto, referencial de máximo escoamento superficial e perdas de solo.

O escoamento superficial nos sistemas FE1 e FE2 foi cerca de 7 vezes menor comparado ao SD. Considerando uma capacidade de infiltração constante no PV sob determinada quantidade de precipitação pluvial, o volume do escoamento variou com a capacidade de retenção do fluxo da água na superfície do solo. Tanto o plantio em nível, como a espécie arbórea auxiliaram na redução do volume de escoamento nos sistemas FE1 e FE2 comparado ao SD, se aproximando do sistema em equilíbrio (FN), pois favoreceu a infiltração da água no solo através do parcelamento do comprimento de rampa e aumento da rugosidade do terreno e da capacidade de retenção de água. Silva et al. (2011) quantificaram perdas de água por escoamento de 2,6% a 3,8% em relação ao total precipitado para Latossolo Vermelho-Amarelo, com redução de 1,2% quando adotado o cultivo mínimo e práticas conservacionistas de plantio em nível e manutenção dos resíduos da colheita florestal nos plantios florestais, em relação ao plantio no sentido do declive e queima de restos culturais. Martins et al. (2010) verificaram perdas de 0,95% a 8,4% para floresta de eucalipto no sistema de cultivo mínimo, em Argissolo Amarelo.

Os valores de escoamento superficial no referencial de máxima perda de solo (SD) refletem o potencial erosivo da sub-bacia em relação às características do relevo, solo e clima, não considerando a cobertura vegetal ou uso do solo. Sob estas condições, o escoamento alcançou máxima de 63% e média de 55%, do total médio anual precipitado (Tabela 3). Gilles et al. (2009), Volk, Cogo e Streck (2004) e Volk e Cogo (2008), observaram perdas de água semelhantes, da ordem de 50%, 49% e 35%, respectivamente, e Castro, Cogo e Volk (2006) verificaram perdas de 80%, em parcelas sem cobertura vegetal instaladas em PV sob chuva simulada, no município de Eldorado do Sul (RS). Um paralelo pode ser feito ainda, entre a condição de SD e a operação de corte raso da floresta de eucalipto em Argissolos, sendo recomendadas práticas conservacionistas que controlem a velocidade e o volume do escoamento. Vital, Lima e Camargo (1999) observaram um aumento de 100% no escoamento superficial de um Argissolo Vermelho-Amarelo no primeiro ano após o corte raso do eucalipto.

O índice de erosividade na sub-bacia, à exceção do ano 2006 e 2010, variou de 3627 a 7523 MJ mm ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}, com média de 5908 MJ mm ha^{-1} h^{-1} ano^{-1} (Tabela 4), classificados respectivamente como moderado e altos (FOSTER et al., 1981). Estes valores se aproximam dos verificados na literatura para o Rio Grande do Sul. Hickmann et al. (2008) determinaram erosividade de 8.875 MJ mm ha^{-1} h^{-1} ano^{-1} para Uruguaiana, enquanto Bazzano, Peltz e Cassol (2010) verificaram de 5.135 MJ mm ha^{-1} h^{-1} ano^{-1} em Rio Grande.

Brazilian Journal of Development

TABELA 4: Perdas de solo em Argissolo Vermelho (PV) para florestas de eucalipto e sistemas de referência na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS), no período de 11/2006 a 10/2010.

Ano	Precipitação	Erosividade	FE1	FE2	FN	SD
	mm	MJ mm ha^{-1} h^{-1}	---------- Mg ha^{-1} ----------			
2006*	257	985	0,124	0,048	0,032	1,66
2007	1.487	5.783	0,777	0,292	0,038	13,89
2008	1.460	3.627	0,186	0,067	0,026	5,07
2009	1.833	7.523	0,652	0,074	0,028	6,71
2010**	1.134	5.714	0,150	0,058	0,024	0,71
Média	1.542	5.908	0,472	0,135	0,037	7,01

*Dados relativos aos meses 11 e 12; **Dados relativos aos meses 1 a 10. FE1: Floresta de eucalipto plantada no ano de 2004; FE2: Floresta de eucalipto plantada no ano de 2001; FN: Floresta nativa, referencial de mínima perda de solo e água; SD: solo descoberto, referencial de máximo escoamento superficial e perdas de solo.

As perdas máximas de solo em todos os sistemas estiveram associadas aos primeiros 14 meses de monitoramento (2006 e 2007) (Tabela 4), período que sofreu influência da movimentação de solo inerente à instalação da parcela. A maior perda observada no período (13,89 Mg ha^{-1}) ocorreu em SD, ficando acima da tolerância do solo, de 6,35 Mg ha^{-1} ano^{-1}. A perda média do SD no período (Tabela 4) também foi acima da tolerância de perdas, mostrando a elevada propensão deste solo à erosão. Nos demais anos, as maiores perdas estiveram associadas à maior erosividade (7.523 MJ mm ha^{-1} h^{-1} ano^{-1}) registrada em 2009. Os sistemas FE1 e FE2 apresentaram perdas intermediárias à FN e SD, com perdas elevadas no período de alta erosividade.

As perdas médias de solo de 0,472 e 0,135 Mg ha^{-1} nos sistemas FE1 e FE2 (Tabela 5) são, respectivamente, 13 e 47 vezes menores do que a tolerância permitida, próximas às observadas por Zhou et al. (2002), Cardoso et al. (2004), Martins et al. (2010) e Silva et al. (2011) para plantios de eucalipto. O revolvimento mínimo do solo aliado à manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície contribui para a maior conservação do solo nos sistemas FE1 e FE2. A espécie arbórea promove ainda efeitos de redução no impacto direto das gotas de chuva no solo, aumento da infiltração de água, manutenção do teor adequado de matéria orgânica e agregação das partículas do solo. A camada orgânica presente na superfície dos solos florestais (serrapilheira) funciona também como barreira física ao livre escoamento superficial, diminuindo o volume e a velocidade da enxurrada, e assim, sua capacidade erosiva de desagregação e transporte de solo, corroborando observações de Martins et al. (2010), Silva et al. (2011), Oliveira et al. (2013) e Silva et al. (2014).

Nos sistemas individuais com eucalipto, não se observou redução das perdas de solo com a idade da floresta (Tabela 4). Este fato difere do verificado em alguns trabalhos, que quantificaram a redução no escoamento superficial e nas perdas de solo ao longo do ciclo de plantio de *E. grandis* (MARTINS et al., 2010) e *E. saligna* (RANZINI; LIMA, 2002). A diferença verificada entre FE1 e

Brazilian Journal of Development

FE2 pode ser atribuída, além das diferentes idades dos sistemas, às interações de dossel, serrapilheira e sub-bosque, as quais se acredita terem influenciado diretamente na proteção do solo. De acordo com observações de campo, a floresta de *E. saligna* (FE1) possui um dossel mais fechado do que floresta do híbrido *E. urophila, E. maidenii e E. globulus* (FE2) mesmo com metade da idade, refletindo em um sob-bosque menos desenvolvido e maiores perdas de solo (Tabela 4). Já no dossel mais aberto da FE2, o crescimento do sub-bosque é favorecido, alterando a capacidade de proteção do solo neste sistema, 3,5 vezes menor em relação ao FE1. A influência do sub-bosque na redução da erosão em sistemas florestais também foi relatada nos estudos de Porto, Walling e Callegari (2009), Martins et al. (2010), Silva et al. (2011) e Oliveira et al. (2013).

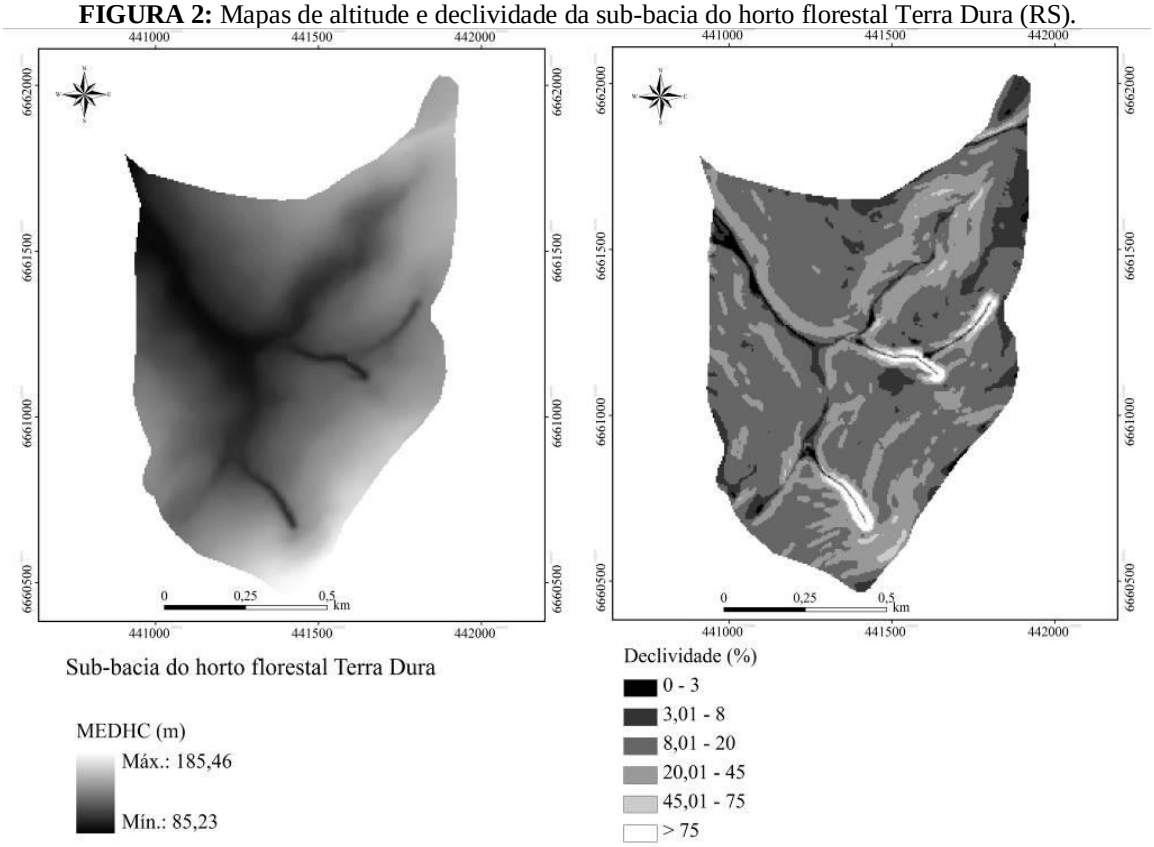
3.2 ANÁLISE FISIOGRÁFICA

A sub-bacia do horto florestal Terra Dura possui altimetria alternando de 85 a 185 m, com relevo variando de plano a escarpado, respeitando a seguinte distribuição: 1% plano; 9% suave ondulado; 61% ondulado; 25% forte-ondulado, 2% montanhoso e 1% escarpado (Figura 2). A sub-bacia estudada corresponde, morfologicamente, às características típicas da zona fisiográfica Depressão Central, formada por relevo de colinas baixas e pouco declivosas, de altitudes que variam de 80 a 180 m (RAMGRAB et al., 2004). Com uma distância entre curvas de nível de 5 m e 33,8 km de comprimento total das curvas, a declividade média (I) da sub-bacia é de 16,6%, caracterizando um relevo ondulado. A fase de relevo ondulada denota declives moderados (8 a 20%), topografia pouco acidentada e colinas. O relevo forte ondulado, segundo mais freqüente na sub-bacia, apresenta topografia acidentada formada de outeiros ou morros e diferenças de nível de 100 m (Figura 2).

A paisagem de relevo mais movimentado da sub-bacia favorece uma maior velocidade do escoamento superficial e, consequentemente, maior arraste das partículas do solo. Segundo Calderano Filho et al. (2003), na superfície inclinada entre 8% e 14%, o escoamento superficial tende a ser médio ou rápido e a erosão sob cultivo varia amplamente com o solo e as práticas de manejo. Entre 14% e 20%, a superfície é inclinada a muito inclinada e o escoamento superficial é rápido ou muito rápido na maioria dos solos, os quais provavelmente sofrem erosão hídrica sob cultivo, exceto os mais permeáveis. Da mesma maneira, em relevo forte ondulado (20 a 45%) a superfície é fortemente inclinada e o escoamento é muito rápido para a maioria dos solos.

Brazilian Journal of Development

FIGURA 2: Mapas de altitude e declividade da sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS).



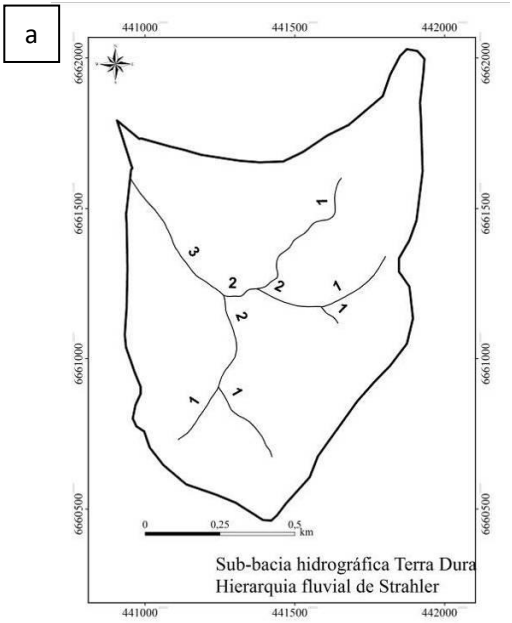
As características fisiográficas básicas da sub-bacia destacam esta suscetibilidade ao escoamento superficial. Determinou-se uma área de 1,01 km^2, com perímetro de 4,6 km, comprimento axial de 0,99 km, largura média de 0,77 km e comprimento do talvegue de 0,89 km. A pequena área acarreta na maior concentração do escoamento superficial na bacia e no menor tempo necessário para que este escoamento atinja a seção de controle, comparado a bacias maiores. O coeficiente de compacidade (Kc) encontrado foi de 1,28 indicando que a sub-bacia, em condições normais de precipitação, possui tendência mediana a grandes enchentes. Quanto mais próximo a 1 este índice, maior a potencialidade de picos de enchentes, uma vez que, bacias hidrográficas cuja forma se aproxima a de um círculo tendem a proporcionar a conversão do escoamento superficial para um trecho pequeno do rio principal. A bacia se comporta da mesma maneira quanto mais se assimilar à forma quadrada. Este formato favorece o fluxo dos canais de menor para o de maior ordem hierárquica tendendo a atingir a simultaneidade e ocasionando enchentes. Neste caso, o fator de forma (Kf) foi igual a 0,77, indicando tendência mediana a enchentes; e o índice de conformação (Ic) de 1,03, onde quanto mais próximo de 1, maior a propensão a enchentes.

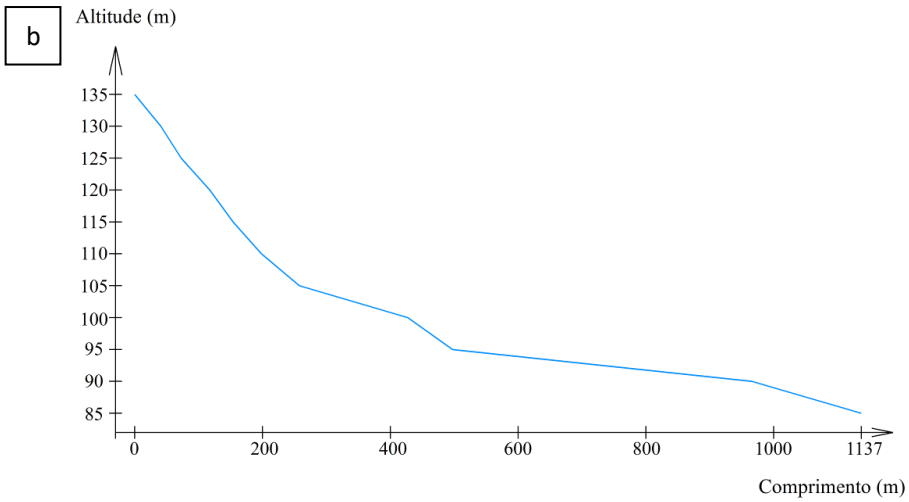
A hierarquia fluvial ou ordem dos rios indica que a classificação da rede de drenagem da sub-bacia é de 3° ordem (STRAHLER, 1957), com 8 cursos de água (Figura 3a). A densidade da rede de drenagem (DR) foi de 7,88 canais km^{-2}. As cabeceiras do curso de água são uma zona de

Brazilian Journal of Development

convergência dos fluxos superficial e subterrâneo havendo, assim, uma interação sinergética favorável ao processo de incisão sobre a vertente que denota o elevado risco de erosão destas áreas, onde um manejo conservacionista do solo deve ser priorizado.

FIGURA 3: Classificação da rede de drenagem (a) e perfil do curso d'água principal (b) da sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS).





Na Figura 3b pode-se observar o perfil longitudinal do curso d'água principal, expresso pela relação entre seu comprimento e sua altimetria, definindo o gradiente. Com uma variação de 50 m da nascente até a seção de controle, nos primeiros 200 m do curso d'água ocorre a maior declividade (cerca de 50% da diferença total de altitude, ou 25 m aproximadamente), indicando que a cabeceira

da sub-bacia está propícia a maiores perdas de solo. A segunda parte do curso é caracterizada por ser mais suave, favorável à deposição de sedimentos. A sinuosidade do curso d'água principal (S) é de 1,27, denotando um canal pouco tortuoso, com declividade (S1) de 8,79%. A declividade e a carga de sedimentos do canal influenciam a sinuosidade, sendo menor quanto maior a declividade e menor a carga de sedimentos. A pouca tortuosidade do canal deve-se, portanto, ao relevo ondulado já comentado, uma vez que o monitoramento das perdas de solo indicou elevada propensão à erosão na principal classe de solo da sub-bacia (Tabela 4).

Os resultados de Dd permitem avaliar o nível de desenvolvimento do sistema de drenagem e fornecem uma indicação da sua eficiência. Através da Dd é possível identificar, portanto, a propriedade de transmissividade do terreno e, consequentemente, algumas características de potencial erosivo. Este índice pode variar de 0,5 km km^{-2} em bacias com drenagem escassa a 3,5 km km^2 ou mais em bacias bem drenadas (VILLELA; MATTOS, 1975; COLLARES, 2000). Valores altos de densidade de drenagem estão geralmente associados a regiões de rochas impermeáveis e de regime pluviométrico caracterizado por chuvas de alta intensidade ou alta concentração da precipitação. A sub-bacia apresentou Dd elevada, de 2,56 km km^{-2}, indicando um sistema bem drenado de uma área pouco permeável, com relevo mais movimentado. O comprimento médio (Cm) do caminho percorrido pelas águas pluviais antes de se estabilizarem ao longo de um canal guarda uma estreita relação com a Dd, sendo de 0,09 km. É importante ressaltar que este fator deve ser monitorado, pois pode ser alterado com a utilização dos recursos hídricos decorrente da agricultura, a ponto de influenciar a disponibilidade de água (COLLARES, 2000).

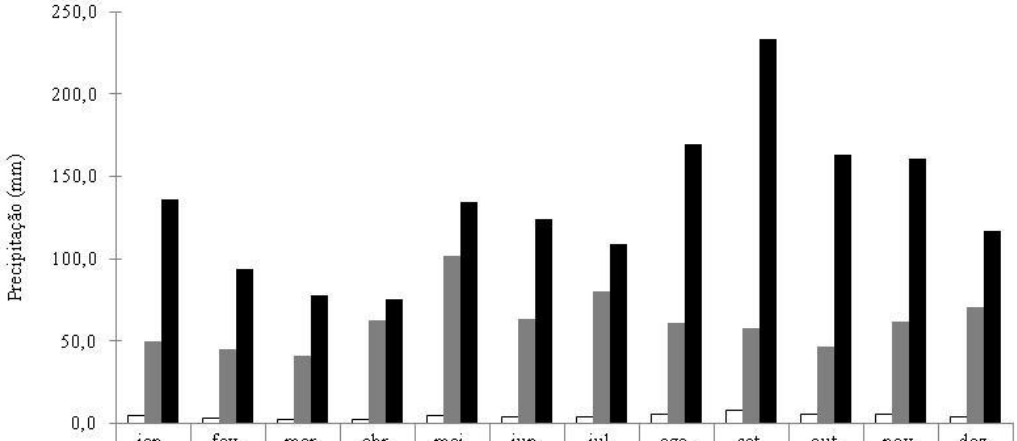
3.3 ÍNDICE DE UMIDADE DO SOLO

A Figura 4 apresenta as precipitações máximas diárias, médias diárias e médias mensais analisadas no período, das quais foram escolhidos três cenários como referência de análise do índice de umidade do solo. Considerando o escoamento de água da chuva como um fenômeno espacial inerentemente dinâmico, para analisar a mudança no escoamento superficial foram adotadas a menor e a maior precipitação máxima diária do período, 41 e 101 mm, respectivamente, além da precipitação média diária mais elevada, 7,8 mm (Figura 4).

O maior valor de precipitação diária observado no período estudado, 101 mm, ocorreu no dia 02 de maio de 2008. O comportamento de saturação dos solos durante o regime de mudança pluviométrica representado na Figura 5 confirma os resultados morfométricos, ou seja, elevada propensão a enchentes decorrente da pequena área da bacia (101 ha) e de sua forma (Ic), devido à maior concentração do escoamento superficial com o aumento da precipitação.

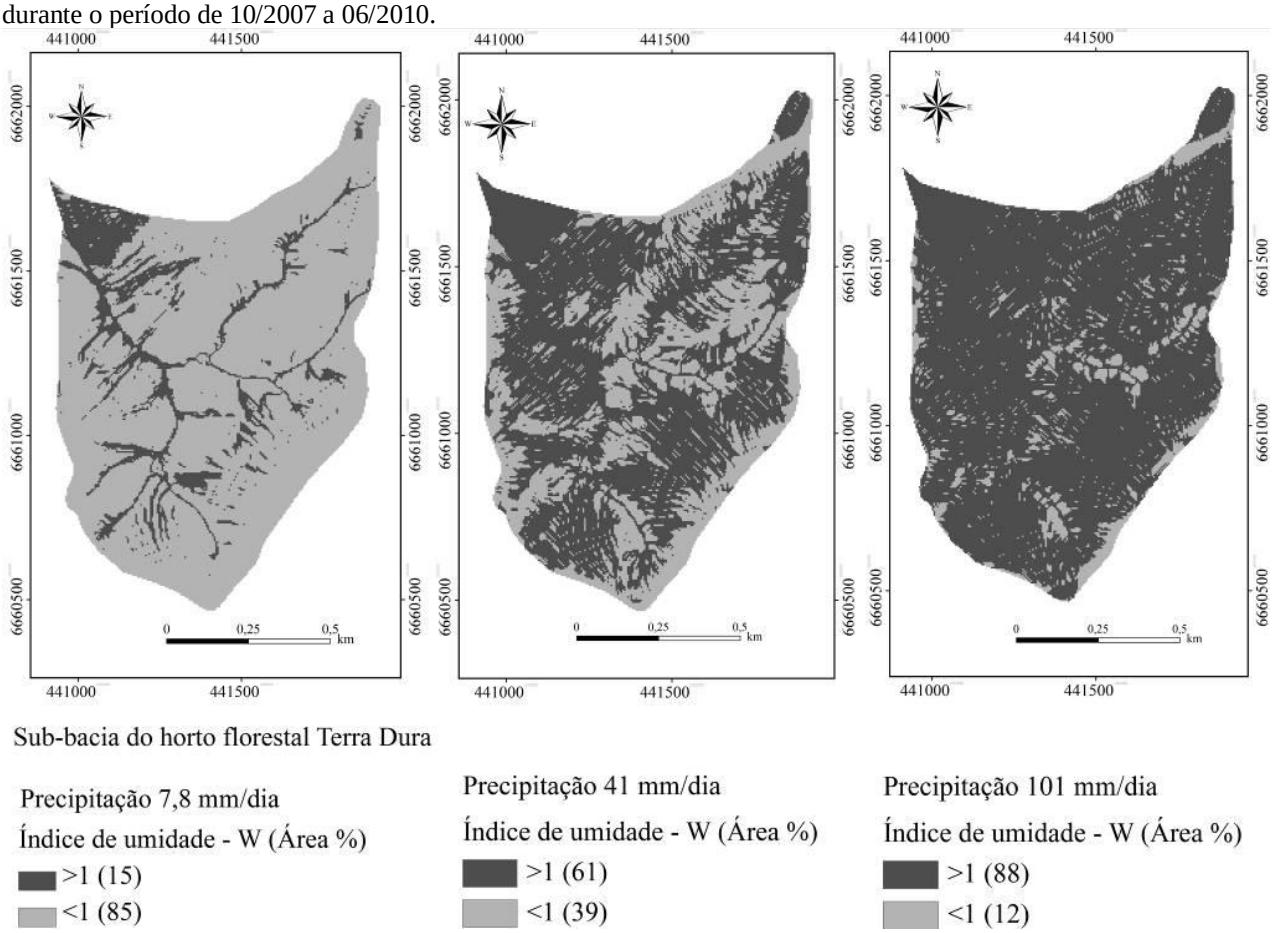
Brazilian Journal of Development

FIGURA 4: Precipitação média diária, máxima diária e média mensal no período de 09/2007 a 08/2010 (a) na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS).



	jan.	fev.	mar.	abr.	mai.	jun.	jul.	ago.	set.	out.	nov.	dez.
□Média diária (mm)	4,4	3,4	2,5	2,5	4,3	4,1	3,5	5,5	7,8	5,3	5,4	3,8
■Máx. diária (mm)	50	45	41	63	101	63	80	61	58	47	62	71
■Média mensal (mm)	136	94	78	75	134	124	109	170	233	163	161	117

FIGURA 5: Índice de umidade do solo (W) na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS) durante: maior precipitação média diária (7,8 mm); menor precipitação máxima diária (41 mm) e maior precipitação máxima diária (101 mm), durante o período de 10/2007 a 06/2010.



A precipitação média das médias diárias no período foi 4,3 mm, variando entre 2,5 mm nos meses de março e abril, a 7,8 mm no mês de setembro (Figura 4). Já a máxima diária mensal teve

seu menor valor no mês de março e seu maior valor no mês de maio, chegando a 101 mm diários, cerca de 23 vezes maior do que a média diária anual de 4,3 mm. O índice de umidade do solo se comportou de maneira diretamente proporcional à precipitação, aumentando progressivamente em toda a bacia a partir da rede de drenagem principal (Figura 5). O valor máximo de 7,8 mm foi escolhido para representar o processo de saturação em condições médias de precipitação diária. Neste cenário, a área de saturação atingiu 15% da sub-bacia, revelando uma capacidade satisfatória de drenagem (Figura 5).

Em relação às máximas chuvas diárias esperadas, o cenário da menor precipitação máxima diária mensal (41 mm) apresentou um aumento de 4 vezes na área saturada, em relação à situação média (7,8 mm), ultrapassando 60% da sub-bacia (Figura 5). Para o cenário de chuva máxima de 101 mm, a área saturada de 88% mostrou um pequeno aumento em relação à menor máxima diária, cerca de 1,4 vezes. Para a amplitude de valores de precipitação máxima diária mensal observada (entre 41 e 101 mm), a sub-bacia do horto florestal Terra Dura encontra a maior parte de sua área saturada (Figura 5).

Nos períodos de pouca chuva, 7,8 mm dia^{-1}, a água do solo percola lentamente em direção ao aquífero, que alimenta o deflúvio da bacia. Já nos períodos chuvosos, 41 e 101 mm dia^{-1}, a infiltração é alta e as camadas superficiais do solo tendem a adquirir condições de saturação. Como o uso da bacia é florestal, Bacellar (2005) destaca que durante um evento de precipitação contínua a maior parte da área tem capacidade de infiltração superior à intensidade da chuva, não gerando o processo de escoamento direto ou superficial. A parcela de água infiltrada formará os fluxos sub-superficial e subterrâneo, alimentando os canais e cursos da água. No momento em que a taxa de fluxo sub-superficial exceder a capacidade do solo em transportá-lo ocorre o processo de elevação do nível de água no solo, emergindo a superfície como escoamento de retorno, de importância direta nos processos de escoamento direto e expansão das áreas saturadas próximas aos canais perenes em direção aos canais intermitentes resultantes dos processos desencadeados a partir do evento de precipitação. Assim, o rápido aumento do deflúvio na sub-bacia ocorre devido ao escoamento sub-superficial e este escoamento irá variar conforme a topografia e a umidade antecedente do solo.

A observância da pequena diferença no aumento das zonas de saturação entre a menor e a maior precipitação máxima diária (41 e 101 mm, respectivamente), fornece um indicativo da influência da umidade antecedente na geração de escoamento superficial na sub-bacia (Figura 5). Em uma sub-bacia sob cultivo de eucalipto, Avanzi et al. (2008) também apontou a umidade antecedente associada às maiores quantidades de chuvas, como fator responsável pelos eventos de escoamento superficial.

Brazilian Journal of Development

No Argissolo Vermelho (PV) a permeabilidade avaliada em campo variou de 8,3 a 84,5 mm h^{-1}, com média de 50 mm h^{-1}, classificada como lenta a moderada. Para o Cambissolo Háplico (CX), a taxa variou de 5,7 a 11,4 mm h^{-1}, com média de 10 mm h^{-1}, classificada como lenta. Os valores estimados para estes solos indicam uma baixa permeabilidade, como observado na Tabela 6. De acordo com Santos et al. (2005), nestas condições o perfil permanece molhado por um período significativo, mas não durante a maior parte do ano. Assim, em decorrência da precipitação intensa que já saturou as camadas mais profundas ou de menor permeabilidade, uma porção da precipitação pluvial não infiltra no solo e, portanto, dá origem ao escoamento superficial. Na dinâmica do escoamento superficial, fluxos laminares resultantes do volume de água excedente escoam à superfície do terreno podendo causar erosão.

TABELA 6: Condutividade hidráulica saturada estimada pela equação de Dane e Puckett (1994) e classes de permeabilidade dos solos estudados na sub-bacia do horto florestal Terra Dura (RS).

Classe de solo	Condutividade hidráulica	Classe de permeabilidade*
	--- mm h^{-1} ---	
PV	9,6	Lenta
PVA	11,1	Lenta
PA	40,5	Lenta a moderada
NV	1,7	Muito lenta
CX	8,3	Lenta
SX	26,3	Lenta a moderada

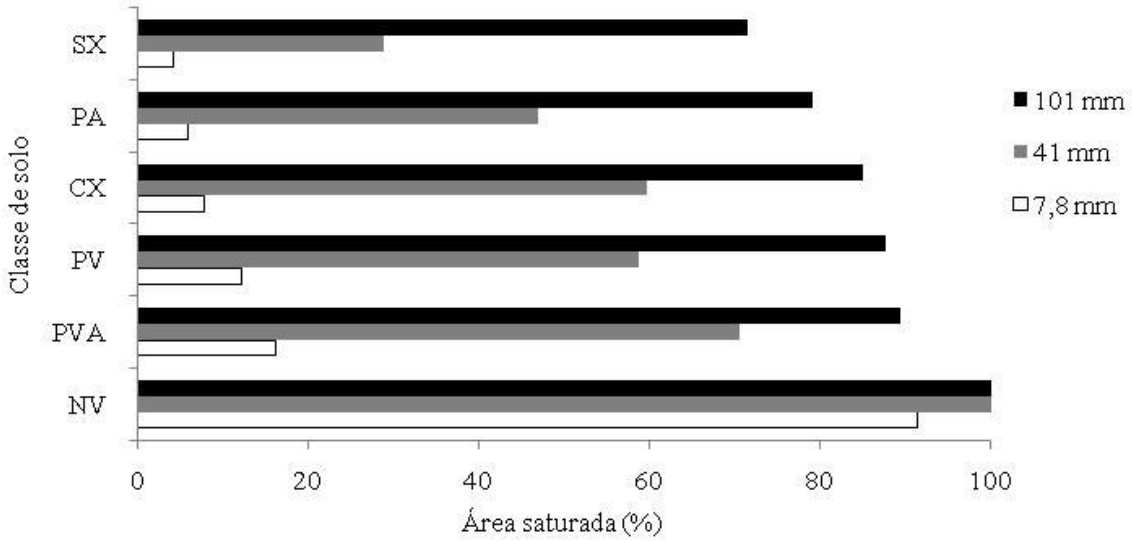
*Segundo Soil Survey Staff (1993). PV: Argissolo Vermelho; PVA: Argissolo Vermelho Amarelo; NV: Nitossolo Vermelho; CX: Cambissolo Háplico; SX: Planossolo Háplico.

Neste sentido, em meses de maior precipitação há a tendência ao rápido aumento da saturação e consequentemente, do escoamento superficial, intensificando a ação erosiva da água. O mês de setembro, onde se verificou a maior precipitação média diária (7,8 mm), apresentou também a maior precipitação média mensal (233 mm) seguido dos meses de agosto, outubro e novembro (Figura 4). Estes meses, embora não tenham apresentado as maiores precipitações diárias, apresentaram as maiores médias mensais de precipitação (Figura 4), podendo gerar um escoamento superficial significativo. Considerando o uso florestal da sub-bacia, o período de agosto a novembro não é favorável, portanto, às operações silviculturais de manejo como plantio, manutenção e abertura de estradas, pois o solo menos protegido se torna mais suscetível ao processo erosivo. O regime de corte raso ao final do período de rotação, principalmente, é um fator que pode resultar em perdas consideráveis de solo por erosão, prejudicando tanto a qualidade da água quanto a manutenção da produtividade (PORTO; WALLING; CALLEGARI, 2009).

Brazilian Journal of Development

A área de saturação analisada em relação às classes de solo não evidenciou um padrão definido na sub-bacia (Figura 6). Enquanto a maior área saturada ocorreu no Nitossolo Vermelho, correspondente à sua menor condutividade hidráulica (Tabela 6), a área de menor saturação ocorreu no Planossolo Háplico (SX), onde a condutividade hidráulica foi intermediária entre os solos analisados (Tabela 6). A análise conjunta da textura e pedoforma, entretanto, forneceu um bom indicativo na área de estudo. Considerando o relevo predominantemente ondulado da sub-bacia (Figura 3) associado ao maior gradiente textural nos Argissolos e no Planossolo (Tabela 2), solos cuja representatividade é de 88% na sub-bacia (Figura 1), um rápido aumento das áreas saturadas e do escoamento superficial são favorecidos na ocorrência de precipitações. Com a diferença textural acentuada entre os horizontes A e B dos solos e seu reflexo na redução da permeabilidade, há a saturação do horizonte superficial e a ocorrência de escoamento superficial, pois a capacidade de infiltração é excedida.

FIGURA 6: Áreas saturadas durante as precipitações diárias, relativas a cada classe de solo.



É reconhecida a elevada propensão à saturação e ao escoamento superficial dos Argissolos típicos do Rio Grande do Sul em eventos de chuvas máximas (STRECK et al., 2008), refletindo na menor tolerância de perdas e maior exigência conservacionista, principalmente após o corte raso da floresta. A textura mais argilosa do horizonte B confere maior coesão e reduz a desagregação e as perdas de solo (Tabela 5), mas favorece o escoamento superficial (Tabela 4). Este fator, associado às características físicas do sistema de drenagem como relevo ondulado (Figura 3) e morfometria propícia a enchentes (área, Ic, Kf e Dd), geram um escoamento superficial significativo na sub-bacia (W>1) (Tabela 3).

Brazilian Journal of Development

A baixa permeabilidade associada à textura argilosa, no caso do NV (Tabela 5), acarretou em uma maior capacidade de retenção de água neste solo, refletido nos resultados do índice de umidade. Para a menor precipitação diária avaliada (7,8 mm), o NV apresentou a quase totalidade de sua área saturada (Figura 6). O NV apresenta menor relação textural e textura argilosa representando, de forma geral, um solo menos suscetível à erosão quando comparado aos Argissolos, conforme relatou Costa (2008). Contudo, estas características associadas ao relevo ondulado em que o solo se encontra indicam uma área de elevado potencial de saturação e escoamento em condições médias de precipitação diária, necessitando de práticas de manejo diferenciadas para o eucalipto. Os resultados concordam com Damacena et al. (2010), os quais verificaram uma maior influência das posições no relevo quanto ao padrão de saturação em solos de baixa relação textural.

Já o SX, apesar da permeabilidade lenta a moderada (Tabela 5) decorrente da textura média do horizonte superficial, apresenta condições menos favoráveis à saturação, pois aproximadamente metade da sua área localiza-se na parte alta da sub-bacia, próximo ao divisor da rede de drenagem. Tais solos quando localizados em relevo ondulado a forte ondulado não possuem risco de alagamento acentuado. O escoamento superficial da água é ainda favorecido em razão do aumento abrupto no teor de argila do horizonte A para o B que implica na severa redução da permeabilidade ao longo do perfil. Já no CX, apesar do índice de umidade também sofrer influência de maiores altitudes e do relevo mais movimentado, além da baixa capacidade de armazenamento de água e lenta permeabilidade, quando comparado ao NV tem a infiltração de água algo favorecida devido ao pequeno gradiente textural (Tabela 5), e consequentemente, um menor potencial de saturação deste solo.

4 CONCLUSÕES

Os parâmetros fisiográficos exercem grande influência sobre o escoamento superficial na sub-bacia Terra Dura, indicando uma área com elevado potencial de perdas de solo, água, matérias orgânicas e nutrientes, e assoreamento dos corpos de água.

A quantificação do escoamento superficial e perdas de solo nos diferentes usos do solo para principal classe da sub-bacia revelou que a cobertura florestal e o tipo de manejo diminuem o potencial de escoamento, erosão e aporte de sedimentos, favorecendo a interceptação e infiltração da água. O sistema florestal atualmente adotado na sub-bacia é sustentável do ponto de vista da erosão hídrica, devendo ser mantidas as práticas conservacionistas existentes de forma a controlar o potencial de escoamento superficial e erosão.

O índice de umidade dos solos indicou elevado potencial de escoamento superficial e erosão hídrica durante eventos de máxima precipitação diária. Em condições médias de precipitação diária, a saturação esteve associada às redes de drenagem, indicando que o restante da área não é influenciado pelo escoamento gerado a partir da saturação do solo.

AGRADECIMENTOS

À CMPC Celulose Riograndense pela logística de campo na implantação, condução e coleta de dados experimentais e à CAPES pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

AVANZI, J. C. et al. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 563-569, nov./dez. 2008.

AVANZI, J.C.; SILVA, et al. Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and Atlantic forest. **Ciência e Agrotecnologia**, 37(5):427-434, 2013.

BACELLAR, L.A.P. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. **Geo.br**, v.1, p. 1-39, 2005.

BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Erosividade e características hidrológicas das chuvas de Rio Grande (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 235-244, jan./fev. 2010.

BERTOL, I.; ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 3, p. 657-668, jul./set. 2000.

CALDERANO FILHO, B. et al. Levantamento de solos e avaliação da aptidão agrícola das terras da microbacia Janela das Andorinhas, no município de Nova Friburgo, RJ. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2003. 52 p. (EMBRAPA Solos. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**, n. 27).

CARDOSO, D. P. et al. Erosão hídrica avaliada pela alteração na superfície do solo em sistemas florestais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 66, p. 25-37, dez. 2004.

CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 339-352, mar./abr. 2006.

COLLARES, E. G. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na bacia do rio Capivari, SP**. 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

COSTA, A. M. da et al. Levantamento detalhado de solos da microbacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura (RS) e considerações sobre escalas de mapeamento. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1272-1279, set./out. 2009.

DAMACENA, F. A. et al. Identificação de zonas de saturação na paisagem a partir de dados de transmissividade obtidos em situ na bacia hidrográfica do rio Jardim (DF). **Espaço & Geografia**, Brasília, v. 12, n. 1, p. 105-123, 2010.

DANE, J. H.; PUCKETT, W. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INDIRECT METHOD FOR ESTIMATION HYDRAULIC PROPERTIES OF UNSATURATED SOILS, 1994, Riverside. **Proceedings…** Riverside: University of California, 1994. p. 389-403.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.

FERREIRA, C.F.; BASSACO, M.V.M.; ARAÚJO, E.M.; PAULETTI, V.; PRIOR, S.A.; MOTTA, A.C.V. Gypsum effects on eucalyptus nutrition in subtropical Brazil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n.5, p.25160-25177, may. 2020.

FOSTER, G. R. et al. Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 36, n. 6, p. 355-359, Nov./Dec. 1981.

GILLES, L. et al. Perdas de água, solo, matéria orgânica e nutriente por erosão hídrica na cultura do milho implantada em área de campo nativo, influenciadas por métodos de preparo do solo e tipos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 5, p. 1427-1440, set./out. 2009.

HICKMANN, C. et al. Erosividade das chuvas em Uruguaiana, RS, determinada pelo índice EI30, com base no período de 1963 a 1991. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 825-831, mar./abr. 2008.

MARTINS, S. G. et al. Fator cobertura e manejo do solo e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e em mata atlântica nos Tabuleiros Costeiros do estado do Espírito Santo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, p. 517-526, set. 2010.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A Physically-Based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, Washington, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, Apr. 1994.

MOORE, I. D. et al. GIS and land surface subsurface process. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Ed.). **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford, 1993. chap. 19, p. 196-230.

OLIVEIRA, A.H. et al. Consistência hidrológica de modelos digitais de elevação (MDE) para definição da rede de drenagem na sub-bacia do horto florestal Terra Dura, Eldorado do Sul, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1259-1268, Aug. 2012.

OLIVEIRA, A.H. et al. Water erosion in soils under eucalyptus forest as affected by development stages and management systems. **Ciência e Agrotecnologia**, 37(1):159-169, 2013.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, Washington, v. 22, n. 5, p. 794-804, May 1986.

PORTO, P.; WALLING, D. E.; CALLEGARI, G. Investigating the effects of afforestation on soil erosion and sediment mobilisation in two small catchments in Southern Italy. **Catena**, Amsterdam, v. 79, n. 3, p. 181-188, Dec. 2009.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa, MG: DEA/ UFV, 1997. 33 p. (Caderno didático, 26)

RAMGRAB, G. E. et al. Ramdabrasil: folha SH. 22 - Porto Alegre. In: SCHOBBENHAUS, C. et al. (Ed.). **Carta geológica do Brasil ao milionésimo, sistema de informações geográficas: programa geologia do Brasil**. Brasília: CPRM, 2004. 1 CD-ROM.

RANZINI, M.; LIMA, W. P. Comportamento hidrológico, balanço de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com Eucalyptus, no Vale do Paraíba, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 61, p. 144-159, jun. 2002.

SABZEVARI, T. et al. A steady-state saturation model to determine the subsurface travel time (STT) in complex hillslopes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, v.14, n.6, p.891-900. 2010.

SANTOS, C. N. dos. **El Nino, La Nina e a erosividade das chuvas no estado do Rio Grande do Sul**. 2008. 138 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

SANTOS, R. D. dos et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SILVA, M.A. et al. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Revista Ciência Florestal**, 21(4):765-776, 2011.

SILVA, M.A. da et al. Water erosion risk prediction in eucalyptus plantations. **Ciênc. agrotec**., Lavras, v. 38, n. 2, p. 160-172, Apr. 2014.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transaction of American Geophysical Union**, Washington, v. 38, n. 6, p. 913-920, July 1957.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. rev. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in the grid digital elevation models. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 2, p. 309- 319, Feb. 1997.

TARBOTON, D. G.; MOHAMMED, I. N. **TauDem 5.0: terrain analysis using digital elevation models.** Logan: Utah State University, 2010. Disponível em: <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5.0/downloads.html>. Acesso em: 2 set. 2010.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2002. 943 p.

VILELLA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245 p.

VITAL, A. R. T.; LIMA, W. P.; CAMARGO, F. R. A. Efeitos do corte raso de plantação de Eucalyptus sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e as perdas de solo e de nutrientes em uma microbacia no Vale do Paraíba, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 55, p. 5-16, jun.1999.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P. Inter-relação biomassa vegetal subterrânea-estabilidade de agregados-erosão hídrica em solo submetido a diferentes formas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1713-1722, jul./ago. 2008.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P.; STRECK, E. V. 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**, Viçosa, MG, v. 28, n. 4, p. 763-77, jul./ago. 2004.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to consevation planning. Washington: USDA, 1978. 58 p. (**Agriculture handbook**, n. 537).

ZHOU, G.Y. et al. Hydrological impacts of reafforestation with eucalypts and indigenous species: a case study in southern China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 167, n. 1/3, p. 209-222, Aug. 2002.