

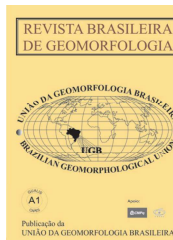


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 21, nº 2 (2020)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1533>



DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE DO SOLO POR MEIO DE DOIS MÉTODOS INDIRETOS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NA REGIÃO SUL DO ESTADO DO AMAZONAS, BRASIL

DETERMINATION OF SOIL ERODIBILITY BY MEANS OF TWO INDIRECT METHODS IN A WATERSHED IN THE SOUTHERN REGION OF THE STATE OF AMAZONAS, BRAZIL

Miqueias Lima Duarte

*Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Av. Três de Março, 511, Sorocaba, São Paulo. CEP: 18087-180. Brasil
ORCID: 0000-0001-8232-4655
E-mail: miqueiaseng@hotmail.com*

Eliomar Pereira da Silva Filho

*Departamento de Geografia, Universidade Federal de Rondônia
Campus - BR 364, Km 9,5, Porto Velho. Rondônia. CEP: 76801-059. Brasil
ORCID: 0000-0002-6271-8435
E-mail: eliomarfilho@uol.com.br*

Wildson Benedito Mendes Brito

*Departamento de Engenharia Agrícola e solos, Universidade Federal do Amazonas
Rua Vinte e Nove de Agosto, 786, Humaitá, Amazonas. CEP: 69800-000. Brasil
ORCID: 0000-0002-4267-5992
E-mail: wild.brito@gmail.com*

Tatiana Acácio da Silva

*Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Av. Três de Março, 511, Sorocaba, São Paulo. CEP: 18087-180. Brasil
ORCID: 0000-0002-6922-979X
E-mail: tatianaacacio1909@gmail.com*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
26/05/2019
Aceito (Accepted):
12/03/2020

Palavras-chave:

Perda de Solo; Conservação do Solo; Mapeamento.

Keywords:

Soil Loss; Soil Conservation;
Mapping.

Resumo:

A erosão hídrica é um dos principais problemas da agricultura em todo o mundo. Ela é responsável pelo transporte de sedimentos que causam problemas à qualidade e quantidade de água em rios e reservatórios, perda de nutrientes e matéria orgânica do solo, causando prejuízos diretos à produção agropecuária e ao meio ambiente. Este trabalho avaliou a erodibilidade dos solos na bacia hidrográfica do rio Juma, no sul do estado do Amazonas, por meio de dois métodos indiretos, e quais são os atributos do solo que mais contribuem com a erodibilidade na área. Foram identificadas oito classes de solos, nas quais efetuaram-se coletas representativas de forma aleatória, e realizadas análises físicas e químicas do solo. Em seguida, foram executadas análises de regressão múltipla e espacialização dos dados por meio da interpolação por krigagem com uso do Sistema de Informação Geográfica

(SIG). Verificou-se que os índices de erodibilidade obtidos por ambos os métodos foram fortemente influenciados pelos extremos texturais (areia e/ou silte), entretanto, o método de Denardin apresentou resultados mais adequados. Os resultados obtidos indicam que existe predominância de moderada erodibilidade do solo na área de estudo, bem como alta e muito alta erodibilidade no entorno dos principais cursos hídricos associados a solos de origem aluvial.

Abstract:

Water erosion is one of the main problems facing agriculture worldwide. It is responsible for the transport of sediments that compromise the quality and quantity of water in rivers and reservoirs, as well as for the loss of nutrients and soil organic matter, thereby causing direct damage to agricultural production and the environment. This work evaluated the erodibility of soils in the Juma watershed, located in the southern region of the state of Amazonas, through two indirect methods and assessed the soil attributes of the area that most contribute to its erodibility. Eight soil classes were identified, from which representative collections were collected randomly, and soil physical and chemical analyses were performed. Then, multiple regression and spatialization analyses of the data were performed by kriging interpolation using the Geographic Information System (GIS). It was verified that the erodibility indices obtained by both methods were strongly influenced by textural extremes (sand and/or silt); however, the Denardin method presented more adequate results. These results indicate that there is a predominance of moderate soil erodibility in the study area, as well as high and very high erodibility around the main water courses associated with soils of alluvial origin.

1. Introdução

A perda de solo de forma acelerada tem sido um problema global, ocasionado, inicialmente, pela quebra do equilíbrio solo/cobertura vegetal em decorrência das diversas atividades antrópicas, tornando uma das formas mais prejudiciais de degradação dos solos em todo o mundo, uma vez que, com a remoção da camada superficial fértil do solo, proporciona a redução significativa da capacidade produtiva das culturas, além de causar sérios danos ambientais, em decorrência do carreamento de fertilizantes e agentes tóxicos para os corpos hídricos, causando desequilíbrio na flora e fauna aquática.

Na busca por medidas de combate aos danos da erosão, vários métodos de avaliação de impactos ambientais e de perda de solos têm sido amplamente utilizados como subsídios no planejamento agroambiental. Nas últimas décadas, foram desenvolvidos vários modelos de medição da erosão do solo. Em destaque, tem-se a Equação Universal de Perda do Solo (*Universal Soil Loss Equation* - USLE), que foi amplamente testada e constitui uma metodologia consagrada na avaliação de perda de solos.

A USLE, desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), corresponde a uma equação de seis variáveis, sendo que quatro (R, K, L, S) observam as condições naturais do meio, e duas (C, P), as condições antrópicas. O produto das variáveis naturais ($PNE = R * K * L * L$) possibilita avaliar o Potencial Natural de Erosão (PNE em $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$). De forma similar, o produto dos fatores naturais e antrópicos ($A = R * K * L * S * C * P$) permite

estimar a perda de solos (A em $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$).

Desse modo, o conhecimento detalhado de cada fator que compõe a USLE é de fundamental importância, dado que pode auxiliar na escolha das alternativas de uso do solo e práticas conservacionistas adequadas para as áreas cultivadas. Quando desenvolvido no âmbito de bacias hidrográficas, possibilita a interpretação e entendimento dos comportamentos erosivos para cada tipo de solo e suas relações com os fatores associados, auxiliando na delimitação de zonas de planejamento.

Dentre os fatores que compõem a USLE, a erodibilidade do solo é um atributo intrínseco de cada solo e expressa a resistência deste à erosão hídrica, sendo dependente, entre outros fatores, dos seus atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos (Araújo *et al.*, 2011). A erodibilidade representa o efeito dos processos que regulam a infiltração da água no solo, a degradação pelo impacto da gota de chuva e a resistência ao transporte pelo fluxo superficial, os quais são responsáveis pelo comportamento do solo em relação aos processos erosivos (Mata *et al.*, 2007; Viel *et al.*, 2017).

A erodibilidade do solo, que corresponde ao Fator K da USLE, pode ser obtida de forma direta e indireta. O método direto, que corresponde à forma original de aquisição do parâmetro, é considerado caro e oneroso por necessitar desenvolver medidas em campo, sob ação da chuva natural ou antrópica em longos períodos de avaliação, enquanto que a obtenção por métodos indiretos utiliza equações ou modelos que envolvem atributos

do solo como variáveis independentes (Demarchi e Zimback, 2014; Silva *et al.*, 2016).

Existem diversos modelos para determinar a erodibilidade do solo de forma indireta, sendo que o mais utilizado foi desenvolvido por Wischmeier e Smith (1978), que propuseram um monograma derivado de dados de solos dos Estados Unidos. Esse método adota como variáveis os teores de silte modificado (silte + areia muito fina), argila, matéria orgânica, estrutura do solo e permeabilidade do perfil (Demarchi e Zimback, 2014). Porém, tal método não apresenta resultados satisfatórios para solos com classes texturais diferentes para as quais foi desenvolvido, e talvez, por isso, tem apresentado resultados inadequados para solos brasileiros (Marques *et al.*, 1997).

Denardin (1990) desenvolveu uma equação para determinar a erodibilidade dos solos brasileiros a partir de parâmetros físicos (silte, areia, argila, permeabilidade, diâmetro médio ponderado das partículas menores que 2 mm) e químico (teor de matéria orgânica). Da mesma forma, Mannigel *et al.* (2002) propuseram a utilização da equação de Bouyucus, que consiste na relação entre a porcentagem dos teores de “areia + silte” e a porcentagem dos teores de “areia”, para determinação da erodibilidade (Demarchi e Zimback, 2014).

No estado do Amazonas, apesar de existir predominância de áreas conservadas na região onde ocorre a expansão da fronteira agropecuária (sul do estado), ao mesmo tempo que existe uma pressão por múltiplos interesses de uso do solo, há uma insuficiência de informação sobre sua fragilidade, o que impossibilita o desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao ordenamento territorial de forma adequada. Dessa forma, este trabalho estimou e mapeou a erodibilidade laminar dos solos na bacia hidrográfica do rio Juma, por meio do método indireto proposto por Denardin (1990) e Mannigel *et al.* (2002), e verificou os atributos que mais contribuem com a erodibilidade dos solos na área.

Material e Métodos

Caracterização da Área de Estudo

A área onde foi desenvolvido este estudo está localizada no município de Apuí, no sul do estado do Amazonas, entre as coordenadas geográficas 7°3'41.85" a 7°26'46.49" Sul e 59°54'6.55" a 60°12'41.47" Oeste (Figura 1). Situado na 5ª Sub-Região do Madeira, o município de Apuí limita-se com os municípios de Novo Aripuanã, Borba, Maués, Manicoré e com o estado de Mato Grosso.

A principal via de acesso do município é a BR-319 (Transamazônica) que liga ao município de Humaitá/AM (sede municipal a cerca de 397 km) no sentido SO e o município de Taroacanga/PA (sede municipal a cerca de 300 km) no sentido NE, por onde escoa a maior parte da sua produção. Apuí também está interligada, ao norte, com a sede municipal de Novo Aripuanã pela rodovia AM-174 (sede municipal a cerca de 320 km).

A bacia hidrográfica do rio Juma foi escolhida por constituir uma unidade de planejamento ambiental que contempla os interesses múltiplos da região. Em seu domínio, estão inseridas a Floresta Nacional Novo Aripuanã, o Assentamento Extrativista Aripuanã-Guariba, o Assentamento Rural do Rio Juma e Acari, além de abranger o perímetro urbano do município de Apuí.

As principais atividades econômicas desenvolvidas na região estão relacionadas à agricultura familiar e pecuária, além da atividade garimpeira (Carrero, 2014). Na bacia hidrográfica do rio Juma, o destaque é para a pecuária que ocupa cerca de 26,16% da área, sendo que 12,55% encontra-se degradada. As lavouras cultivadas na área de estudo são diversificadas, em ascendência estão os cafezais, que são cultivados por métodos tradicionais e em Sistemas Agroflorestais - SAFs, além de cacau e guaraná. No total, as áreas agrícolas na bacia do rio Juma perfazem 0,97% da área (Duarte *et al.*, 2018).

Procedimentos de Campo

Na bacia hidrográfica do rio Juma foram identificadas oito classes de solos (Argissolo Amarelo distrófico, Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo, Espodossolo Ferrocárbico hidromórfico, Gleissolo Háptico, Latossolo Amarelo distrófico, Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho Amarelo distrófico), a partir do mapa disponibilizado pela EMPRAPA/PA, escala 1:100.000.

Foi realizada uma coleta de solos na profundidade de 0-20 cm de forma aleatória nas classes de maior abrangência (Argissolo, Latossolos e Espodossolos) dentro da bacia hidrográfica, sendo 10 pontos na classe Argissolo (quatro na classe Argissolo Vermelho, cinco na classe Argissolo Amarelo, e um na classe de Argissolo Vermelho Amarelo), 10 pontos amostrais na classe Latossolo (três na classe Latossolo Amarelo, três na classe Latossolo Vermelho e quatro na classe Latossolo Vermelho Amarelo) e mais 10 pontos na classe Espodossolo, totalizando 30 pontos amostrais (Figura 2). Para a classe Gleissolo Há-

plico, foram utilizados dados obtidos por Santos (2013), que realizou uma análise em uma topossequência na classe Gleissolo Háptico no município de Apuí. Também foram abertas seis trincheiras nas classes de Argissolo e Latossolo, sendo o P01 em uma área de floresta nativa, P02 em uma área sob cultivo de agricultura itinerante e P03, P04, P05 e P06 em áreas sob cultivo de pastagem.

Os pontos aleatórios de amostragem incidiram

em áreas ocupadas em predominância por pastagem, os demais em áreas ocupadas por agricultura itinerante, floresta nativa, vegetação em estágio de regeneração natural e Sistema Agroflorestal - SAF. As amostras indeformadas de solo na camada superficial (0-20 cm) e nos perfis de trincheiras foram secas e destorroadas para obtenção da TFSA (Terra Fina Seca ao Ar), conforme metodologia descrita pela EMBRAPA (1997).

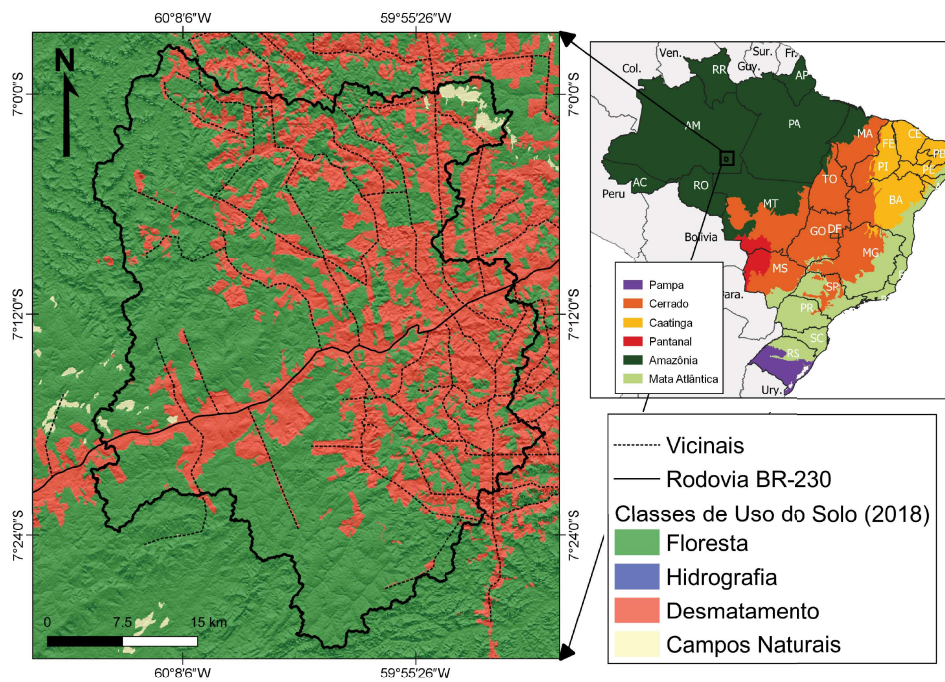


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Juma.

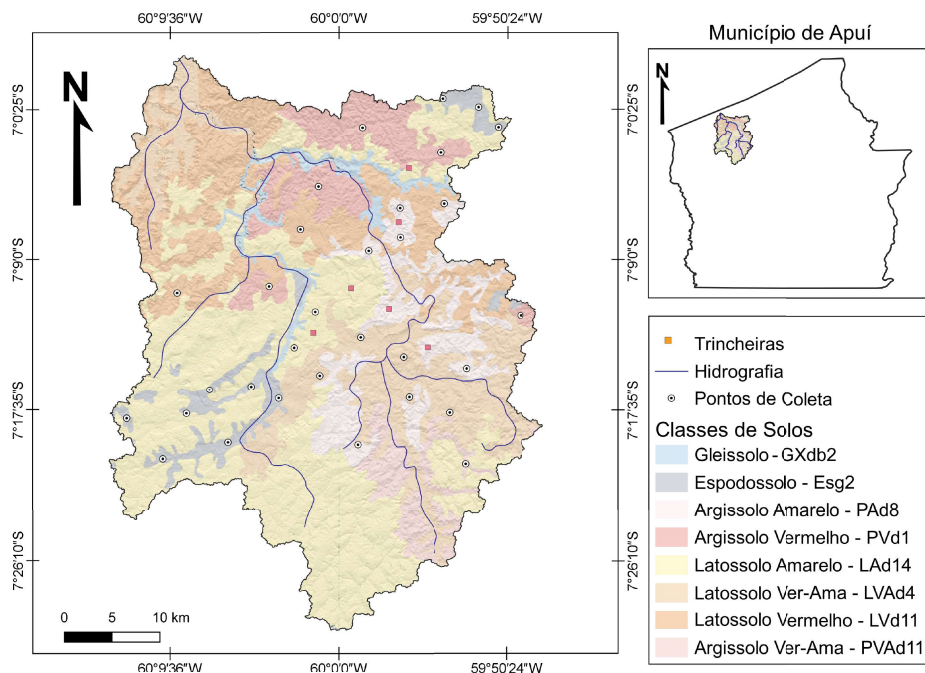


Figura 2 - Localização dos pontos de amostragem de solos na bacia hidrográfica do rio Juma.

Procedimentos de Laboratório

$$MO = CO \times 1,724 \quad (1)$$

As amostras de TFSA foram submetidas à análise física (granulométrica) e química (matéria orgânica) no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal do Amazonas (UFAM-IEAA), e no Laboratório de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA-RO).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, com solução de NaOH a 1,0 mol L⁻¹ com dispersante químico e com descanso de 16 horas, conforme metodologia da EMBRAPA (1997), para obtenção das frações de areia, silte e argila. As partículas sólidas da fração areia foram determinadas por meio de um agitador de peneiras, modelo SOLOTEST. Considerando o tipo de solo e a finalidade deste trabalho, cada amostra de fração areia foi agitada durante três minutos, utilizando as peneiras comuns com malhas de 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,250 mm; 0,125 mm e 0,053 mm.

A matéria orgânica (MO) foi estimada com base na análise de carbono orgânico (CO), de acordo com a metodologia de Walkley-Black, e modificada por Yeomans e Bremner (1988), baseando-se na premissa de que o húmus contém aproximadamente 58% de carbono. Assim, a MO foi estimada pela Equação 1.

em que, CO corresponde ao carbono orgânico do solo obtido na análise.

A estrutura do solo foi determinada diretamente em campo, sendo definida pelo tamanho das classes e tipos dos elementos estruturais, segundo as classes estabelecidas no Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2007), e codificada nas seguintes classes: (i) muito pequena granular = 1; (ii) pequena granular = 2; (iii) média a grande granular = 3 e (iv) blocos, laminar ou maciça = 4.

Já a permeabilidade do solo foi determinada conforme método descrito por Galindo e Margolis (1989), que é obtida a partir de uma associação entre a textura e grau de desenvolvimento da estrutura do solo observado nos respectivos horizontes. A associação entre esses atributos foi codificada nas seguintes classes: (i) rápida = 1; (ii) moderada a rápida = 2; (iii) moderada = 3; (iv) lenta a moderada (4) e (v) lenta = 5 (Tabela 1). Nesse caso, os solos com textura argilosa e muito argilosa que possuem estrutura fraca a moderada são classificados como lenta permeabilidade, enquanto que solos arenosos com estrutura moderada a forte normalmente apresentam rápida permeabilidade.

Tabela 1: Permeabilidade do solo em função da textura e grau de estrutura.

Textura	Grau de estrutura	Classe de permeabilidade
Argilosa e muito argilosa (argila ≥ 35%)	Fraca	Lenta
	Moderada	Lenta
	Forte	Moderada
Média (15% ≤ argila ≤ 35%)	Fraca	Moderada
	Moderada	Moderada
	Forte	Rápida
Arenosa (Argila + silte ≤ 15%)	Fraca	Moderada
	Moderada	Rápida
	Forte	Rápida

Fonte: Adaptado de Galindo e Margolis (1989).

Determinação da Erodibilidade do Solo

A erodibilidade do solo pelo método de Denardin (1990), o fator K_D, calculada com base no uso das frações granulométricas, permeabilidade (P), diâmetro médio ponderado de partículas inferiores a 2 mm (DMP) e teor de matéria orgânica (R), foi estimada a partir da Equação 2.

$$K_D = 0,0000748M + 0,00448059P - 0,0631175DMP + 0,01039567R \quad (2)$$

em que:

K_D = erodibilidade global do solo de Denardin (1990), t.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹;

M = {(areia fina + silte) x [(areia fina + silte) + areia grossa]}, %;

P = permeabilidade codificada segundo Galindo e Margolis (1989);

$DMP = \{[(0,65 \times \text{areia grossa}) + (0,15 \times \text{areia fina}) + (0,0117 \times \text{silte}) + (0,00024 \times \text{argila})] / 100\}$, mm;

$R = [\text{areia} - \text{areia muito fina} \times (\%MO/100)]$.

Já a erodibilidade do solo de Mannigel *et al.* (2002), o fator K_M , foi calculada com base nos teores de areia, silte e argila, conforme Equação 3.

$$K_M = \left[\frac{\text{areia}(\%) + \text{silte}(\%)}{\text{argila}(\%)} / 100 \right] \quad (3)$$

em que:

K_M = erodibilidade global do solo de Mannigel *et al.* (2002), t.ha.h.ha⁻¹MJ⁻¹mm⁻¹;

%Areia, %Silte, %Argila = porcentagens das frações de areia, silte e argila para cada horizonte.

Análises Estatísticas e Construção Cartográfica

Foi feita uma relação entre as classes de solos e a declividade local. A declividade da área de estudo foi obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) obtido no website

do Serviço Geológico dos Estados Unidos, a USGS (USGS, 2019), articulações S07_W060; S07_W061; S08_W060 e S08_W061. A declividade da área foi classificada a partir dos valores estabelecidos pela EMBRAPA, sendo: 0-3% (plano), 3-8% (suavemente ondulado), 8-20% (ondulado), 20-45% (fortemente ondulado), 45-75% (montanhoso) e acima de 75% (fortemente montanhoso).

Os índices de erodibilidade do solo obtidos pelos dois métodos foram comparados com os índices médios observados na literatura. A análise estatística foi realizada, visando testar o desempenho dos métodos utilizados, pelo teste t pareado com 5% de significância. Em seguida, a fim de verificar a influência de cada variável na determinação da erodibilidade do solo, foi desenvolvida uma análise de regressão múltipla, conforme descrito por Field (2009).

Os índices de erodibilidade dos solos foram interpolados pelo método de krigagem, posteriormente, realizou-se uma reclassificação com uso da ferramenta *r.reclass*, utilizando como referências as categorias definidas por Mannigel *et al.* (2002), conforme apresentado na Tabela 2. Logo após, foram confeccionados os mapas de erodibilidade do solo, empregando o Sistema de Coordenadas Geográficas UTM, Datum SIRGAS 2000, Zona 20 Sul.

Tabela 2: Classes de erodibilidade do solo segundo Mannigel *et al.* (2002).

Amplitude de K (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	Classe atribuída	Peso
0,019 a 0,024	Muito Baixa	1
0,025 a 0,030	Baixa	2
0,031 a 0,036	Moderada	3
0,037 a 0,042	Alta	4
> 0,042	Muito Alta	5

Resultados e Discussão

A área de estudo apresenta declividade predominantemente ondulada (45,36%) a suavemente ondulada (33,44%) distribuídas em toda sua extensão, sendo que apenas 11,76% correspondem a um terreno fortemente ondulado e montanhoso localizado, principalmente, na região norte da bacia hidrográfica, onde são comuns encostas retilíneas e corcovas com afloramento rochoso, e demais 9,35% de áreas são planas, ocorrendo, especialmente, próximos aos corpos hídricos.

A classe de solo de maior abrangência diz respeito ao Argissolo Vermelho (38,06%) e se encontra distribuída sob terreno predominantemente ondulado (45,76%) a suavemente ondulado (33,81%), seguido de fortemente ondulado (10,72%) e 9,54% em terreno plano, respectivamente. As demais classes de solos também apresentam distribuições similares, com exceção da classe Espodossolo que, em relação às demais classes, sua distribuição percentual é superior em terrenos fortemente ondulados montanhosos (Figura 3).

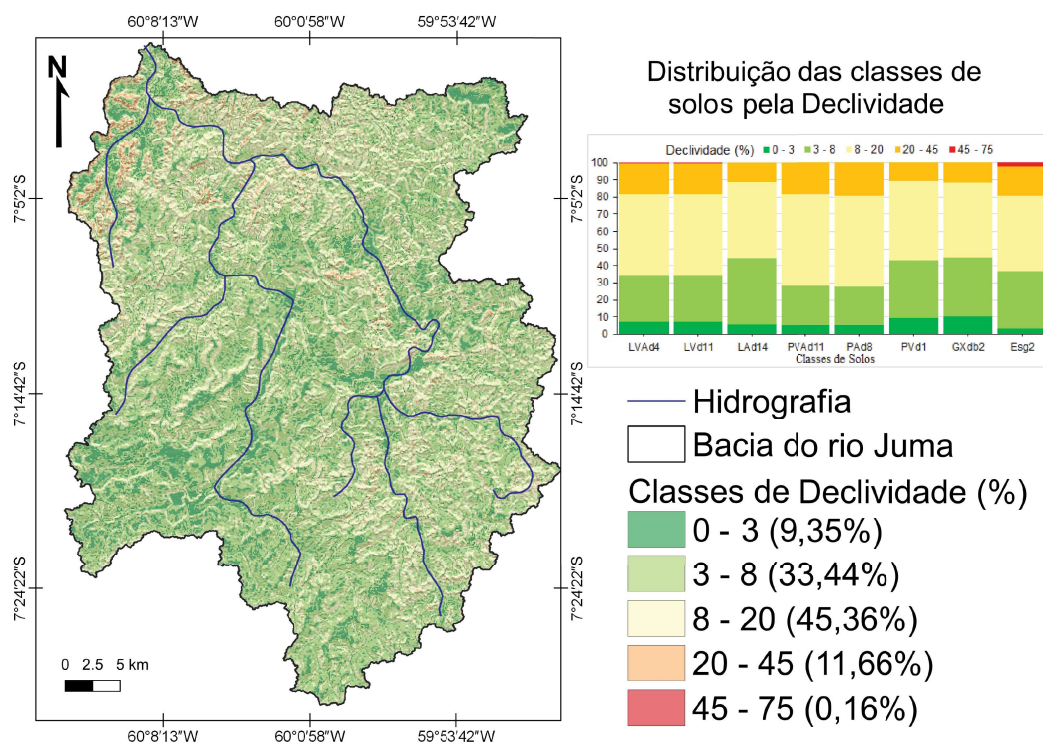


Figura 3 - Declividade da bacia hidrográfica do rio Juma e sua distribuição percentual em cada classe de solos.

Considerando a camada de 0-20 cm, os Argissolos apresentaram textura predominantemente argilosa, com permeabilidade abrangendo as três classes (lenta, moderada e alta), em conformidade com o estabelecido por Galindo e Margolis (1989), apresentando em média de 0,42 g.kg⁻¹ de matéria orgânica. Os Latossolos denotaram textura argilosa e argilo-siltosa, com permeabilidade lenta/moderada, e com concentrações médias de 0,43 g.kg⁻¹ de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo.

Na Tabela 3, encontra-se a descrição dos perfis de trincheiras para as classes de Argissolo e Latossolo avaliadas na área de estudo. Assim como nas camadas superficiais observadas anteriormente, verificou-se a predominância das frações mais finas (argila e silte), em destaque a fração argila, aumentando com a profundidade do solo. As classes texturais nos horizontes superficiais (horizonte A) são majoritariamente argilosas, com exceção nos pontos P03 e P06 que apresentaram textura franco-argilosa. Os teores de matéria orgânica também foram próximos aos observados nas camadas superficiais do solo, exceto no ponto P01, que é justificado pelo maior aporte de resíduos vegetais na superfície do solo, em função da vegetação nativa na área, associada à ausência de atuação antrópica.

O Gleissolo apresentou textura prevalentemente siltosa, com permeabilidade moderada e os menores

teores de matéria orgânica (0,14 g.kg⁻¹). O Espodossolo denotou textura areia franca, com permeabilidade moderada, e presença de 0,363 g.kg⁻¹ de matéria orgânica. Na Tabela 4, encontram-se os valores de textura, matéria orgânica e demais índices utilizados para aplicação da metodologia de Denardin (1990) e Mannigel *et al.* (2002), de acordo com cada unidade de solo observada na bacia hidrográfica do rio Juma.

Baseado nos dados de campo e aplicando a metodologia proposta por Denardin (1990) e Mannigel *et al.* (2002), obteve-se a erodibilidade nas camadas superficiais para cada classe de solo na bacia do rio Juma. Segundo a classificação da erodibilidade estabelecida por Mannigel *et al.* (2002), a erodibilidade dos solos estiveram entre muito baixo (Argissolo Vermelho-Amarelo), baixo (Argissolo Amarelo, Argissolo Vermelho,) moderado (Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo), alto (Espodossolo) e muito alto (Gleissolo) pelo método de Denardin (1990). Mediante o método de Mannigel *et al.* (2002), apenas a classe Espodossolo apresentou muito alta e o Gleissolo, baixa erodibilidade, enquanto as demais classes apresentaram erodibilidade muito baixa. Na Tabela 5, estão dispostos os valores médios para cada classe avaliada, bem como uma comparação com valores médios observados na literatura.

Tabela 3: Características morfológicas e atributos físicos e químicos de perfis de solos.

Hor.	Prof.	Matiz/ Croma	Transição	A.f.	A.g.	Silte	Argila	MO	S/A
	cm			-----g.Kg ⁻¹ -----					
P01 - Latossolo Amarelo									
A	0-5	10YR6/4	Plana	22	20,5	277,5	680	69,1	0,41
AB	5-22	10YR7/6	Ondulada	14	20,5	245,5	720	58,81	0,34
BA	22-32	10YR7/4	Ondulada	25	15,5	229,5	730	42,12	0,31
B1	32-56	10YR8/4	Ondulada	21,5	17	221,5	740	39,82	0,29
B2	56-114	10YR7/4	Ondulada	25	17	198	760	36,98	0,26
P02 - Argissolo Amarelo									
A	0-5	7,5YR6/2	Plana	18	16,5	305,5	660	51,3	0,46
AB	5-13	7,5YR5/6	Plana	20	14	216	750	42,31	0,28
BA	13-40	7,5YR6/6	Plana	22	13,5	174,5	790	38,21	0,22
B1	40-66	7,5YR6/4	Plana	19	12	169	800	36,31	0,21
B2	66-118	7,5YR6/6	Ondulada	22,5	12,5	155	810	32,13	0,19
P03 - Latossolo Amarelo									
A	0-10	10YR5/3	Plana	35	45,5	379,5	540	49,21	0,71
AB	10-31	7,5YR6/6	Plana	36,5	27,5	306	630	38,43	0,48
B	31-140	7,5YR5/6	Plana	43	44,5	332,5	580	37,65	0,57
P04 - Argissolo Amarelo									
A	0-7	10YR8/3	Plana	8,5	8	223,5	760	45,32	0,29
AB	7-27	10YR8/4	Plana	7,5	7,5	175	810	37,21	0,21
BA	27-46	10YR8/4	Plana	7,5	5,5	137	850	35,12	0,16
B	46-128	10YR8/3	Plana	7,5	4,5	108	880	34,82	0,12
P05 - Latossolo Amarelo									
A	0-4	10YR6/4	Plana	12,5	8,5	229	750	49,73	0,30
AB	4-32	10YR7/4	Ondulada	13,5	5,5	261	720	43,21	0,36
BA	32-98	10YR6/3	Ondulada	13,5	5	191,5	790	38,32	0,24
B1	98-119	10YR8/4	Ondulada	11	5	124	860	37,91	0,14
B2	119-150	10YR8/6	Ondulada	13	5	152	830	34,76	0,18
P06 - Argissolo Amarelo									
A	0-7	10YR6/4	Plana	128	99	373	400	51,43	0,93
AB	7-21	7,5YR7/6	Ondulada	97,5	78,5	324	500	48,32	0,64
BA	21-47	7,5YR6/6	Ondulada	100,5	55,5	284	560	41,39	0,50
B1	47-87	10YR7/6	Plana	98	67	255	580	0,43	38,61
B2	87-140	10YR7/6	Plana	86	55,5	268,5	590	0,45	35,76

Hor.: Horizonte; Prof.: Profundidade; A.f.: Areia fina; A.g.: Areia grossa; MO: Matéria Orgânica; S/A: Silte/Argila.

Tabela 4: Textura, matéria orgânica (MO) e índices da equação de Denardin (1990) para as classes de solos.

Classes de Solos	Textura	MO	M	P	DMP	R
Esg2	Areia Fraca	0,363	736,45	Moderada	0,558	0,00765
GXdb2	Silte	0,143	1347,00	Moderada	0,293	0,02722
PAd8	Argila	0,455	96,47	Lenta	0,061	0,01047
PVd1	Argila	0,429	350,3	Rápida	0,243	0,00859
PVAd11	Argila	0,363	60,96	Moderada	0,041	0,00436
LAd14	Argila	0,430	196,82	Lenta	0,106	0,00535
LVd11	Argila	0,447	202,84	Lenta/Moderada	0,105	0,00042
LVAd4	Argila	0,428	361,39	Lenta/Moderada	0,251	0,00858

MO: matéria orgânica; P: permeabilidade; DMP: diâmetro médio ponderado.

Tabela 5: Valores médios da erodibilidade do solo obtidos pelos dois métodos utilizados e valores médios observados na literatura.

Classes de Solos	K - Denardin	K - Mannigel	K - Literatura
	----- (t.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹) -----		
Esg2	0,037	0,189	0,045 - *1,4
GXdb2	0,096	0,026	0,028 - *2, 5
PAd8	0,029	0,004	0,046 - *6, 4
PVd1	0,028	0,016	0,045 - *5
PVAd11	0,015	0,002	0,140 - *11, 5
LAd14	0,031	0,009	0,018 - *3, 8
LVd11	0,033	0,009	0,038 - *9, 10
LVAd4	0,030	0,016	0,028 - *3, 7

Fonte: *1 - Corrêa et al. (2015); 2 - Chaves et al. (2010); 3 - Lima et al. (2007); 4 - Mannigel et al. (2002); 5 - Demarchi e Zimback (2014); 6 - Silva et al. (2016); 7 - Lima et al. (2016); 8 - Santos e Aquino (2016); 9 - Ruthes et al. (2012); 10 - Simonetti et al. (2018); 11 - Moraes e Sales (2017).

Para os solos da região, o método proposto por Denardin (1990) tem sido o mais utilizado por apresentar melhor desempenho quando comparado com resultados experimentais (Nunes et al., 2017; Silva et al., 2018; Gato et al., 2018). Neste estudo, a erodibilidade média variou entre 0,015 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹ a 0,096 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹ para o método de Denardin (1990), e 0,0020 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹ a 0,1891 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹ para o método de Mannigel et al. (2002).

Pelo método de Denardin (1990) obteve-se 0,031; 0,028; 0,096 e 0,037 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹ para as classes de Latossolos, Argissolos, Gleissolos e Espodosolos, respectivamente, nesse caso, os valores obtidos não apresentaram diferença significativa (p<0,05) com os observados na literatura. Por meio do método de Mannigel et al. (2002) obteve-se 0,00977; 0,0044; 0,0255 e 0,1891 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹ para as mesmas classes, entretanto,

os valores para ambas as classes de solos evidenciaram diferença significativa (p<0,05).

A classe Espodosolos de origem aluvial apresentou os maiores índices de erodibilidade pelo método de Mannigel et al. (2002). Esses valores atípicos (máximo 0,4707 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹ e mínimo 0,0127 t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹) para a classe em questão estão em função dos altos teores da fração areia, que interferem diretamente na determinação do Fator K, assim como observados por Mannigel et al. (2002) e Demarchi e Zimback (2014).

A análise de regressão múltipla entre os componentes da equação proposta por Denardin (1990) e os índices de erodibilidade do solo indicaram a variável M como a de maior peso na determinação dos fatores, seguido por DMP e R, e com menor influência o componente P. Resultados semelhantes foram observados por Demarchi e Zimback (2014), nos quais descrevem

que quanto maior o produto entre as partículas de maior tamanho do solo, maior será a suscetibilidade natural dos solos à erosão. Diante disso, as classes de solos que apresentaram as maiores concentrações de areia grossa ou silte indicaram os maiores índices de erodibilidade, que, neste estudo, foi observado nas classes de Espodosolos e Gleissolos.

Nos casos em que os teores de matéria orgânica foram maiores (em área de floresta natural e em áreas ocupadas por SAFs) os índices de erodibilidade tendem a diminuir. Esse comportamento permite inferir que a ação antrópica pode influenciar de forma decisiva no fator erodibilidade dos solos (Lima *et al.*, 2016), o que torna de suma importância a adoção de práticas agrícolas adequadas, tais como o plantio direto, SAFs e silvicultura, uma vez que possibilitam a manutenção do complexo orgânico do solo.

O componente de maior influência na determinação do fator K obtido pelo método de Mannigel *et al.* (2002) a partir da expressão de Bouyoucos corresponde à fração de areia, que apresentou correlação positiva (0,55), enquanto que a fração argila denotou uma forte correlação negativa (-0,60), seguida pela fração silte (-0,43), indicando que esses componentes se movem em direções opostas ao fator K.

Mannigel *et al.* (2002) descrevem que o fator K torna-se extremamente elevado em classes de solo que apresentam teor de silte + areia igual ou superior a 840 g.kg⁻¹, caso observado na classe Espodosolo, em que a somatória dessas frações foram superiores a 890 g.kg⁻¹, apresentando índices bem elevados em comparação com os observados na literatura.

Por outro lado, nos casos em que o teor de argila foi superior a 470 g.kg⁻¹ (classes PAd8, PVAd11, LAd14 e LVd11), os índices apresentaram valores próximos de zero, como observado por Mannigel *et al.* (2002), o que, segundo o autor, evidencia que a expressão de Bouyoucos não é precisa para a determinação da erodibilidade dos solos com textura extrema.

Comparando o desempenho dos métodos nos casos em que as texturas são extremas (arenosa ou siltosa), o método de Mannigel *et al.* (2002) apresentou elevados índices de erodibilidade, visto que leva em consideração a soma das %areia + %silte sobre %argila, naturalmente, quanto maiores forem os percentuais de areia e silte, maiores serão os índices de erodibilidade. No método proposto por Denardin (1990), essa influência está pre-

sente no componente M da equação, porém, observou-se que esses valores são amenizados pela subtração com o componente DMP que também sofre influência pelos extremos texturais, fazendo com que os índices obtidos não apresentem valores discrepantes com relação aos observados pelo método de Mannigel *et al.* (2002).

Apesar dos resultados obtidos pelos dois métodos serem empíricos, os componentes utilizados em ambos os casos possuem relação com a base física dos processos erosivos nas camadas superficiais do solo (Mannigel *et al.*, 2002; Demarchi e Zimback, 2014), tornando oportuno especializar os resultados na bacia hidrográfica, o que possibilita inferir a distribuição espacial da fragilidade dos solos nas camadas superficiais da área de estudo.

Na Figura 4, está disposta a distribuição espacial de erodibilidade do solo, na qual a Figura 4A corresponde à distribuição dos índices obtidos pelo método proposto por Denardin (1990), enquanto que, na Figura 4B, observa-se a distribuição espacial dos índices obtidos por meio do método proposto por Mannigel *et al.* (2002).

No primeiro caso (Figura 4A), existe a distribuição de cinco classes de erodibilidade do solo, onde 56,26% da área é ocupada por moderada erodibilidade, localizada, principalmente, na região central e extremo sul da bacia, em seguida, por 36,79% com baixa erodibilidade, distribuída, predominantemente, no extremo norte. As demais classes estão distribuídas em pequenas porções, sendo 3,55% da área correspondente à erodibilidade muito baixa, localizada no extremo sul, e demais 1,74% e 1,66% da área apresentando alta e muito alta erodibilidade do solo, localizadas, sobretudo, no entorno dos cursos hídricos, sob ocorrência dos Gleissolos e Espodosolos.

No segundo caso (Figura 4B), foram identificadas apenas três classes de erodibilidade, sendo que cerca de 94,78% da área é ocupada por muito baixa erodibilidade, estando distribuída em toda a extensão da bacia, posteriormente, 3,38% e 1,84% da área é ocupada por muito alta e baixa erodibilidade, respectivamente, distribuídas, principalmente, ao longo dos principais cursos hídricos. Nesse caso, a ocorrência da classe muito alta erodibilidade do solo, assim como observado anteriormente, está associada aos altos teores de areia referente à classe Espodosolo, enquanto que a baixa erodibilidade está relacionada aos altos teores de silte associados à classe Gleissolo.

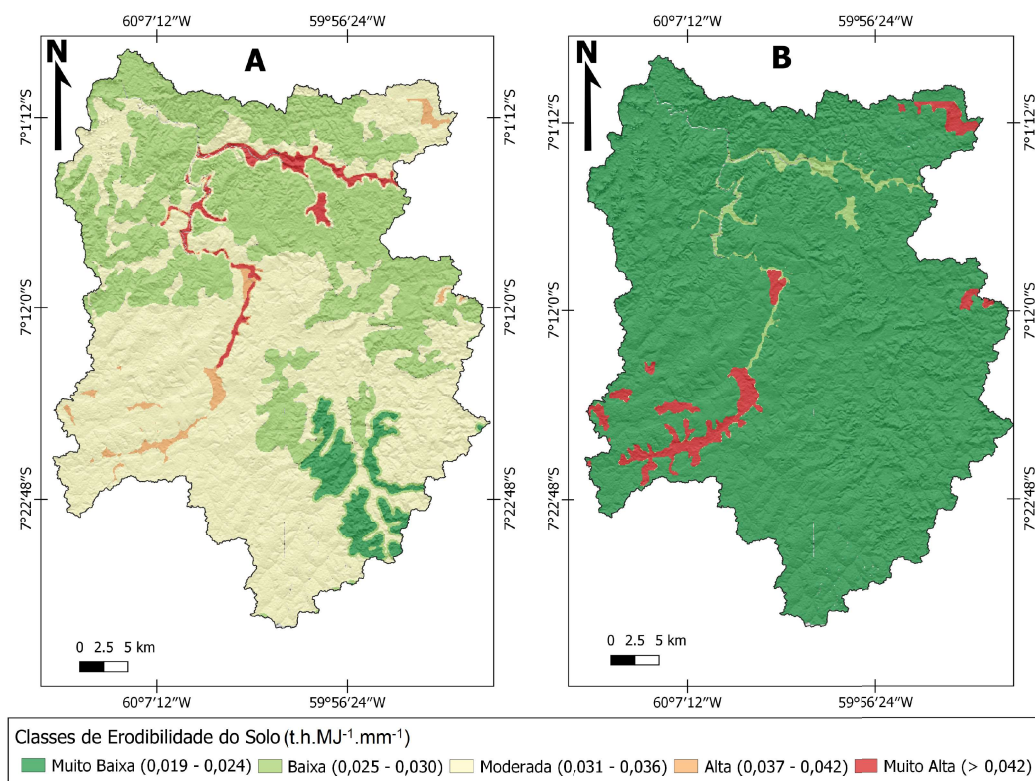


Figura 4 - Distribuição espacial da erodibilidade do solo na bacia hidrográfica do rio Juma.

Ao comparar a distribuição espacial da erodibilidade obtida pelo método de Denardin (1990) com o uso do solo (apresentada na Figura 1), observa-se que as áreas que possuem os maiores índices de erodibilidade são utilizadas por atividades agropecuárias. Levando em consideração que a erodibilidade do solo é um dos indicadores do tipo de manejo que o solo requer (Silva e Alvares, 2005). Nesse sentido, é de suma importância a adoção de práticas agrícolas adequadas, visto que a associação entre o relevo predominantemente ondulado e o potencial de erosividade da chuva da região (Duarte e Silva Filho, 2019) podem ocasionar a remoção de camadas superficiais de solo nos locais que possuem moderada, alta e muito alta erodibilidade.

Conclusões

Os resultados obtidos pelo método de Denardin (1990) foram mais aceitáveis em relação aos obtidos pelo método de Mannigel *et al.* (2002). Os índices médios obtidos indicam baixa erodibilidade para os Argissolos, moderada erodibilidade para os Latossolos, alta erodibilidade para os Espodossolos e muito alta erodibilidade para os Gleissolos.

Em relação aos atributos que mais influenciam na determinação da erodibilidade do solo, a fração areia foi a que apresentou maior peso na equação proposta por Mannigel *et al.* (2002). Em classes de solos com altos teores de silte + areia (>840 g.kg⁻¹), o método evidenciou elevados índices de erodibilidade. Por outro lado, em classes de solos com percentuais de argila superior a 470 g.kg⁻¹, os índices obtidos foram próximos de zero, indicando que o método é inadequado para determinação de erodibilidade em solos com elevados teores de silte + areia ou argila.

Pelo método de Denardin (1990), constatou-se que a associação entre as frações de areia e silte representadas pelo componente M da equação foi a que mais influenciou, entretanto, verificou-se que esses valores são amenizados pela subtração com o componente DMP, que também sofre influência pelos extremos texturais, fazendo com que os índices obtidos não apresentem valores tão discrepantes em relação aos observados pelo método de Mannigel *et al.* (2002).

A espacialização dos índices de erodibilidade na bacia hidrográfica possibilitou verificar que nas áreas atualmente ocupadas por atividade agropecuária predominam moderada erodibilidade do solo. O uso inade-

quado dessas áreas pode ocasionar a perda da camada superficial do solo por erosão laminar, sendo de grande importância a adoção de práticas agrícolas apropriadas que visem a conservação do solo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/CNPq (Código de Financiamento 145574/2016-4) pelo auxílio financeiro concedido ao primeiro autor, à Universidade Federal do Amazonas (UFAM/IEAA) (Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas), e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/RO) pelo auxílio nas análises de solos e à Profa. PhD Marília Locatelli (*in memoriam*) pelas orientações iniciais e o incentivo para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, F. S.; SALVIANO, A. A. C.; NETO, M. R. H. Estimativa da Erodibilidade de Latossolos do Piauí. **Scientia Plena**, v. 7, n. 10, p. 1-6, 2011.

CARRERO, G. C. **Viabilidade econômica da pecuária semi-intensiva no sul do Amazonas**: uma oportunidade para reduzir o avanço do desmatamento. IDESAM, 2014, 48p.

CHAVES, T. A.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, É. S.; CARVALHO, J. O. A. C.; BRAGA, A. R. S. GUIMARÃES, R. F. Mapa de erodibilidade de solos da bacia do rio Jardim - DF. **Espaço & Geografia**, v. 13, n. 2, p. 253-276, 2010.

CORRÊA, E. A.; MORAES, I. C.; PINTO, S. A. F. Estimativa de erodibilidade e tolerância de perdas de solo na região do centro leste paulista. **Geociências**, v. 34, n. 4, p. 848-860, 2015.

DEMARCHI, J. C.; ZIMBACK, C. R. L. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas. **Revista Energia na Agricultura**. v. 29, n. 2, p. 102-114, 2014. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2014v29n2p102-114>

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990. 114p.

DUARTE, M. L.; LOCATELLI, M.; SILVA FILHO, E. P.; SILVA, T. A. Análise do uso do solo em uma área de bacia hidrográfica localizado na Amazônia central... In: CERQUEIRA *et al.*

Transformação espacial: construção do espaço geográfico. 1. ed. Curitiba, PR: CRV, 2018. p. 135-155. DOI: <https://doi.org/10.24824/978854441895.6>

DUARTE, M. L.; SILVA FILHO, E. P. Estimativa da erosividade da chuva na bacia hidrográfica do rio Juma com base em dados do satélite TRMM. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 56, p. 45-60, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2019v29n56p45>

EMBRAPA (1997) **Manual de métodos de análise de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2ª ed. Rio de Janeiro, 212p.

EMBRAPA (2006). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro. 412p.

FIELD, A. **Descobrimo a estatística usando o SPSS**. ARTMED, 2009. 684p.

GALINDO, I. C.; MARGOLIS, E. Tolerância de perdas por erosão para solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 95-100, 1989.

GATO, L. C.; COSTA, H. S.; DUARTE, M. L. Erodibility of soils in southern Amazonas State for two Indirect Methods. In: 21st World Congress of Soil Science - Soil erosion modeling: Global Alliance. **Anais...** Rio de Janeiro, Brazil: SBCS. v. 2, 2018. p. 544, ISBN 9788586504273.

IBGE (2007). **Manual técnico de pedologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 323p.

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; SOUZA, A.; COSTA, N. R.; MONTANARI, R. Influência de atributos químicos na erodibilidade e tolerância de perda de solo na bacia hidrográfica do baixo São José dos Dourados. **Geociências**, v. 35, n. 1, p. 63-76, 2016.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; EID, N. J.; MARTINS, E. S.; KOIDE, S.; REATTO, A. Desenvolvimento e verificação de métodos indiretos para a estimativa de erodibilidade dos solos da bacia experimental do Alto rio Jardim - DF. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 2, p. 23-36, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v8i2.92>

MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2374>

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; CAROLINO de SÁ, M. A. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade

- de solos com horizonte B textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 21, p. 447-456, 1997. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831997000300014>
- MATA, C. L.; JUNIOR, O. A. C.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; GUIMARAES, R. F. Avaliação multitemporal da susceptibilidade de erosão na bacia do rio Urucuia (MG) por meio da Equação Universal de Perda de Solos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 2, p. 57-71, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v8i2.94>
- MORAES, R. C. S.; SALES, M. C. L. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí - Brasil, com uso de Sistema de Informações Geográficas. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27nesp1p84>
- RUTHES, J. M.; TOMAZONI, J. C.; GUIMARAES, E.; GOMES, T. C. Propriedades do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Catorze que Intensificam a Erosão Laminar. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 1, p. 160-169, 2012.
- SANTOS, F. A.; AQUINO, C. M. S. Mapeamento e análise da fragilidade pedológica das unidades geoambientais, em Castelo do Piauí e Juazeiro do Piauí, Nordeste, Brasil. **ACTA Geográfica**, Ed. Esp. V CBEAGT, 2016, p. 15-26. DOI: <http://dx.doi.org/10.5654/acta.v0i0.3743>
- SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; JUNIOR, J. M.; FRANÇA, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 37, n. 4. p. 825-836, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000400001>
- SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo. **Geociências**, v. 24, n. 1, p. 33-41, 2005.
- SILVA, G. M. O.; SILVA, F. F.; SANTOS, T. E. M. Caracterização da permeabilidade do solo na Bacia Experimental do Jatobá no semiárido Pernambucano visionando o manejo sustentável. In: III Reunião Nordestina de Ciência do Solo. **Anais...** Aracaju (SE), p. 1-4, 2016. ISBN: 978-85-5722-017-1
- SILVA, L. F. S.; MARINHO, M. A.; ROCCO, E. O.; WALTER, M. K. C.; BOSCHI, R. S. Métodos indiretos de estimativa de erodibilidade de um latossolo vermelho da região de Campinas, SP. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**. v. 3, n. 1, p. 51-58, 2016.
- SILVA, T. A.; DUARTE, M. L. COSTA, H. S. Erodibility of a Yellow Latosol (LA) under pasture and SAF in the southern region of Amazonas, Brazil by two Indirect Methods. In: 21st World Congress of Soil Science - Soil erosion modeling: Global Alliance. **Anais...** Rio de Janeiro, Brazil: SBCS. v. 2, 2018. p. 544, ISBN 9788586504273.
- SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; OLIVEIRA, R. A.; SABONARO, D. Z.; ROSA, A. H. Análise da suscetibilidade do solo e processos erosivos do Parque Natural Municipal Corredores de Biodiversidade (PNMCBIO) de Sorocaba (SP). **Revista Ra'e Ga**, v. 44, p. 169 -180, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v44i0.48838>
- U.S. Geological Survey (USGS). Earth Explorer. SRTM Imagery database available online. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>, Acessado em 14 maio de 2018.
- VIEL, J. A.; ROSA, K. K.; HOFF, R. Estudo da erosão superficial do solo por meio de SIG na região da denominação de origem Vale dos Vinhedos (Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 18, n. 3, p. 21-533, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i3.1197>
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, DC: USDA, 1978. (Agriculture handbook, 537).
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Commun. Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>