



ANÁLISE MULTIVARIADA APLICADA À AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À EROÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO SÃO DOMINGOS, SANTA CRUZ DO RIO PARDO - SP

Julio Cesar Demarchi¹

Maria Cristina Perusi²

Edinéia Aparecida dos Santos Galvanin³

Edson Luís Piroli⁴

RESUMO

A degradação do solo por erosão é um fenômeno complexo provocado por fatores naturais e intensificado pela ação humana. Para que se possa atuar no controle ou prevenção da erosão em escala de bacia hidrográfica, é necessário determinar sua suscetibilidade ao processo. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo identificar e analisar os padrões de suscetibilidade à erosão da bacia hidrográfica do Ribeirão São Domingos, localizada em Santa Cruz do Rio Pardo/SP, a partir de variáveis ambientais e antrópicas e análise de cluster. Utilizou-se a distância euclidiana como medida de dissimilaridade e o método de agrupamento pareado igualmente ponderado por médias aritméticas para agrupamento dos setenta e cinco pontos de amostragem do levantamento de solos da área de estudo. A análise foi realizada no pacote Vegan do software RStudio. As nove variáveis utilizadas foram: classes de solo, gradiente textural da fração argila, grupo hidrológico do solo, declividade do terreno, formação geológica, uso da terra e textura, matéria orgânica e densidade do solo do horizonte superficial. Com distância de corte de 14, os pontos de amostragem foram agrupados em oito clusters, que foram ordenados quanto à suscetibilidade à erosão a partir da análise e comparação das características das variáveis de cada cluster, da menor para a maior suscetibilidade, em: 5, 6, 2, 4, 3, 7, 1 e 8. O coeficiente de correlação cofenética entre os elementos da matriz de dissimilaridade e os derivados do dendrograma foi de 0,75, que indicou boa representação dos dados pelo dendrograma.

Palavras-chave: Análise de cluster, Degradação do solo, Uso da terra, Geomorfologia aplicada, Planejamento conservacionista.

ABSTRACT

Soil degradation by erosion is a complex phenomenon caused by natural factors and intensified by the human action. In order to act in the control or prevention of erosion at a watershed scale, it is necessary to determine its susceptibility to the process. In this context, this study aimed to identify and analyze the patterns of susceptibility to erosion of the Ribeirão São Domingos watershed, located in the municipality of Santa Cruz do Rio Pardo, in São Paulo State, by means of environmental and anthropic variables and cluster analysis. The Euclidean distance was used

¹ Doutor em Geografia pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP – Câmpus de Presidente Prudente; Servidor administrativo da UNESP – Câmpus de Ourinhos, julio.demarchi@unesp.br;

² Professora Assistente Doutora da UNESP – Câmpus de Ourinhos, cristina.perusi@unesp.br;

³ Professora Assistente Doutora da UNESP – Câmpus de Ourinhos, edineia.galvanin@unesp.br;

⁴ Professor Associado da UNESP – Câmpus de Ourinhos, edson.piroli@unesp.br.



as a dissimilarity measure and the Unweighted Pair-Group Method using Arithmetic Averages was used to cluster the seventy-five sampling points of the soil survey carried out in the study area. The analysis was performed in the Vegan package of the RStudio software. The nine variables used were: soil classes, clay fraction textural gradient, soil hydrological group, terrain slope, geological formation, land use and texture, organic matter and bulk density of the surface horizon. With a cutoff distance of 14, the sampling points were grouped into eight clusters, which were ordered according to their susceptibility to erosion based on the analysis and comparison of the characteristics of the variables in each cluster, from the lowest to the highest susceptibility, in: 5, 6, 2, 4, 3, 7, 1 e 8. The cophenetic correlation coefficient between the elements of the dissimilarity matrix and those derived from the dendrogram was 0.75, which indicated good data representation by the dendrogram.

Keywords: Cluster analysis, Soil degradation, Land use, Applied Geomorphology, Conservation planning.

INTRODUÇÃO

Os solos são bens ambientais extremamente complexos na sua composição, dinâmicos por definição e vivos, ou deveriam ser, por excelência. Desta forma, para que possam dar conta das suas múltiplas funções ecológicas, devem funcionar na sua capacidade plena, visando sustentar a produtividade biológica, promover a saúde das plantas, dos animais e das pessoas (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; MENDONÇA, 2010; PRIMAVESI, 2016).

Dados divulgados no Relatório do Estado dos Recursos Solos no Mundo mostram que aproximadamente 33% dos solos do planeta estão degradados (FAO, 2019). A degradação das terras diz respeito à redução dos potenciais recursos, renováveis ou não, por uma combinação de processos naturais e/ou antrópicos (ARAÚJO; ALMEIDA; GUERRA, 2010).

A erosão, forma expressiva de degradação dos solos, é um dos processos geomorfológicos de maior distribuição geográfica pelo planeta, em especial aquela provocada pelo escoamento superficial e de subsuperfície, que resulta na retirada das camadas superficiais (GUERRA, 2014). Segundo o referido autor, isso significa a “deterioração das suas propriedades físicas e químicas, de maneira que o solo deixa de ser produtivo” (GUERRA, 2014, p. 16), o que compromete a geração de renda, a segurança alimentar e nutricional de agricultores familiares. Acrescenta-se a essas consequências o assoreamento e contaminação dos cursos d’água (COGO; LEVIEN; SCHWARZ, 2003), que podem comprometer a geração de energia hidroelétrica,



dizimar algumas espécies aquáticas, alterar características de sedimentos como areia e argila, usadas na construção civil, entre outros impactos socioeconômicos negativos.

De acordo com Lal (2001), a erosão do solo é controlada pela interação entre os fatores clima, características do solo, relevo e cobertura da terra, que determinam sua suscetibilidade ao processo. As taxas reais de erosão, entretanto, são influenciadas por causas sociais, econômicas e políticas, que direcionam o tipo de uso e de manejo do solo. Caldas, Silva e Santos (2019) utilizaram unidades geomorfológicas, erodibilidade do solo, erosividade da chuva, declividade do terreno, uso e ocupação das terras na determinação da suscetibilidade à erosão dos solos da bacia Lagos – São João, no estado do Rio de Janeiro. Marçal e Guerra (2003) realizaram uma análise do meio físico e da ocupação antrópica do alto curso da bacia do Rio Açailândia, no Maranhão, e utilizaram os fatores relevo, tipos de solo e as transformações no uso da terra para elaborar o mapa síntese das áreas suscetíveis à erosão.

A predição das taxas de erosão aos processos erosivos requer o uso de modelos empíricos, de base física, ou de análises estatísticas que agreguem as variáveis envolvidas no processo. Nesse sentido, a análise de agrupamento, ou *clustering*, utilizada neste estudo, consiste num conjunto de técnicas computacionais que têm a finalidade de separar objetos em grupos baseada em suas características, de forma a agrupar objetos similares de acordo com algum critério preestabelecido. É uma ferramenta útil para análise de dados em diversas situações, podendo ser utilizada na redução da dimensão de um conjunto de dados à informação do centro do seu conjunto ou, por ser uma técnica de aprendizado não-supervisionado, pode extrair características escondidas dos dados e desenvolver hipóteses sobre a sua natureza (LINDEN, 2009).

Entre os estudos que utilizaram análise de cluster no agrupamento de variáveis ambientais e/ou relativas à erosão, destacam-se os realizados por Ribeiro et al. (2014), que classificaram as sub-bacias do Rio Diamantino/MT conforme a similaridade de ocorrência das diferentes classes de uso da terra ao longo de três décadas; por Bueno et al. (2011), que agruparam 59 pontos amostragem de solos de um pivô central no município de Carmo do Rio Claro/MG a partir dos fatores da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) e dos parâmetros Potencial Natural de Erosão, Perda de solo estimada pela EUPS e Expectativa de erosão e detectaram padrões erosivos distintos em Latossolos e Argissolos Vermelhos; e por Freitas et al. (2014), que reuniram em clusters áreas de Latossolo Vermelho distrófico de Santa Ernestina - SP ocupados com mata



nativa, reflorestamento e cana-de-açúcar baseados nos atributos químicos do solo, e concluíram que os manejos com reflorestamento e cana-de-açúcar se diferenciam do uso por mata nativa, sendo os atributos da área de reflorestamento intermediários entre os dois outros manejos por constituir área de recuperação recente.

O município de Santa Cruz do Rio Pardo - SP passou pelo ciclo do café entre o final do século XIX e a primeira metade do século XX. Atualmente, possui uma agropecuária moderna, direcionada às *commodities* agrícolas milho e soja, à cana-de-açúcar e à criação de gado. Embora as práticas de conservação do solo sejam realidade, os processos erosivos não estão controlados (DEMARCHI, 2019). Nesse contexto, este trabalho tem o objetivo de identificar e analisar padrões de suscetibilidade dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão São Domingos à degradação por erosão hídrica, a partir de variáveis ambientais e antrópicas agrupadas por análise de cluster.

O estudo está fundamentado no conceito de ambiente, uma das dimensões da produção do espaço geográfico que considera “a relação natureza/sociedade, uma conjunção complexa e conflituosa, que resulta do longo processo de socialização da natureza pelo homem” (SUERTEGARAY, 2006, p. 97). Em outras palavras, a mediação sociedade-natureza feita pelo trabalho humano na busca pela transformação dos ciclos longos da natureza (tempo que escoia) em ciclos curtos (tempo que faz), adequados ao tempo de reprodução do capital, promove a transfiguração da natureza, transformando-a em segunda natureza que se esgota, finda-se, torna-se ambiente, expressão da natureza produzida sem, contudo, eliminar sua essência natural (SUERTEGARAY, 2021).

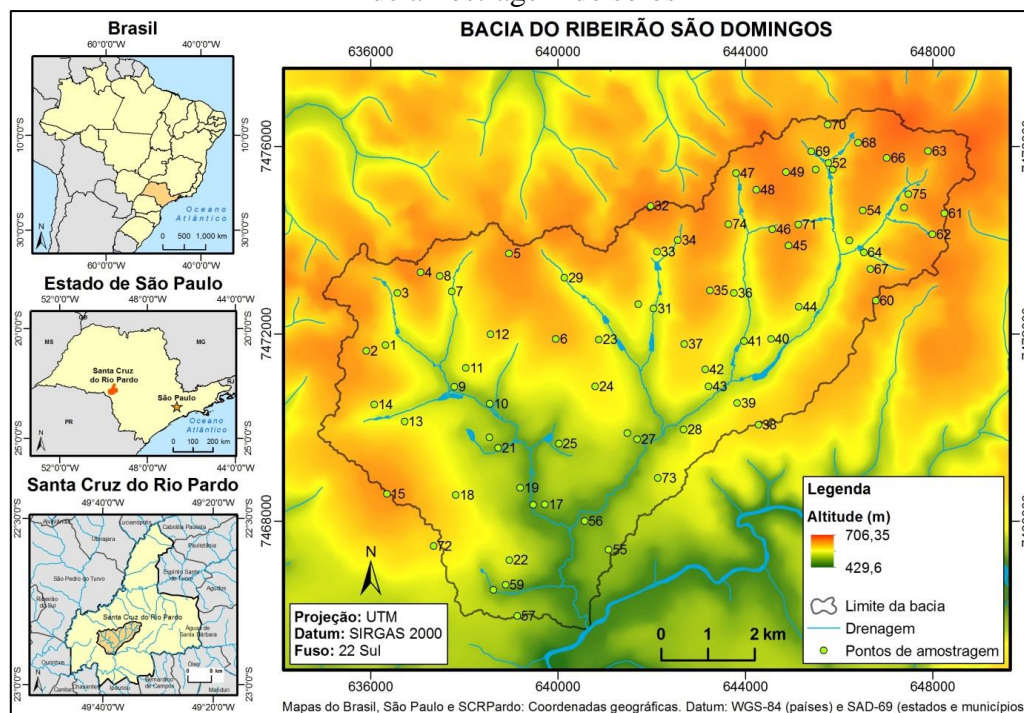
Nesse contexto, o conceito de ambiente pode “favorecer uma análise ambiental que não desvincula impactos e/ou degradação das relações sociais, da economia e, sobretudo, do poder” (SUERTEGARAY, 2021, p. 87).

METODOLOGIA

A bacia hidrográfica do Ribeirão São Domingos está localizada no centro do município de Santa Cruz do Rio Pardo, centro-oeste do estado de São Paulo. Com área de 78,77 km², é delimitada pelas coordenadas geográficas 22°48'35.25”S a 22°54'34.91”S e 49°32'47.45”W a 49°40'57.29”W. A localização da área de estudo,

assim como os pontos de amostragem de solos utilizados neste estudo, é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão São Domingos e dos pontos de amostragem de solos



Elaboração: Dos autores (2021).

A área de estudo encontra-se na Bacia Sedimentar do Paraná, Formação Serra Geral, Grupo São Bento, caracterizada por rochas vulcânicas toleíticas em derrames basálticos, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos finos a médios, manifestados entre 147 e 119 milhões de anos; Formação Adamantina, Grupo Bauru, em que se destacam os bancos de arenitos de granulação fina a muito fina, alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, de deposição flúvio-lacustre no Cretáceo Superior; e Formação Marília, também do Grupo Bauru, composta de arenitos grosseiros a conglomeráticos com nódulos e/ou cimentação carbonática, “em regimes torrenciais característicos de leques aluviais e com a deposição de pavimentos detríticos, durante a instalação progressiva do clima semiárido” (IPT, 1981, p. 78).

De acordo com Ross e Moroz (1997), o referido município está localizado na unidade morfoestrutural Bacia Sedimentar do Paraná, na unidade morfoescultural Planalto Ocidental Paulista e na unidade geomorfológica Planalto Centro-Occidental. A altitude e a declividade médias da bacia do Ribeirão São Domingos são de 565 metros e 6,85 %, respectivamente (DEMARCHI, 2019).



O clima de Santa Cruz do Rio Pardo é do tipo Am, tropical chuvoso com inverno seco, segundo a classificação de Köppen-Geiger (DEMARCHI, 2019). De acordo com Miranda et al. (2005), a precipitação média anual é de 1.475,3 mm, concentrados entre outubro e março. A temperatura média anual é de 22,9°C, sendo a média dos meses mais quentes, dezembro e janeiro, de 26°C, e a do mês mais frio de 18°C. A erosividade da chuva média anual é de 7.193,31 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, com concentração de 83,49 % das chuvas erosivas na estação chuvosa (DEMARCHI, 2019). A vegetação do município é classificada pelo IBGE (2004) como floresta estacional semidecidual, conhecida como mata atlântica do interior, derivação “vegetação secundária e atividades agrárias”. Atualmente, restam na área de estudo 8,45 % da superfície da bacia hidrográfica, em vegetação arbórea e de áreas úmidas (DEMARCHI, 2019).

Para a análise de cluster, foram utilizadas variáveis ambientais e antrópicas de 75 pontos de amostragem do levantamento semidetalhado de solos realizado por Demarchi (2019) na área de estudo. Os procedimentos metodológicos de obtenção das referidas variáveis foram:

1) Classes de solo: o levantamento de solos supracitado foi realizado com o auxílio da fotopedologia para a correlação solo-paisagem e planejamento da amostragem; tradagens nas profundidades 0 – 0,2 m e 0,6 – 0,8 m; descrição geral dos pontos de amostragem; descrição morfológica; análises físicas e químicas; classificação dos solos até o 3º nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013). Os limites das unidades de mapeamento foram ajustados por fotointerpretação e checagem de campo;

2) Textura e classe textural do horizonte superficial: método da pipeta preconizado pelo IAC (CAMARGO et al., 1986) e Embrapa (2013), respectivamente;

3) Gradiente textural da fração argila: razão entre o conteúdo de argila (g.kg⁻¹) dos horizontes subsuperficiais (0,6 – 0,8 m) e superficiais (0 – 0,2 m);

4) Conteúdo de matéria orgânica do horizonte superficial (g.dm⁻³): realizada segundo a metodologia de Rajj et al. (2001);

5) Densidade do solo do horizonte superficial (g.cm⁻³): método do torrão (EMBRAPA, 1997) com três repetições, com exceção de três amostras que não formaram agregados, cuja Ds foi determinada pelo método do balão volumétrico (KIEHL, 1979);



6) Grupo hidrológico do solo (A a D): definido a partir dos atributos do solo: textura, gradiente textural, atividade da fração argila, e das características hidrológicas do perfil, tais como a profundidade, a permeabilidade e a drenagem, de acordo com Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005);

7) Declividade do terreno (%): obtida no SIG ArcGIS 10.3.1 a partir do modelo numérico do terreno interpolado pela ferramenta “*Topo to raster*”, com as curvas de nível de equidistância 20 metros, pontos cotados de altitude e rede de drenagem da área de estudo extraídas da carta topográfica do IBGE (1973), na escala 1:50.000;

8) Formação geológica (Serra Geral, Adamantina e Marília) obtida pelo mapa geológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981). Como a escala do mapa é 1:500.000, menor que a escala de trabalho da pesquisa, a formação geológica de alguns pontos de amostragem localizados na transição entre elas foi inferida a partir da textura das respectivas amostras de terra;

9) Uso da terra: os usos existentes na data da amostragem (1º semestre de 2016) foram identificados e classificados até o nível II (subclasse) do sistema de classificação da cobertura e do uso da terra do IBGE (2013) em área urbanizada, área florestal, cultura temporária, cultura permanente, pastagem e silvicultura. Foi acrescentada a classe área úmida, para identificar a vegetação arbustiva e/ou arbórea desses ambientes.

A análise de cluster foi realizada no pacote “Vegan” (OKSANEN et al., 2020) do software RStudio versão 1.2.5033 (RSTUDIO TEAM, 2019). Utilizou-se a distância euclidiana (Equação 1) como medida de dissimilaridade, a partir da qual se obteve a matriz de similaridade entre os pares de dados.

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (Y_{ik} - Y_{jk})^2} \quad (1)$$

Em que: d_{ij} é a distância do elemento i ao j , com $i, j = 1, 2, \dots, n$; Y_{ik} e Y_{jk} são os valores observados da variável k , $k = 1, 2, \dots, p$, para os elementos i e j .

Para o agrupamento dos dados em clusters, utilizou-se o método hierárquico aglomerativo de ligação, do tipo UPGMA (*Unweighted Pair-Group Method using Arithmetic Averages*), ou método de agrupamento pareado igualmente ponderado por médias aritméticas, que liga os grupos e/ou elementos pela média de similaridade entre



os seus elementos e recalcula-a a cada novo agrupamento, atribuindo pesos iguais aos elementos agrupados e não agrupados no cálculo dos valores médios de similaridade (LANDIM, 2011).

Os resultados foram apresentados por meio de dendrograma, que apresenta a distância de ligação entre os elementos e clusters. A distância de ligação de corte foi estabelecida com base no conhecimento prévio geral das amostras e variáveis, e de forma que o número de grupos não fosse muito pequeno, reunindo elementos dissimilares, nem muito grande, dificultando a diferenciação entre eles a partir de seus atributos. Calculou-se também o coeficiente de correlação cofenética (Equação 2), proposto por Sokal e Rohlf (1962), que mede a relação entre os valores da matriz inicial de similaridade e os derivados do dendrograma (LANDIM, 2011).

$$r_{\text{cof}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (c_{ij} - \bar{c})(s_{ij} - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (c_{ij} - \bar{c})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (s_{ij} - \bar{s})^2}} \quad (2)$$

Em que: c_{ij} é o valor de similaridade entre os indivíduos i e j , obtidos a partir da matriz cofenética; s_{ij} é o valor de similaridade entre os indivíduos i e j , obtidos a partir da matriz de similaridade; e \bar{c} e \bar{s} são dados pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

$$\bar{c} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} \quad , \quad \bar{s} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n s_{ij} \quad (3) \quad (4)$$

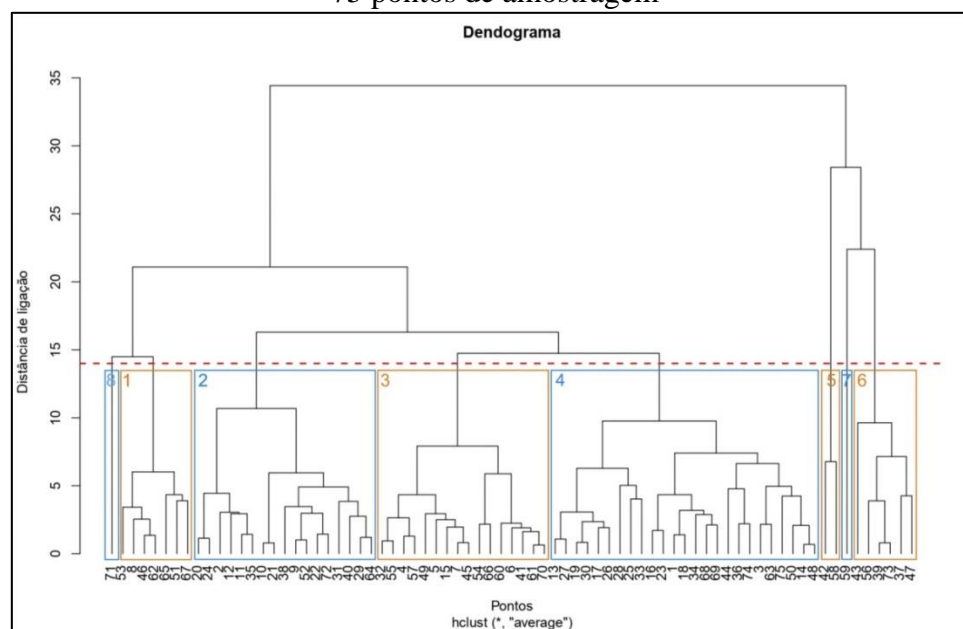
Para verificar se a correlação cofenética entre a matriz de similaridade inicial e a obtida do dendrograma dos dados amostrais existe de fato na população, realizou-se o teste razão t ao nível de significância de 95%, com a hipótese nula de que $r_{\text{cof}} = 0$ e a hipótese alternativa de que $r_{\text{cof}} \neq 0$, conforme procedimento descrito por Levin (1987).

Na interpretação dos resultados, buscou-se identificar as variáveis responsáveis pela diferenciação dos clusters, compreendê-las em conjunto e ordenar os clusters quanto à suscetibilidade à erosão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de agrupamentos produziu, com distância euclidiana de ligação entre os elementos de 14, oito clusters de dados dos pontos amostrais do levantamento de solos executado na área de estudo, conforme o dendrograma apresentado na Figura 2. Dois clusters tiveram apenas um ponto de amostragem cada, que se diferenciaram dos demais clusters por apresentarem valores discrepantes de um ou mais atributos naturais ou antrópicos.

Figura 2 – Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico utilizando 9 variáveis e 75 pontos de amostragem



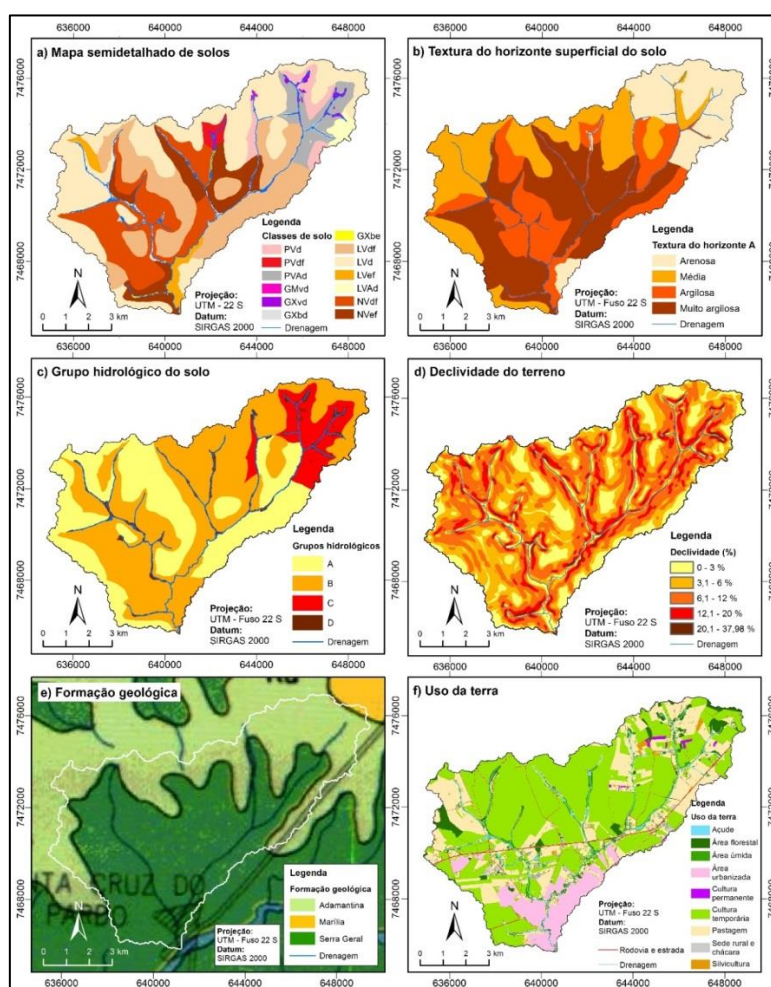
No processo de seleção das variáveis para a análise de cluster, procurou-se reunir elementos naturais, sobre os quais a ação antrópica tem influência reduzida ou nula: declividade, gradiente textural da fração argila, textura, classe de solo, grupo hidrológico e formação geológica, e elementos alteráveis por essa ação durante o manejo do solo, tais como o conteúdo de matéria orgânica, a densidade do solo e, sobretudo, o uso da terra. Todos eles exercem influência direta ou indireta na suscetibilidade dos solos aos processos erosivos. A Tabela 1 apresenta os valores médios das variáveis numéricas de cada grupo produzido pela análise de cluster.

Tabela 1 - Número de amostras e valores médios das variáveis usada para a análise de cluster

Nº do cluster	Nº de amostras	Gradiente textural da fração argila	Matéria orgânica (g.dm ⁻³)	Densidade do solo (g.cm ⁻³)	Declividade (%)
1	7	1,76	9,2	1,67	13,42
2	17	1,12	23,95	1,56	2,56
3	16	1,44	12,44	1,59	1,98
4	25	1,43	17,64	1,59	9,43
5	2	1,04	52,45	1,40	2,76
6	6	1,12	34,10	1,49	4,72
7	1	1,10	39,1	1,87	18,61
8	1	3,31	8,1	1,55	22,68

As variáveis derivadas do levantamento de solos, do relevo, da geologia local e do uso da terra da área de estudo são especializadas na Figura 3.

Figura 3 – Algumas variáveis utilizadas na análise de cluster



Fonte: IPT (1981); Demarchi (2019). Organização: Dos autores (2021).

As distribuições dos elementos das variáveis categóricas entre os grupos resultantes da análise de cluster são apresentadas nas Figuras 4 a 8.

Figura 4 – Distribuição das classes de solo nos clusters

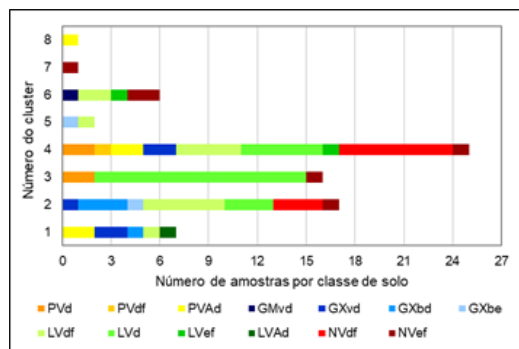


Figura 6 – Distribuição dos grupos hidrológicos do solo nos clusters

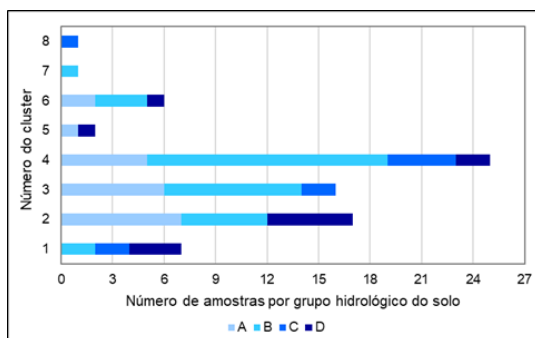
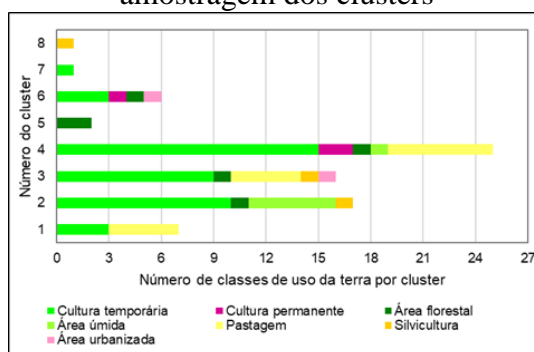


Figura 8 – Distribuição das classes de uso da terra correspondentes aos pontos de amostragem dos clusters



Os resumos estatísticos das variáveis quantitativas (Tabela 1) e os gráficos de barras de frequência das variáveis categóricas dos elementos agrupados nos diferentes clusters (Figuras 4 a 8) mostram que uma ou mais variáveis foram responsáveis pela formação dos diferentes clusters, e que as variáveis categóricas, sobretudo a “classe de solo” e o “grupo hidrológico”, tiveram pouca ou nenhuma influência sobre a sua

Figura 5 – Distribuição das classes texturais do horizonte superficial do solo nos clusters

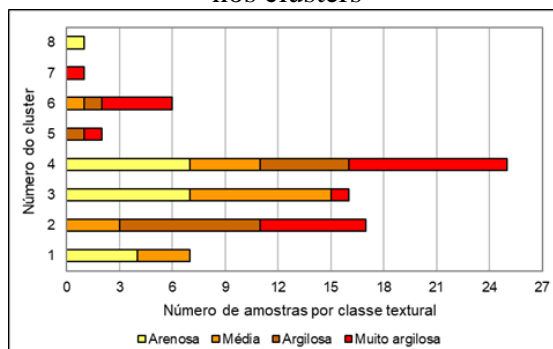
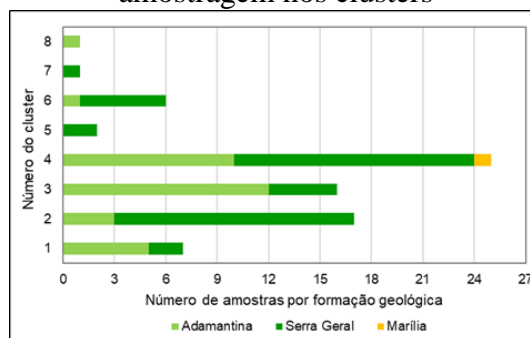


Figura 7 – Distribuição das formações geológicas correspondentes aos pontos de amostragem nos clusters





constituição, ou seja, não foram responsáveis, unicamente, pela formação de um cluster. As variáveis “textura do horizonte A” e “formação geológica” apresentaram características predominantes em alguns clusters, como os solos de textura argilosa e muito argilosa e a Formação geológica Serra Geral nos clusters 2 e 6, e os solos de textura arenosa e média da Formação Adamantina nos clusters 1 e 3.

As variáveis responsáveis pela formação dos clusters e suas principais características relacionadas à suscetibilidade à erosão são apresentadas a seguir. O cluster 1 apresenta os menores valores de matéria orgânica (média de $9,2 \text{ g.dm}^{-3}$), superiores apenas à única amostra do cluster 8; declividade média de 13,42 % (forte ondulado) e gradiente textural médio da fração argila de 1,76, superior à maioria dos demais clusters, embora varie de 0,57 a 3,31. Essas características, somadas à textura arenosa e média oriunda dos arenitos da Formação Adamantina, conferem aos solos elevada suscetibilidade à erosão.

Esse grupo possui algumas características semelhantes ao cluster 8, que possui um único elemento e que se une a ele à distância euclidiana inferior a 15, mas se individualiza por apresentar o maior gradiente textural da fração argila (3,31), a maior declividade do terreno (22,68 %) e o menor conteúdo de matéria orgânica ($8,1 \text{ g.dm}^{-3}$) entre todos os grupos. É um Argissolo de textura arenosa/média, ocupado por silvicultura (eucalipto), de grupo hidrológico C e altamente suscetível à erosão.

O conteúdo de matéria orgânica é um atributo altamente afetado pelo manejo e, nos pontos amostrais pertencentes aos clusters 1 e 8, constitui um dos fatores que propiciam o aumento da suscetibilidade à erosão. A matéria orgânica confere aos solos o aumento da qualidade física e química, promovendo sua agregação, aeração, redução da densidade do solo, aumento das taxas de infiltração e retenção de água, redução da toxidez de elementos tóxicos às plantas, e aumento da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) dos solos tropicais e subtropicais e da disponibilidade de energia e nutrientes para a biota do solo (SOUZA et al., 2018).

A suscetibilidade à erosão do cluster 8 é potencializada pelo elevado gradiente textural entre os horizontes superficial e subsuperficial, que consiste no aumento considerável do teor de argila entre os horizontes A ou E e o horizonte B, geralmente o Bt. Essa sobreposição entre um horizonte mais arenoso e outro mais argiloso provoca a redução, às vezes brusca, da condutividade hidráulica do solo, que favorece a saturação do horizonte superficial e o aumento do escoamento superficial durante as chuvas,



diminuindo a coesão entre as partículas e facilitando seu arraste pela enxurrada. Essa condição pode ocorrer mesmo em área de relevo suave ondulado (RIBEIRO; OLIVEIRA; ARAÚJO FILHO, 2015).

O cluster 2 é caracterizado por solos de gradiente textural da fração argila baixo, com média de 1,12, e conteúdo de matéria orgânica intermediário, com valor médio de $23,95 \text{ g.dm}^{-3}$. Reúne diferentes classes de solo, com predomínio dos Latossolos, Gleissolos e Nitossolos, a maioria com textura argilosa e muito argilosa oriundos do basalto da Formação Serra Geral. As amostras 2, 11, 12, 20, 24 e 35 se unem ao restante das amostras do cluster à distância euclidiana superior a 10 por apresentarem menor teor de matéria orgânica, inferior a 21 g.dm^{-3} . Os pontos de amostragem são ocupados, em sua maioria, por culturas temporárias e por vegetação de áreas úmidas (fundos de vale) e florestais, estando situados em terrenos planos, de declividade média 2,56 %. Nos topos e relevos mais aplanados predominam os processos de infiltração da água pluvial, o que reduz a suscetibilidade à erosão, ao contrário dos terrenos mais inclinados, em que prevalece o escoamento superficial e/ou subsuperficial das águas (WEILL; PIRES NETO, 2007).

O cluster 5, constituído de dois elementos, apresenta características que os aproximam do cluster 2, como o gradiente textural, a declividade, a densidade do solo, a classe textural e a formação geológica, mas se distancia dele pelo conteúdo de matéria orgânica, com o valor médio de $52,45 \text{ g.dm}^{-3}$, que confere aos solos maiores agregação, retenção de nutrientes e capacidade de infiltração e retenção de água. São também os menos compactados, por apresentarem D_s média de $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, em consequência do uso da terra por vegetação florestal.

O cluster 6 é formado por seis elementos e se diferencia dos clusters anteriores pelo conteúdo de matéria orgânica, de valor médio $34,1 \text{ g.dm}^{-3}$, mas seus solos são de textura argilosa e muito argilosa, oriundos do basalto, com baixo potencial de produção de escoamento superficial (grupos hidrológicos A e B) e em declives que variam de 0,39 a 8,97 %. A exceção ocorre com a amostra 47, um Gleissolo Melânico de textura média, oriundo da Formação Adamantina e de grupo hidrológico D, unido ao cluster 6 unicamente em função da semelhança no teor de matéria orgânica. Esta parece ser a variável que distancia os clusters 5 e 6 do cluster 2, sendo os últimos clusters a se agrupar aos demais (Figura 2). Entretanto, os três clusters apresentam características que lhes conferem baixa suscetibilidade à erosão, apesar de que o uso predominante



com culturas anuais pode potencializar os processos erosivos, a depender do manejo empregado.

O cluster 3 reúne 16 elementos, que apresentam em geral suscetibilidade média à erosão. Os pontos de amostragem estão situados, em sua maioria, sobre os divisores de água e interflúvios da bacia hidrográfica, em relevos planos a suave ondulados. Predominam os Latossolos Vermelhos Distróficos, de baixo potencial de geração de escoamento superficial, e solos de grupos hidrológicos A e B. Entretanto, os horizontes superficiais possuem textura arenosa ou média oriundos da Formação Adamantina, gradiente textural da fração argila variável de 0,84 a 2,36, e valor médio de 1,44, e teor de matéria orgânica médio de $12,44 \text{ g.dm}^{-3}$, inferior ao dos clusters 2, 5 e 6. São ocupados predominantemente por culturas temporárias e pastagem. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2005), os solos de textura mais grosseira, como os agrupados no cluster 3, possuem espaços porosos grandes e são capazes de absorver chuvas de pequena intensidade, mas a menor força de coesão entre suas partículas resultante da baixa proporção de partículas argilosas e dos espaços porosos vazios faz com que suas partículas sejam desagregadas e facilmente transportadas pelas enxurradas, a despeito do maior peso delas. Os solos argilosos, por sua vez, produzem maior volume de escoamento superficial, mas a maior força de coesão de suas partículas faz a resistência à erosão aumentar.

O cluster 4 reúne 25 elementos e agrupa solos de nove classes distintas, de todas as classes de textura, formações geológicas, grupos hidrológicos (com predomínio do B e A) e gradiente textural de 0,69 a 2,78. As variáveis que parecem agrupá-los são a declividade, que varia de 5,82 a 15,12 %, com valor médio de 9,43 %, e o conteúdo de matéria orgânica, com valores no intervalo de 12 a $23,5 \text{ g.dm}^{-3}$ e média de $17,64 \text{ g.dm}^{-3}$, que se diferenciam dos demais clusters. A espacialização dos pontos de amostragem sobre o mapa de altitude (Figura 1) revela que a maioria deles está localizada nos terços médio e inferior das vertentes, em rampas de maior comprimento, o que aumenta a suscetibilidade à erosão. As culturas temporárias e pastagens predominam nos solos deste cluster, que apresenta menor homogeneidade na constituição dos fatores que os demais (Figuras 4 a 8).

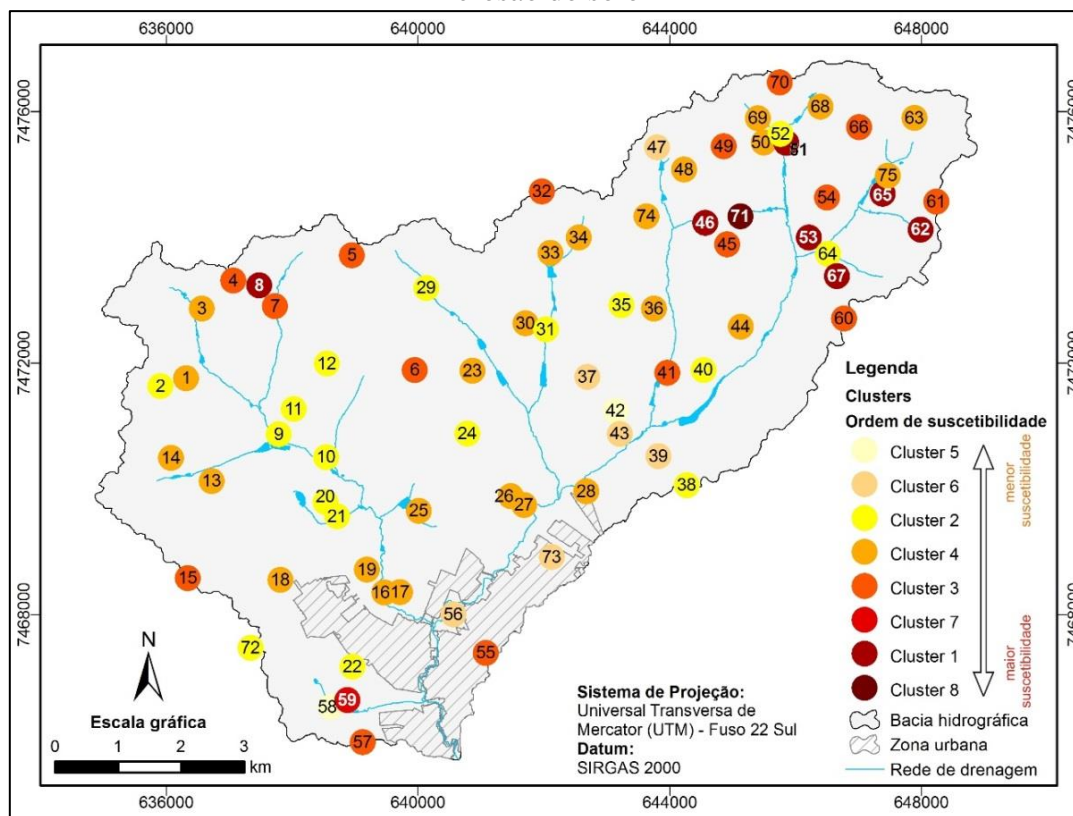
O cluster 7 é constituído apenas da amostra nº 59 e assemelha-se ao cluster 6 em algumas variáveis, mas apresenta tanto características que reduzem seu potencial erosivo, como o teor de matéria orgânica ($39,1 \text{ g.dm}^{-3}$) e o gradiente textural de 1,1,

quanto aspectos que o potencializam, como a densidade do solo de $1,87 \text{ g.cm}^{-3}$, que denota um quadro de compactação, e a declividade de 18,61 %. Os clusters 3, 4 e 7 apresentam suscetibilidade média à erosão.

O coeficiente de correlação cofenética entre os elementos da matriz de dissimilaridade e do dendrograma foi de 0,75, indicando uma boa representação dos dados e denotando que os dados do dendrograma não sofreram distorção significativa em relação à similaridade real. O teste razão t permitiu afirmar, com 95 % de confiança, que a correlação cofenética existe na população estudada, pois o valor t calculado, de 2,99, pertence à região crítica da distribuição t, cujo limite é 2,364 no nível de significância adotado, o que permite a rejeição da hipótese nula na qual $r_{\text{cof}} = 0$.

A constituição dos clusters a partir dos dados das variáveis que influenciam o processo erosivo permite, em uma primeira aproximação, dispô-los em ordem crescente de suscetibilidade à degradação por erosão, a saber: clusters 5, 6, 2, 4, 3, 7, 1 e 8. Os pontos de amostragem formadores dos oito clusters e sua ordem de suscetibilidade à erosão, indicada pela cor do ponto, estão espacializados na Figura 9.

Figura 9 – Pontos de amostragem formadores dos clusters e ordem de suscetibilidade à erosão do solo



Elaboração: Dos autores (2021).



A Figura 9 mostra a influência da textura do horizonte A e da formação geológica na conformação do grau de suscetibilidade dos clusters à erosão. Em geral, os solos de textura argilosa e muito argilosa provenientes dos basaltos apresentaram baixa ou média suscetibilidade à erosão, enquanto os de textura arenosa ou média, oriundos das Formações Adamantina e Marília, apresentaram média a alta suscetibilidade. Esse comportamento, entretanto, não foi linear, dado que alguns pontos de amostragem se agruparam a clusters representativos de outros atributos por similaridade com eles em uma única variável, como a amostra 41, um Nitossolo Vermelho Eutroférico de textura muito argilosa, gradiente textural inferior a 1, localizado em relevo plano e pertencente ao grupo hidrológico B, agrupado no cluster 3, de média suscetibilidade à erosão, devido ao baixo conteúdo de matéria orgânica.

A partir do conceito operacional de ambiente, pode-se compreender a produção do espaço geográfico da bacia hidrográfica do Ribeirão São Domingos e a ocorrência de processos erosivos, em diferentes intensidades, por meio do processo histórico de ocupação humana e transformação/socialização da natureza pelo trabalho. As diferentes formações das matas nativas reduziram em área, de 1962 a 2018, de 11,97 km² para 6,65 km², sem contar a retirada da cobertura vegetal original nos anos anteriores, o que expôs os solos aos processos erosivos. A título de comparação, as lavouras de cana-de-açúcar cresceram, nesse mesmo período, de 4,45 km² para 22,74 km², e a área urbana de 1,73 km² para 4,6 km² (DEMARCHI, 2019). Esses dados denotam o atual domínio do agronegócio e da urbanização, processo esse intensificado a partir da década de 1970 com a crise do café e a expulsão do trabalhador rural do campo, o que demonstra a importância da análise do espaço geográfico pelo conceito de ambiente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de cluster empreendida neste estudo reuniu os pontos de amostragem do levantamento de solos da bacia do Ribeirão São Domingos em oito clusters a partir de variáveis naturais e de variáveis alteráveis pela ação humana. Desta forma, pôde incorporar outros fatores, comumente utilizados de forma indireta ou não utilizados nos modelos convencionais de erosão, como o gradiente textural da fração argila, a densidade do solo, a textura do horizonte superficial, o conteúdo de matéria orgânica, o



grupo hidrológico do solo e a formação geológica. Parte desses fatores é utilizada na determinação da erodibilidade do solo nos modelos mais comuns.

Os clusters resultantes podem ser divididos em baixa suscetibilidade (clusters 5, 6 e 2), média (clusters 4, 3 e 7) e alta suscetibilidade à degradação por erosão (clusters 1 e 8). Esta abordagem alternativa pode contribuir para o planejamento do uso da terra com vistas à conservação do solo e/ou à recuperação das áreas degradadas ao extrair padrões nos dados não identificáveis nos modelos tradicionais de previsão de erosão.

Para melhor discriminar os grupos de solos quanto à suscetibilidade à erosão e aumentar a qualidade do agrupamento por meio da redução das distorções do dendrograma, outras variáveis podem ser incorporadas à análise, tais como as práticas conservacionistas existentes, a forma das vertentes, o comprimento de rampa, e mesmo outros atributos do solo relacionados à erodibilidade. Também, algumas variáveis categóricas podem ser convertidas em quantitativas, como o grupo hidrológico do solo, a textura do horizonte superficial e a porcentagem de cobertura vegetal, derivada do uso da terra. A realização prévia da Análise de Componentes Principais (ACP) pode contribuir para identificar as variáveis de maior importância na explicação da variabilidade dos dados e, assim, para a redução do número de variáveis na análise de cluster.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. S. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66-75, jul./set. 2007. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/6684>. Acesso em: 29 jun. 2021.
- ARAUJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 322 p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5.ed. São Paulo: Ícone, 2005. 355 p.
- BUENO, C. R. P.; ARRAES, C. L.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E.; CAMPOS, S. Análise multivariada na determinação do risco de erosão em solos sob irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 23-35, jan./mar. 2010. Disponível em: <https://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4>. Acesso em: 22 jun. 2021.
- CALDAS, V. I. S. P.; SILVA, A. S.; SANTOS, J. P. C. Suscetibilidade a Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica Lagos – São João, no Estado do Rio de Janeiro – Brasil, a partir do Método AHP e Análise Multicritério. **Revista Brasileira de Geografia Física**,



Recife, v. 12, n. 4, p. 1415-1430, 2019. Disponível em:
<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/239000/33830>. Acesso em: 23 set. 2021.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. Análises físicas. *In:* _____. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solo do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. p. 55-61. (Boletim técnico, 106). Disponível em: http://lab.iac.sp.gov.br/files/boletim_106-an.pdf. Acesso em: 15 jul. 2016.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 743-753, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/JCtmNdm5N7LhFn3BfmqPbHG/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 02 jul. 2021.

DEMARCHI, J. C. **Modelagem das transformações no uso da terra, de processos erosivos e de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão São Domingos, município de Santa Cruz do Rio Pardo - SP**. 2019. 536 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed.rev.atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos; 1)

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

FAO. **Diretrizes voluntárias para a gestão sustentável dos solos**. Roma: FAO, 2019. 125 p. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i6874pt/I6874PT.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; SOUZA JÚNIOR, P. R.; CAMPOS, M. C. C. Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 8, n. 2, p. 155-164, maio/ago. 2014. Disponível em: <https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/1684/1319>. Acesso em: 23 jun. 2021.

GUERRA, A. J. T. Degradação dos solos - conceitos e temas. *In:* GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. (Org.). **Degradação dos solos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014. cap. 1, p. 15-40.

IBGE. **Carta topográfica**: folha Santa Cruz do Rio Pardo – SF-22-Z-A-VI-4. Serviço Gráfico do IBGE, 1973. Escala 1:50.000.

IBGE. **Manual técnico de uso da terra**. 3.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171 p. (Manuais Técnicos em Geociências, 7).

IBGE. **Mapa de vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Escala: 1:5.000.000.

IPT (São Paulo). **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala: 1:500.000.



KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 12, n. 6, p. 519-539, Dec. 2001. Disponível em:
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.472/pdf>. Acesso em: 21 jun. 2021.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 208 p.

LEVIN, J. **Estatística aplicada a Ciências Humanas**. 2.ed. São Paulo: Habra, 1987. 392 p.

LINDEN, R. Técnicas de Agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, Macaé, n. 4, p. 18-36, jul./dez. 2009. Disponível em:
http://www.fsma.edu.br/si/edicao4/FSMA_SI_2009_2_Tutorial.html. Acesso em: 10 jun. 2021.

MARÇAL, M. S.; GUERRA, A. J. T. Indicadores ambientais relevantes para a análise da suscetibilidade à erosão dos solos em Açailândia (MA). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Uberlândia, v. 4, n. 2, p. 1-16, jul./dez. 2003. Disponível em:
<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/20/18>. Acesso em: 22 set. 2021.

MENDONÇA, J. F. B. **Solo**: substrato da vida. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 129 p.

MIRANDA, M. J.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; FAGUNDES, R. M.; FONSECHI, D. B. **Clima dos municípios paulistas**. CEPAGRI/UNICAMP, 2005. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>. Acesso em: 13 fev. 2017.

OKSANEN, J.; BLANCHET, F. G.; FRIENDLY, M.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MCGLINN, D.; O'HARA, R. B.; SIMPSON, G. L.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M. H. H.; SZOECES, E.; WAGNER, H. **Vegan**: Community Ecology Package. R package version 2.5-7. 2020.

PRIMAVESI, A. M. **Manual do solo vivo**: solo sadio, planta sadia, ser humano sadio. 2. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2016. 205 p.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RIBEIRO, H. V.; COCCO, J.; GALVANIN, E. A. S.; NEVES, S. M. A. S.; NASCIMENTO, D. L. Análise multivariada no estudo da dinâmica do uso e cobertura da terra nas sub-bacias do Rio Diamantino – Mato Grosso/Brasil. *In*: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS DO PANTANAL, 5., 2014, Campo Grande. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE; Brasília, DF: Embrapa; Cáceres: UNEMAT, 2014. p. 304-313. Disponível em: <https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2014/cd/p49.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Caracterização morfológica do solo. *In*: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. G.; VIDAL-TORRADO, P. (Ed.). **Pedologia**: fundamentos. Viçosa, MG: SBCS, 2015. cap. 3, p. 47-79.



ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: FFLCH-USP, 1997. Escala: 1:500.000.

RSTUDIO TEAM. **RStudio**: Integrated Development Environment for R – version 1.2.5033. Boston, 2019. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 5-18, out./dez. 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p19-29>. Acesso em: 16 jun. 2021.

SOUZA, E. D.; SILVA, F. D.; PACHECO, L. P.; LAROCA, J. S. V.; SOUZA, J. M. A.; BONETTI, J. A. Matéria orgânica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil. *In*: SOUZA, E. D.; SILVA, F. D.; ASSMANN, T. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, P. C. F.; PAULINO, H. B. (Org.). **Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. Tubarão: Copiart, 2018. cap. 7, p. 107-122.

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. The comparison of dendrograms by objective methods. **Taxon**, Utrecht, v. 11, n. 2, p. 33-40, Feb. 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1217208>. Acesso em: 28 jun. 2021.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Meio, Ambiente e Geografia**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2021. 145 p.

SUERTEGARAY, D. M. A. Questão ambiental: produção e subordinação da natureza. *In*: SILVA, J. B.; LIMA, L. C.; DANTAS, E. W. C. (Org.). **Panorama da Geografia brasileira II**. São Paulo: Annablume, 2006. p. 91-99.