



Multivariate analysis to estimate the erodibility of Latosols in Alagoas

Análise multivariada na estimativa da erodibilidade de Latossolos de Alagoas

MARTINS, Felipe Ferreira ⁽¹⁾; NASCIMENTO, Mayara Rodrigues ⁽²⁾; NASCIMENTO, Maiane Rodrigues do ⁽³⁾; GOIS, Renato Luis Tertuliano de ⁽⁴⁾; SANTOS, Márcio Aurélio Lins dos ⁽⁵⁾; SANTOS, Cícero Gomes dos ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ 0000-0001-9016-6351; Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, AL, Brasil. fmartins.ufal@gmail.com.

⁽²⁾ 0000-0002-4124-3282; Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, AL, Brasil. mayararodrigues011@gmail.com.

⁽³⁾ 0000-0002-4170-5694; Universidade Federal de Alagoas. Maceió, AL, Brasil. maianerodrigues707@gmail.com.

⁽⁴⁾ 0000-0002-0858-2880; Universidade Federal de Alagoas. Maceió, AL, Brasil. renatogoiso8@gmail.com.

⁽⁵⁾ 0000-0001-5216-4443; Universidade Federal de Alagoas. Arapiraca, AL, Brasil. mal.santo@arapiraca.ufal.br.

⁽⁶⁾ 0000-0002-2264-6772; Universidade Federal de Alagoas. Arapiraca, AL, Brasil. cgommes@arapiraca.ufal.br.

O conteúdo expresso neste artigo é de inteira responsabilidade dos/as seus/as autores/as.

ABSTRACT

Soil erodibility is one of the most important factors in understanding the erosive process. In view of the need to explore methods for determining the values of erodibility by simulated rainfall, the objective was to evaluate, through the tools of multivariate statistics, the erodibility of Latosols from Alagoas influenced by the physical, chemical and stability attributes of aggregates. The research activities were carried out at the Arapiraca Campus, of the Federal University of Alagoas (*Universidade Federal de Alagoas*), where Latosols were used in the suborders Red, Yellow and Red-Yellow, collected in two of the three geomorphological regions of the state of Alagoas. The prediction of correlation metrics shows that the cluster grouping indicates that the best correlations found were between the variables: clay and clay dispersed in water ($r = 0.94$), lime and sand ($r = 90$), and between the Water Erosion Prediction Project and the erodibility factor in midgrooves ($r = 1.00$). These strong positive correlations are proven through scatterplots, confidence regions, dendrogram, density estimation, and ellipses. The multivariate statistics allow a better understanding of the behavior of the correlations between the physical, chemical and stability attributes of aggregates with the erodibility of Latosols of Alagoas, as well as demonstrating the relationship of the variables studied with any of the three suborders of soils of Alagoas (Yellow, Red and Red-Yellow Latosol).

RESUMO

A erodibilidade do solo é um dos fatores mais importantes no entendimento do processo erosivo. Tendo em vista a necessidade de se explorar métodos de determinação dos valores de erodibilidade por chuva simulada objetivou-se avaliar, por meio das ferramentas da estatística multivariada a erodibilidade de Latossolos de Alagoas influenciadas pelos atributos físicos, químicos e de estabilidade de agregados. As atividades de pesquisa foram realizadas no Campus Arapiraca, da Universidade Federal de Alagoas, onde, foram utilizados Latossolos nas subordens Vermelho, Amarelo e Vermelho-Amarelo, coletados em duas das três regiões geomorfológicas do estado de Alagoas. A previsão das métricas de correlação demonstram que o agrupamento de cluster indica que as melhores correlações encontradas foram entre as variáveis: argila e argila dispersa em água ($r = 0,94$), Lima e areia ($r = 90$), e entre a Water Erosion Prediction Project e o fator erodibilidade em entressulcos ($r = 1,00$). Essas fortes correlações positivas ficam comprovadas através dos gráficos de dispersão, as regiões de confiança, o dendrograma, a estimativa de densidade e as elipses. A estatística multivariada permite o maior entendimento do comportamento das correlações entre os atributos físicos, químicos e de estabilidade de agregados com a erodibilidade de Latossolos de Alagoas, como também demonstra a relação das variáveis estudadas com alguma das três subordens de solos de Alagoas (Latossolo Amarelo, Vermelho e Vermelho-Amarelo).

INFORMAÇÕES DO ARTIGO

Histórico do Artigo:

Submetido: 21/02/2023

Aprovado: 04/04/2023

Publicação: 03/07/2023



Keywords:

Clusters, Principal componentes, Correlation, Soil.

Palavras-Chave:

Agrupamentos, Componentes principais, Correlação, Solo.

Introdução

O solo é uma coleção de corpos naturais, resultante da interação de fatores geológico, topográficos, biológicos e climáticos, considerado um sistema complexo, resultante da interação de fatores geológicos, topográficos e climáticos, entre outros, que irão definir as características do solo (PRAGANA et al., 2012). A ordem dos Latossolos, ocupam mais de 50% do território brasileiro (Oliveira, 2011), o mesmo se verifica estado de Alagoas, como a ocorrência das subordens Vermelha, Amarela e Vermelha-Amarela (Santos et al., 2018). Os Latossolos se caracterizam por apresentarem avançados estágios de formação, com a presença de material coloidal com baixa capacidade de troca de cátions (Santos et al., 2018). Nunes; Cassol (2008) avaliaram os processos erosivos como fatores importantíssimos no que se refere a danos causados em solos dos sistemas agrícolas, interferindo negativamente e promovendo elevação de custos na produção.

A erodibilidade é definida como a susceptibilidade de um solo à erosão hídrica (BOCUTI et al., 2019). Para Thomaz; Fidalski (2020), as condições para que um solo seja susceptível a erosão tem relação direta com as suas propriedades. Os valores de erodibilidade do solo são utilizados, entre outros aspectos, para estabelecer uma escala de susceptibilidade natural dos solos à erosão hídrica (BERTOL et al., 2007).

A erodibilidade do solo é representada pelo fator K, um dos termos da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), definido por Wischmeier e Smith (1978) enquanto que na WEPP (Water Erosion Prediction Project) (FLANAGAN e NEARING, 1995) representa a erosão entressulcos (K_i) que expressa a quantidade de solo perdido por unidade de área. A erodibilidade do solo é um dos fatores muito importantes no entendimento do processo erosivo, mas constitui-se no fator de maior custo e demora para sua obtenção (SILVA et al., 1999).

O fator erodibilidade de um solo ou ordem de solo pode ser obtido por três maneiras diferentes. O método de chuva natural, desenvolvido por Wischmeier; Smith (1978) que consiste na utilização de parcelas com solo totalmente descoberto, exposto as condições climáticas, este método se apresenta como oneroso e muito demorado, por exigir no mínimo cinco anos de observações diárias. Tentando resolver a questão da morosidade e custos, foi desenvolvido os métodos de determinação dos valores de erodibilidade por chuva simulada, que pode ser determinada a campo ou em condições de laboratórios (FLANAGAN; NEARING, 1995). O terceiro método é o indireto, que pode se basear em regressões múltiplas que contenham como variáveis independentes atributos morfológicos, químicos, físicos e mineralógicos do solo ou relações destes, correlacionados com o fator erodibilidade. Na literatura, são considerados padrões os métodos diretos por chuva natural ou simulada, na determinação dos valores de erodibilidade do solo.

Para Mota et al. (2014) a análise multivariada apresenta uma diversidade de técnicas que favorecem a realização de avaliação de uma gama de dados de maneira simultânea,

possibilitando observar como as variáveis estão relacionadas entre si. Métodos como o de análise de componentes principais (ACP) e análise de agrupamento, podem ser usados para explicar as relações entre as diferentes variáveis, permitindo assim tomar as melhores decisões para trabalhos relacionados à agricultura (SAED-MOUCHESHI et al., 2013).

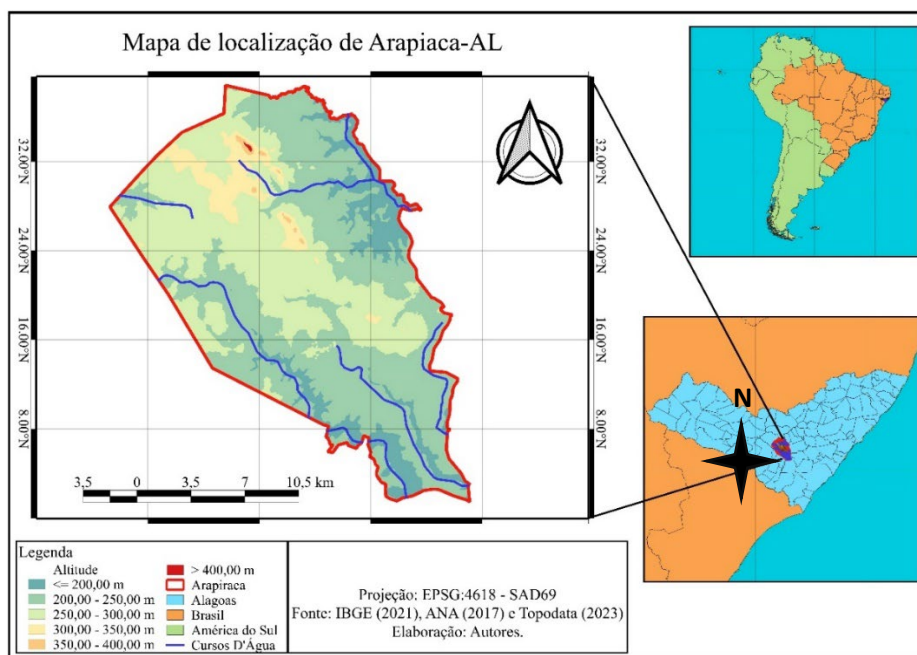
Este trabalho objetivou avaliar, a erodibilidade do solo dos Latossolos de ocorrência no Estado de Alagoas, por meio das ferramentas da estatística multivariada.

Material e Métodos

As atividades de pesquisa para construção deste trabalho foram realizadas no Campus Arapiraca, da Universidade Federal de Alagoas, localizado no município de Arapiraca, região Agreste do Estado de Alagoas (IBGE, 2020), coordenadas geodésicas 9°41'56,8" de latitude Sul e 36°41' 12,83" de longitude Oeste e altitude de 210,54 m (Figura 1).

Figura 1.

Universidade Federal de Alagoas, campus Arapiraca.



Fonte: Autores (2023)

Solos utilizados na pesquisa

Nesta pesquisa foram utilizados Latossolos, nas subordens Vermelho, Amarelo e Vermelho-Amarelo, coletados em duas das três regiões geomorfológicas do estado de Alagoas. As amostras foram coletadas nos perfis modais de cada ordem, nas suas respectivas subordens, com auxílio do ZAAL (Zoneamento Agroecológico de Alagoas) e dos arquivos particulares de algumas empresas do setor sucroalcooleiro do Estado de Alagoas. O local das coletas e outras informações estão presentes da Tabela 1.

Tabela 1.

Locais de amostras coletadas de ocorrência de Latossolos, nas subordens Vermelho, Amarelo e Vermelho-Amarelo no Estado de Alagoas

Amostras coletadas	Local da coleta	Região Geomorfológica	Mesorregião
Latossolo Vermelho 1 (LV1)	Arapiraca	Pediplano do Baixo São Francisco	Agreste alagoano
Latossolo Vermelho 2 (LV2)	Girau do Ponciano	Pediplano do Baixo São Francisco	Agreste alagoano
Latossolo Vermelho 3 (LV3)	Limoeiro de Anadia	Tabuleiro Costeiro	Agreste alagoano
Latossolo Amarelo 1 (LA1)	Coruripe	Tabuleiro Costeiro	Leste alagoano
Latossolo Amarelo 2 (LA2)	Rio Largo	Tabuleiro Costeiro	Leste alagoano
Latossolo Amarelo 3 (LA3)	Teotônio Vilela	Tabuleiro Costeiro	Leste alagoano
Latossolo Vermelho-Amarelo 1 (LVA1)	Coruripe	Tabuleiro Costeiro	Leste alagoano
Latossolo Vermelho-Amarelo 2 (LVA2)	Palmeira dos Índios	Pediplano do Baixo São Francisco	Agreste alagoano
Latossolo Vermelho-Amarelo 3 (LVA3)	Teotônio Vilela	Tabuleiro Costeiro	Leste alagoano

Fonte: ZAAL (2023)

Estabilidade de Agregados

Na obtenção da estabilidade de agregados dos Latossolos estudados, foram coletadas amostras indeformadas, na camada de 0-20 cm de profundidade. As amostras foram seca ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 8 mm e retidas em peneira de 4 mm. Foram utilizadas subamostras de 100 gramas de agregados (Figura 2A), os quais foram saturados por ascensão capilar e submetidos ao tamisamento via úmido com oscilação vertical por 10 minutos, no agitador do tipo Yoder, equipado com três conjuntos de peneiras com malha de 2,00; 1,00; 0,500; 0,250 e 0,106 mm, conforme o método proposto por Kemper; Rosenau (1986). Os agregados retidos em cada peneira foram transferidos para recipientes metálicos e conduzidos á estufa de secagem a 105° C, durante 24 horas. A quantificação do conteúdo retido em cada peneira permitiu a determinação da porcentagem de agregados por classes de diâmetro, associadas às aberturas das malhas. Foram calculados os índices diâmetro médio ponderado

(DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados da classe < 0,25 mm (g).

Variáveis hidráulicas

As variáveis hidráulicas utilizadas nesta pesquisa foram obtidas através de testes de chuva simulada conforme metodologia descrita por Meyer; Harmon (1979), com amostras de solos provenientes de Latossolos de Alagoas.

A altura da lâmina do escoamento (h) foi obtida pela equação (1), derivada por Woolhiser; Liggett (1967), e Singh (1983) para solução cinemática das equações de Saint-Venant:

$$h = \frac{q}{v} \quad (1)$$

Em que:

h = altura da lâmina de escoamento (m);

q = descarga líquida por unidade de largura (m² s⁻¹); v = velocidade média do escoamento (m s⁻¹).

Número de Froude foi obtido conforme Simons; Senturk (1992), segundo a equação 2:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

Em que:

Fr = número de Froude (adimensional);

g = aceleração da gravidade (m s⁻²).

A viscosidade cinemática é variável conforme a temperatura, sendo necessário então a aferição da temperatura da água. Por conta disso, a viscosidade foi determinada em função da temperatura conforme a expressão dada por Julien (1995), como mostra a equação 3:

$$v = [1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (3)$$

v = viscosidade cinemática da água (m² s⁻¹);

T = temperatura da água (°C).

Na determinação do número de Reynolds foi usada a equação 4, proposta por Simons; Senturk (1992), onde:

$$Re = \frac{Vh}{v} \quad (4)$$

Onde:

Re = número de Reynolds (adimensional).

Taxas de desagregação e perdas de solo

O cálculo das taxas de desagregação do solo em entressulcos foi utilizada a equação 5, segundo apresentado por Bezerra et al. (2006):

$$Di = \frac{M_{SS}}{ADc} \quad (5)$$

Sendo que:

Di = taxa de desagregação do solo em entressulcos (kg/m²);

M_{SS} = massa de solo seco desagregado (kg);

A = área da parcela (m²);

D_c = duração da coleta (s).

As perdas de solo foram obtidas por meio da equação 6, conforme também proposto por Bezerra et al. (2006), onde:

$$P_S = \frac{\sum(QCst)}{A} \quad (6)$$

Em que:

P_S = perda de solo (kg/m²);

Q = vazão (L s⁻¹);

C_s = concentração de sedimentos (kg L⁻¹);

t = intervalo entre as coletas (s);

Estimativa da erodibilidade do solo em entressulcos por chuva simulada

A determinação da erodibilidade do solo em entressulcos foi utilizada a equação 7, segundo o modelo WEPP de Flanagan; Nearing (1995), em condições de solo descoberto, recém-preparado e sem resíduos, onde:

$$Ki = \frac{Di}{I^2 Sf} \quad (7)$$

Em que: Ki = erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m⁻⁴);

Di = taxa máxima de desagregação de solo em entressulcos (kg m⁻² s⁻¹);

I = intensidade da chuva (m s⁻¹);

Sf = fator de correção para o declive (adimensional), dado pela equação 8 de Liebenow et al. (1990):

$$Sf = 1,05 - 0,85 \exp^{-4 \text{sen } \theta} \quad (8)$$

Onde: θ = ângulo do declive do solo (graus).

No presente trabalho o valor de Sf é de 0,456, pois, a declividade adotada na parcela foi de 0,09 m m⁻¹, sendo o ângulo de 5,14°.

Estimativa da erodibilidade do solo por modelos matemáticos

O fator erodibilidade do solo (K_i), foi verificado de maneira indireta por meio do uso de três equações empíricas, as quais utilizaram para a avaliação variáveis químicas, físicas e morfológicas das amostras dos solos. Os modelos matemáticos foram utilizados no trabalho de Araújo et al. (2011), e foram propostas e/ou modificadas anteriormente por outros cientistas.

A equação 9 foi proposta por Bertoni; Lombardi Neto (2018), com base em Middleton (1930), que considera:

$$K = \frac{(\% \text{ argila dispersa em água})/(\% \text{ argila total})}{(\% \text{ argila total})/(\% \text{ da umidade equivalente})} \quad (9)$$

O segundo modelo utilizado foi modificado por Lima et al. (1990), o qual é uma adaptação da equação de Lombardi Neto; Bertoni (1975). A equação 10 é:

$$K = \frac{(\% \text{ silte} + \% \text{ argila dispersa em água})/(\% \text{ silte} + \% \text{ argila totais})}{(\% \text{ argila total})/(\% \text{ da umidade equivalente})} \quad (10)$$

A terceira equação utilizada (equação 11), foi proposta por Bouyoucos (1935) e descrita por Bertoni; Lombardi Neto (2010), onde o fator de erodibilidade é dado por:

$$K = \frac{(\% \text{ areia} + \% \text{ silte})/(\% \text{ argila})}{100} \quad (11)$$

Análise estatística

As variáveis foram submetidas à análise utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2021), gerando análises de componentes principais (ACP) e de agrupamentos. Para análise multivariada hierárquica de clusters foi definida pela comparação visual de dendrogramas em que ramos distintos são marcados com diferentes cores e com avaliação da tendência de armazenamento dos dados e da decisão sobre o número do cluster examinando em cluster e validando os resultados. Para as análises foram utilizados alguns pacotes, como: FactoMineR, car, corrr, ggcorrplot, multcomp, lattice, PerformanceAnalytics, RColorBrewer e rsm.

Resultados e discussão

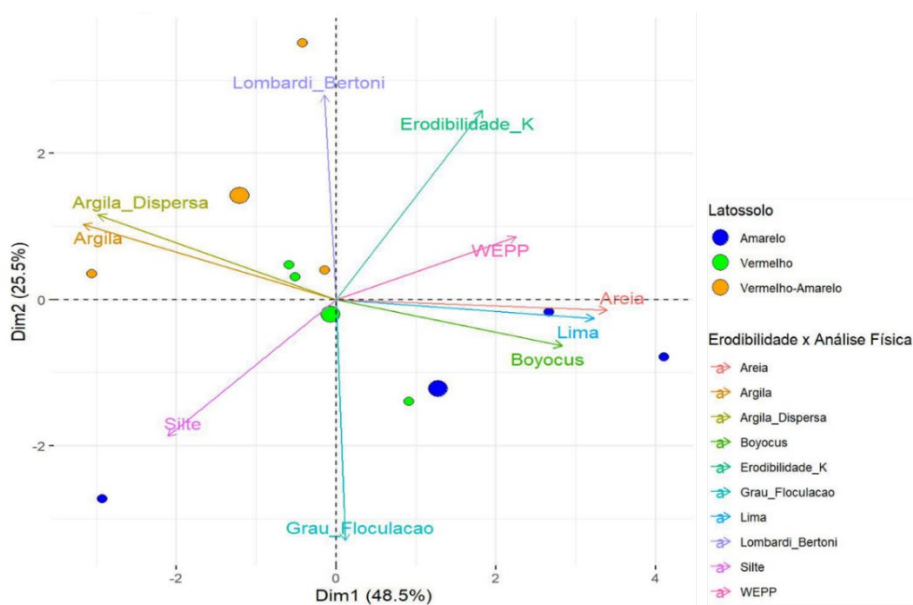
Análise de componentes principais (ACP)

Atributos Físicos

Avaliando os atributos físicos dos Latossolos com relação aos valores da erodibilidade, é possível observar com base na Figura 2 que das dez variáveis estudadas, apenas as variáveis areia, Lima; Bouyoucos tem grandes cargas fatoriais positivas na dimensão 1 (DIM1) e correlação entre si, conforme observado pelos vetores de maior comprimento e mais proximidade do eixo principal e presença de ângulos agudos entre as variáveis apresentadas. Observa-se que o Latossolo Amarelo foi o mais representativo na dimensão ou componente 1, demonstrando assim relação com essas três variáveis.

Figura 2.

Análise física de componente principal das variáveis WEPP, Lombardi Neto; Bertoni (Lombardi_Bertoni), Lima; Bouyoucos, fator erodibilidade em entressulcos Ki (Erodibilidade_K), areia, argila, argila dispersa em água (argila_dispersa), grau de floculação (grau_floculação) e silte no comportamento dos três Latossolos de Alagoas na relação entre os atributos da análise física e a estimativa da erodibilidade em entressulcos.



Fonte: Autores (2023)

Ao que diz respeito ao eixo secundário, as variáveis Lombardi Bertoni e grau de floculação apresentaram maior valor vetorial e proximidade com esse eixo, sendo também essas variáveis relacionadas com os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo.

Vale ressaltar que os modelos matemáticos de estimativa de erodibilidade propostos por Bouyoucos (1935) e Lima et al. (1990) a apresentaram correlação negativa com as variáveis

argila, argila dispersa em água e silte (Figura 3). Essa correlação negativa pode ser compreendida pelo fato desses atributos importantes do solo serem relacionados ao processo erosivo, como: encrostamento, agregação, porosidade, infiltração de água e arraste de partículas e agregados pela enxurrada, podendo estar, desta forma, contribuindo para um aumento ou redução da erodibilidade (UEHARA; GILLMAN, 1981; ANGULO, 1983).

Atributos Químicos

Ao que tange a ACP da análise dos atributos químicos, podemos observar na Figura 4 que a soma dos dois componentes principais (ACP1 e ACP2) representam uma variância total de 57,2% na análise das dezesseis variáveis estudadas.

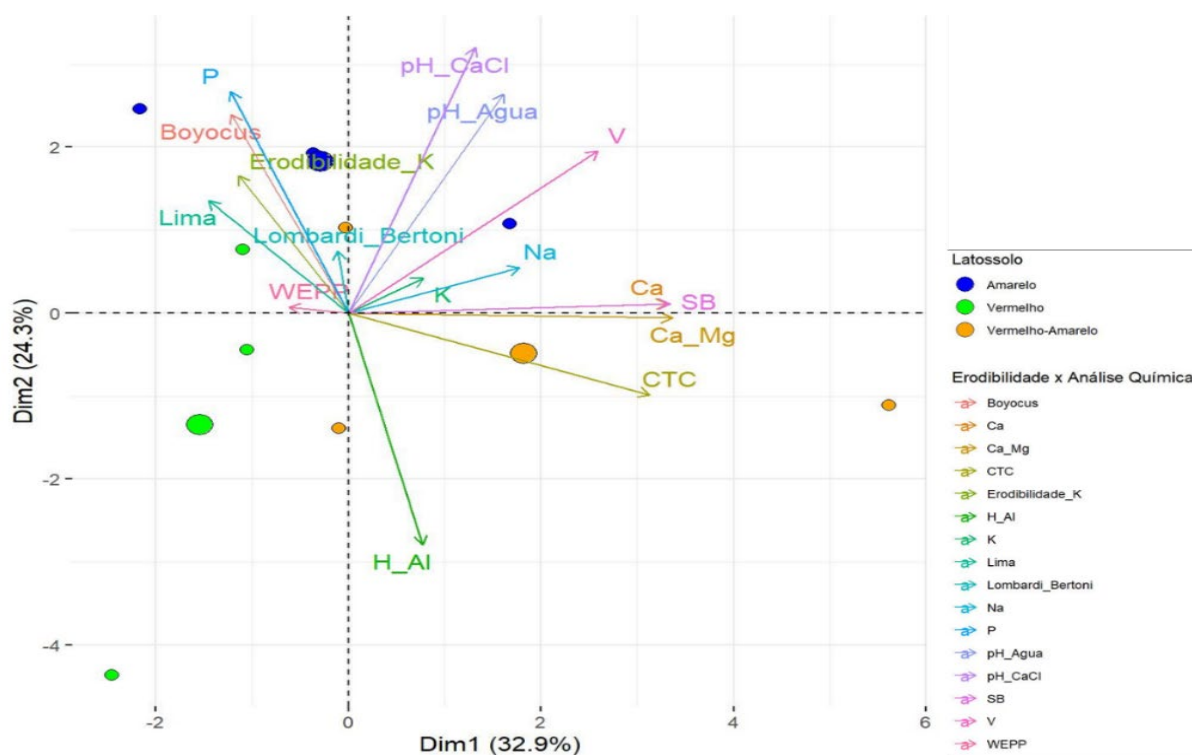
As variáveis Ca, SB e Ca, Mg apresentaram maior proximidade com o eixo principal e alta correlação entre si, além de que, apresentaram relação com o Latossolo Vermelho-Amarelo, assim como a variável CTC, que entre as quatro variáveis é a que apresenta maior afinidade com essa subordem de solo.

Observa-se no gráfico que os métodos de estimativa da erodibilidade (Bouyoucos, erodibilidade k, WEPP, Lima e Lombardi Bertoni) apresentaram correlação positiva entre si e com o macronutriente fósforo (P), que segundo o Instituto da Potassa e Fosfato (1998) pode acontecer devido à diminuição da compactação dos solos através da erodibilidade, o que permite o acúmulo e maior disponibilidade do fósforo nesses solos. Essa correlação positiva é mais evidente entre os métodos de Bouyoucos e P, conforme observa-se pela aproximação das setas vetoriais dessas variáveis e pela distância do eixo secundário.

Demonstra-se também no gráfico da Figura 3 a existência de relação entre as variáveis acima citadas e o Latossolo Amarelo e uma amostra de Latossolo Vermelho-Amarelo. Quanto ao Latossolo Vermelho, não se pode observar nenhuma relação direta desse tipo de solo com nenhuma variável estudada.

Figura 3.

Análise química de componente principal das variáveis WEPP, Lombardi & Bertoni (Lombardi Bertoni), Lima, Bouyoucos, fator erodibilidade em entressulcos Ki (Erodibilidade K), cálcio (Ca), cálcio+magnésio (Ca Mg), capacidade de troca catiônica (CTC), acidez potencial ou total (H Al), potássio (K), sódio (Na), fósforo (P), pH medido em água (pH água), pH medido em cloreto de cálcio (pH Ca Cl), soma de bases (SB) e saturação por bases (v) no comportamento dos três Latossolos de Alagoas na relação entre os atributos da análise química e a estimativa da erodibilidade em entressulcos.



Fonte: Autores (2023)

Estabilidade de Agregados

Na análise de componentes principais (ACP) que avalia o comportamento dos três Latossolos de Alagoas (Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo) na relação entre estabilidade de agregados e a estimativa da erodibilidade em entressulcos, ficou demonstrado que o método de estimativa da erodibilidade de Lima é o que mais se aproxima do eixo principal e com o vetor de maior comprimento, sendo essa variável correlacionada positivamente com as variáveis Bouyoucos e WEPP, onde, fica comprovado por meio da análise do gráfico que essas três variáveis apresentam relação com o Latossolo Amarelo.

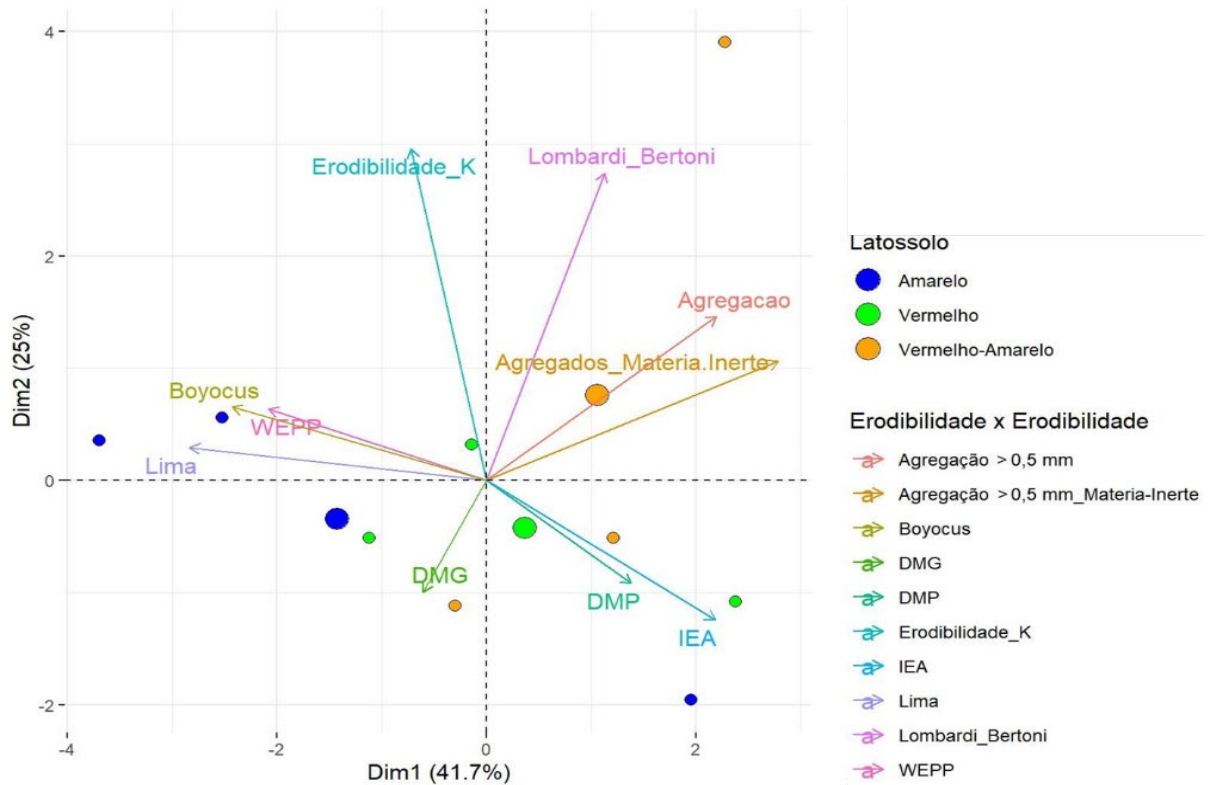
No eixo secundário a variável com maior vetor e relação com esse eixo é a Erodibilidade K, a qual é calculada pelo fator erodibilidade em entressulcos K_i . Essa variável também apresentou relação direta com uma amostra de Latossolo Vermelho e uma correlação positiva com a variável Lombardi Bertoni.

Conforme exposto na Figura 4, podemos ver que a variável índice de estabilidade de agregados (IEA) demonstra correlação negativa com todos os métodos de estimativa de erodibilidade, seja em maior ou menor grau. Permitindo a inferência de que, quanto maior o IEA, menor será a erodibilidade apresentada e vice-versa, como comprovado também por Meyer; Harmon (1984), Albuquerque et al. (2000) e Legout et al. (2005) em seus trabalhos que avaliaram a correlação entre esses fatores.

Os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo em média apresentam correlação em maior grau com as variáveis DMP e IEA (Latossolo Vermelho) e, Agregados mat. Inerte, Agregação e Lombardi Bertoni (Latossolo Vermelho-Amarelo).

Figura 4.

Análise da estabilidade de agregado com uma análise de componente principal das variáveis WEPP, Lombardi & Bertoni (Lombardi_Bertoni), Lima, Bouyoucos, fator erodibilidade em entressulcos Ki (Erodibilidade_K), % agregação > 0.5 mm (agregação), % agregação > 0.5 mm de material inerte (agregados_mat. inerte), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) no comportamento dos três Latossolos de Alagoas na relação entre estabilidade de agregados e a estimativa da erodibilidade em entressulcos.



Análise de Cluster

Atributos Físicos

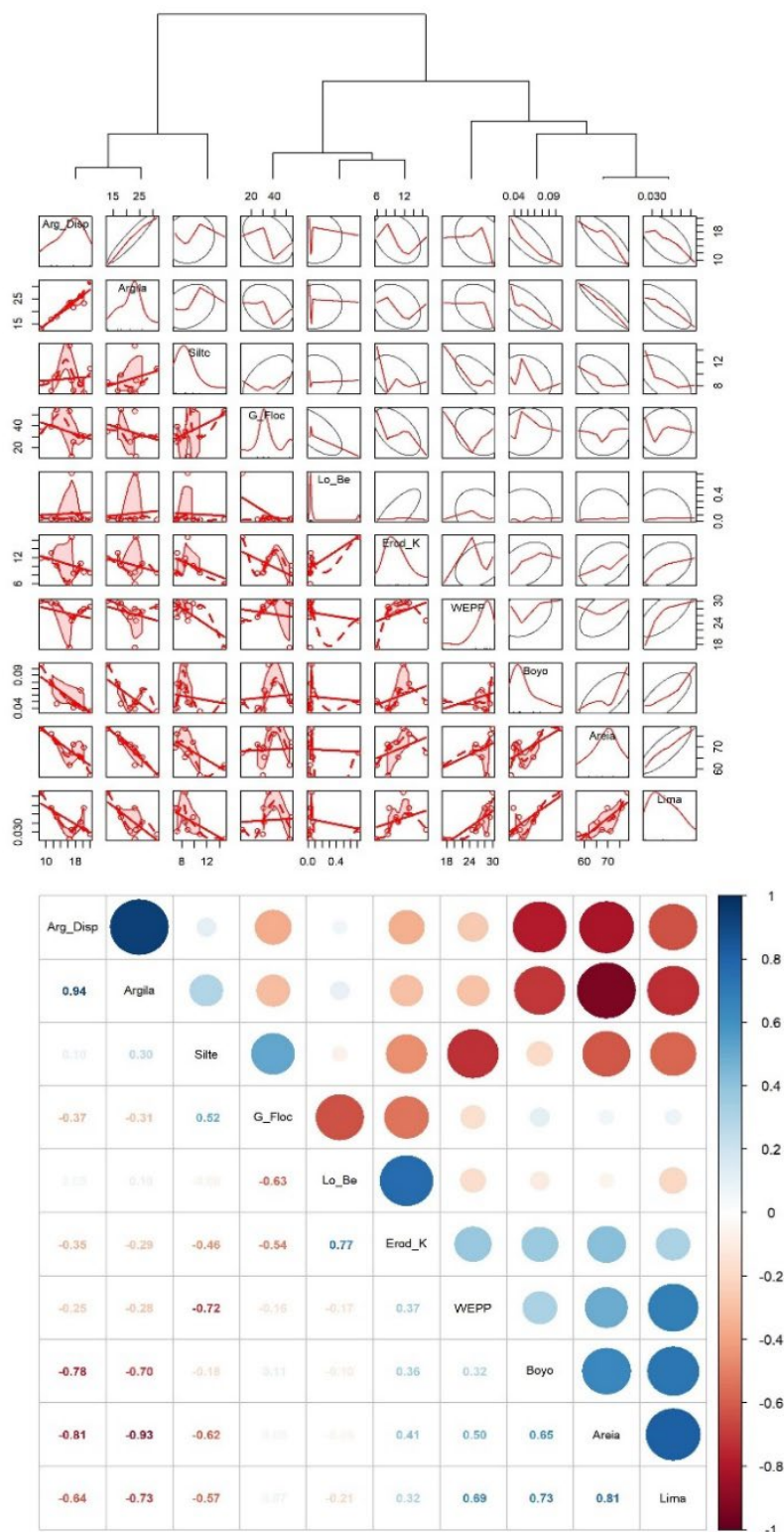
A Figura 6 apresenta a avaliação e a qualidade do ajuste para as variáveis WEPP, Lombardi & Bertoni (Lo_Be), Lima, Bouyoucos (Bouyo), fator erodibilidade em entressulcos Ki (Erod_K), areia, argila, argila dispersa em água (Arg disp), grau de flocculação (G Floc) e silte, observados pela correlação entre os valores dos atributos físicos do solo e os métodos de estimativa da erodibilidade em entressulcos por meio da análise hierárquica de Cluster, coeficiente de correlação, dispersão, regiões de confiança, dendrograma, estimativa de densidade e elipses.

Nota-se conforme (Figura 5), que o dendrograma demonstra grande semelhança entre seis variáveis estudadas, sendo que os pares de variáveis Arg disp x Argila, Lo Be x Erod_K e Lima x Areia, esse último conglomerado com maior similaridade entre os três pares. Afim de produzir uma análise com níveis de similaridade de agrupamentos satisfatória e buscando simplificar o número de clusters, foi escolhido como partição final através do corte do dendrograma o número de 3 agrupamentos principais.

A previsão das métricas de correlação demonstram que o agrupamento de cluster indica que as melhores correlações encontradas foram entre as variáveis: argila e argila dispersa em água ($r = 0,94$), Lima e areia ($r = 0,81$), e entre a Lo Be e o fator erodibilidade em entressulcos ($r = 0,77$). Essas fortes correlações positivas ficam comprovadas através dos gráficos de dispersão, as regiões de confiança, o dendrograma, a estimativa de densidade e as elipses.

Figura 5.

Agrupamento de Cluster para os atributos físicos, coeficiente de correlação, dispersão, regiões de confiança, dendrograma, estimativa de densidade e elipses dos valores dos atributos físicos do solo e os métodos de estimativa da erodibilidade em entressulcos.



Fonte: Autores (2023)

Atributos Químicos

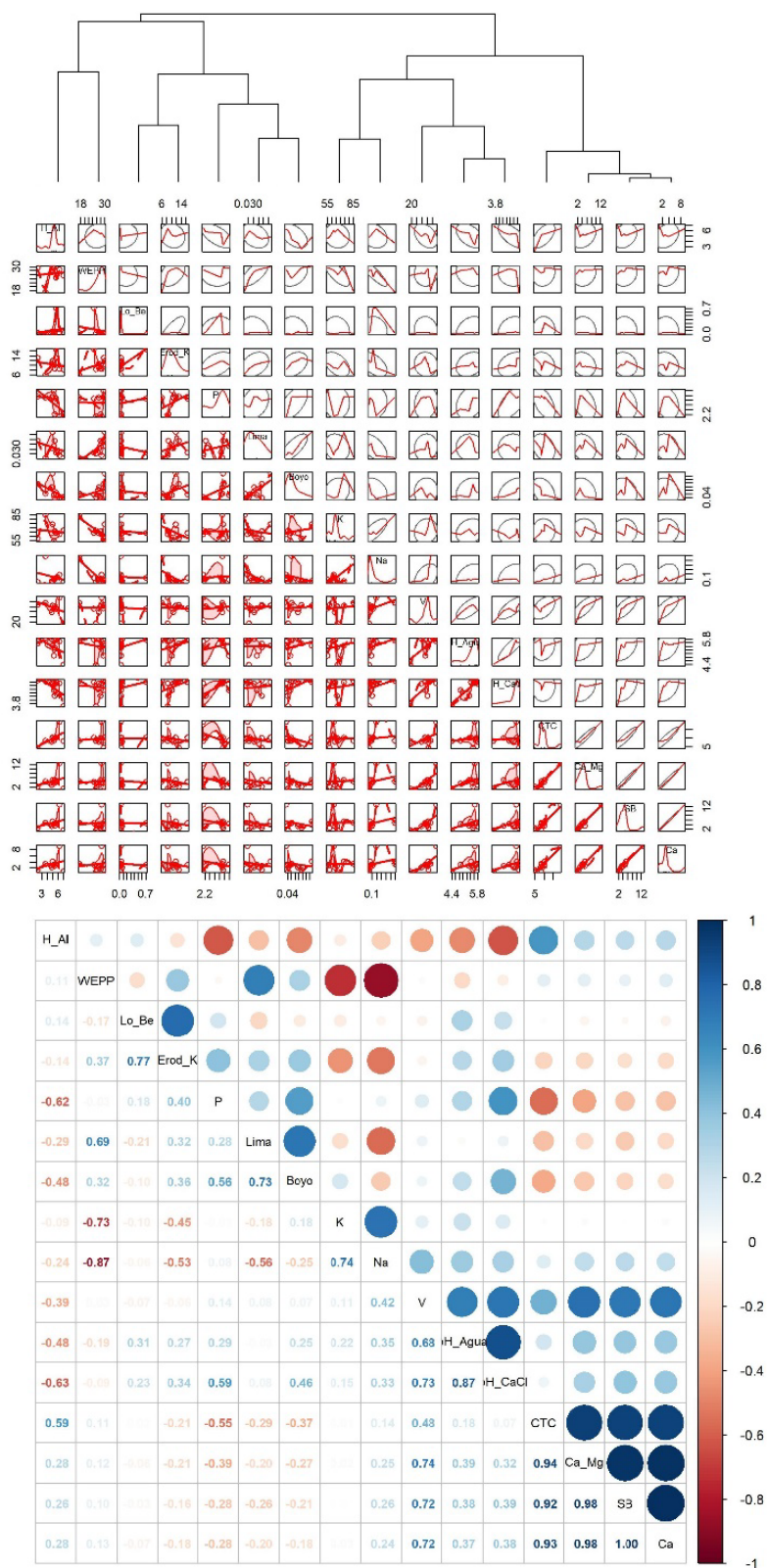
Pode ser observado na Figura 6 as correlações positivas e/ou negativas entre as variáveis estudadas, ao que diz respeito a alguns atributos químicos do solo e os métodos de estimativa da erodibilidade em entressulcos. Identifica-se que há correlações positivas com valores acima de 90%, como é o caso das correlações entre as variáveis CTC e SB ($r = 0,92$), Ca e CTC ($r = 0,93$), Ca_Mg e CTC ($r = 0,94$), Ca e Ca_Mg ($r = 0,98$), Ca_Mg e SB ($r = 0,98$) e por fim Ca e SB ($r = 1,00$). Isso provavelmente ocorre, porque as variáveis Ca e Ca_Mg estão presentes no cálculo dos valores dos atributos químicos da CTC (efetiva) e SB. Segundo o dendrograma as maiores similaridades de conglomerados foram entre os fatores acima citadas, conforme observado pelos tamanhos das linhas verticais dessas variáveis dispostas no gráfico, promovendo assim a geração de seis agrupamentos de similaridade direta.

A análise de agrupamentos de cluster também permite constatar que existe correlação positiva forte entre os estimadores do fator erodibilidade em entressulcos, como é o caso dos modelos Bouyoucos e Lima ($r = 0,73$), tendo essa correlação ocorrida pelo fato de ambos modelos utilizarem os valores de areia, silte e argila no seu cálculo. Já o fator K_i , calculado por meio do teste de chuva simulada (Erodibilidade_k), obteve similaridade expressiva com o modelo de Lombardi; Bertoni ($r = 0,77$). Sendo o fator K_i o mais próximo do real, pode-se afirmar por meio da análise que esse modelo é o mais assertivo para prever a possibilidade de um dado Latossolo erodir.

De maneira geral, o dendrograma produziu no corte final 7 agrupamentos em ordem de semelhança dos clusters.

Figura 6.

Agrupamento de Cluster para os atributos químicos, coeficiente de correlação, dispersão, regiões de confiança, dendrograma, estimativa de densidade e elipses dos valores dos atributos químicos do solo e os métodos de estimativa da erodibilidade em entressulcos



Fonte: Autores (2023)

Estabilidade de Agregados

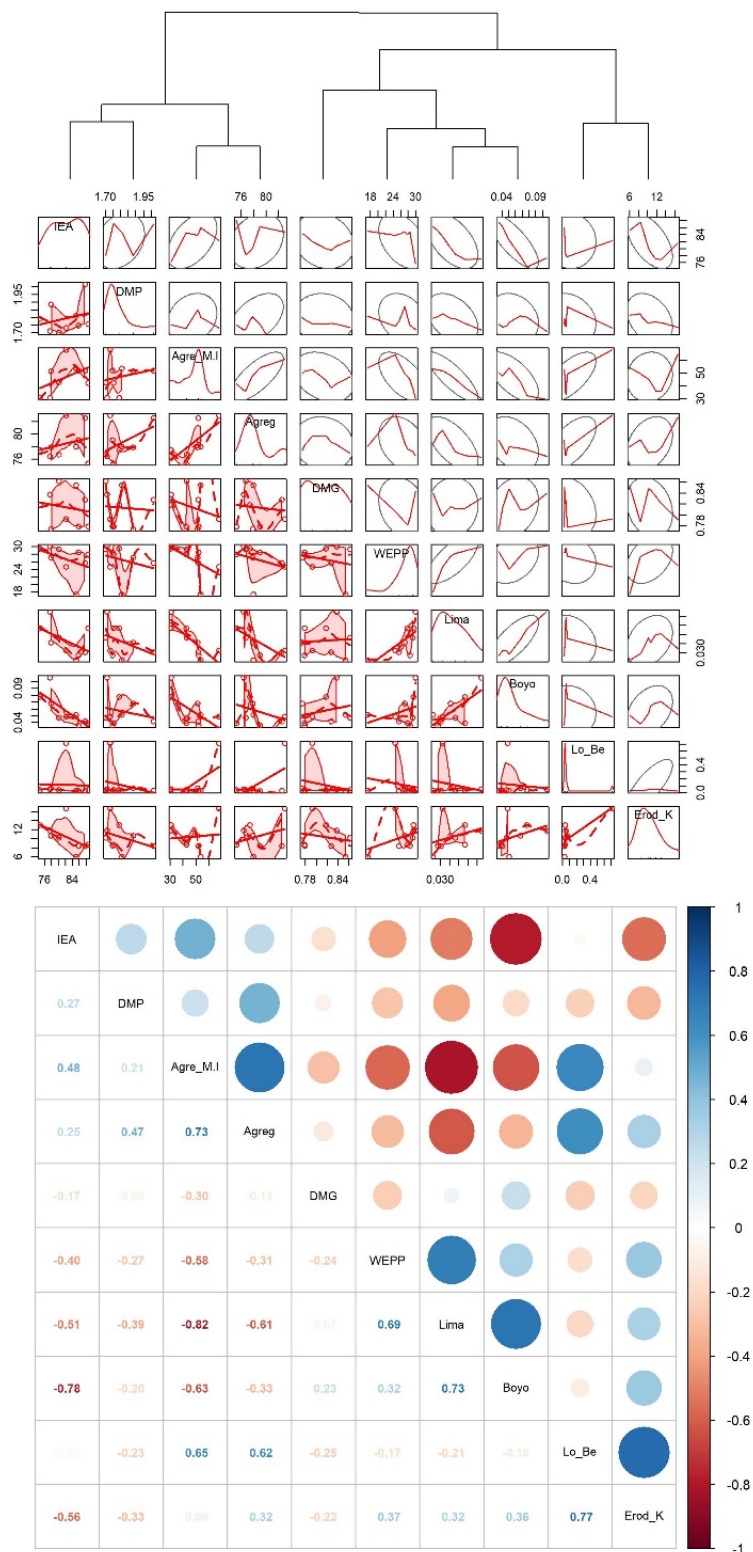
Analisando a Figura 7 é possível verificar que o melhor método matemático para estimar a erodibilidade em entressulcos é o método de Lombardi Neto; Bertoni (1975), pois, o mesmo apresenta uma maior correlação com a variável erodibilidade_K ($r = 0,77$).

O índice de estabilidade de agregados (IEA) demonstrou correlação negativa com todos os métodos de avaliação da erodibilidade em entressulcos, mas, em especial com Bouyoucos (1935) (Boyo) com um valor de correlação de $r = - 0,78$. Essa correlação negativa entre a estabilidade dos agregados e a susceptibilidade à erosão, também foi comprovada por Wischmeier; Mannering (1969) e Bajracharya et al. (1992).

Vale ressaltar que de todas as variáveis analisadas, o diâmetro médio geométrico (DMG) apresentou correlações negativas com quase todas as variáveis estudadas, isolando-a quase que totalmente das demais variáveis, conforme comprovado pelo dendrograma, onde, essa variável não apresenta semelhança direta com nenhuma variável estudada. Esse fato influenciou diretamente a escolha de um agrupamento com 4 conglomerados no corte final, visto que, as distâncias das linhas ao longo do eixo vertical são significativas, não permitindo um corte final do dendrograma mais baixo, dando assim evidencia a níveis de similaridade de agrupamentos maiores.

Figura 7.

Agrupamento de Cluster, coeficiente de correlação, dispersão, regiões de confiança, dendrograma, estimativa de densidade e elipses dos valores de estabilidade de agregados e os métodos de estimativa da erodibilidade em entressulcos



Fonte: Autores (2023)

Conclusões

1. O Índice de Estabilidade de Agregados tem correlação negativa com a erodibilidade.
2. O método de estimativa de Lombardi Neto & Bertoni (1975) se mostrou o mais condizente com o método de estimativa por chuva simulada da erodibilidade em entressulcos.
3. A estatística multivariada permite o maior entendimento do comportamento das correlações entre os atributos físicos, químicos e de estabilidade de agregados com a erodibilidade de Latossolos de Alagoas.
4. Todas as variáveis estudadas apresentaram relação com alguma das três subordens de solos de Alagoas (Latosolo Amarelo, Vermelho e Vermelho-Amarelo).

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, J. A., Cassol, E. A., Reinert, D. J. (2000). Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(1), p. 141-151. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000100016>.
- Angulo, R. J. (1983). Relações entre a erodibilidade de algumas propriedades de solos Brasileiros. [Dissertação de mestrado em Agronomia, Universidade Federal do Paraná]. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/27471?show=full>
- Araújo, F. S., Salviano, A. A. C., Neto, M. R. H. (2011). Estimativa da erodibilidade de latossolos do Piauí. *Scientia Plena*, 7(10). <https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/358>.
- Araujo Filho, J. C. de., Santos, J. C. P. dos., Parahyba, R. da B. V., Oliveira Neto, M. B. de., Barros, A. H. C., Marques, F. A., Amaral, A. J. do. (2020). *Zoneamento agroecológico do estado de Alagoas: levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Alagoas (ZAAL)*. Embrapa Solos. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1124244/zoneamento-agroecologico-do-estado-de-alagoas-levantamento-de-reconhecimento-de-baixa-e-media-intensidade-dos-solos-do-estado-de-alagoas>
- Bajracharya, R. M., Elliot, W. J., Lal, R. (1992). Erodibilidade entre sulcos de alguns solos de Ohio com base na simulação de chuva de campo. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1), p. 267-272. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010041x>
- Bertol, I., Leite, D., Engel, F.L., Cogo, N. P., González, A. P. (2007). Erodibilidade de um Nitossolo Háplico aluminico determinada em condições de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, p. 541-549. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300014>.
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F. (2018). *Conservação do solo* (p. 355). Ícone.
- Bezerra, S. A., Cantalice, J. R. B. (2006). Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30, p. 565-573. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300016>.

- Bocuti, E. D., Amorim, R. S. S., Santos, T. G., Di Raimo, L. A. D. L., Pereira, H. G. (2019). Erodibilidade entressulcos e sua relação com atributos de solos do Cerrado. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(1), p. 68-78. <https://doi.org/10.19084/RCA18130>.
- Bouyoucos, G. J. (1935). Proporção de argila como critério de suscetibilidade de solos à erosão. *Jornal da Sociedade Americana de Agronomia*. 27, p. 738-741. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301776020>.
- Flanagan, D. C., Nearing, M. A. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Documentação de perfil de encosta e modelo de bacia hidrográfica. *Nserl Rep*, 10, p. 1-123. <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=64035>.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). *Cidades e Estados*. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/arapiraca.html>.
- Julien, P. Y. (1995). *Erosion and sedimentation*. Melbourne, Cambridge University Press, 280p.
- Kemper, W. D., Rosenau, R. C. (1986). Estabilidade agregada e distribuição de tamanho. *Métodos de análise de solo: Parte 1 Métodos físicos e mineralógicos*, 5, p. 425-442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>.
- Legout, C., Leguèdois, S., Le Bissonais, Y. (2005). Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements. *European Journal of Soil Science*, 56(2), p. 225-238. <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.2004.00663.x>
- Liebenow, A. M., Elliot, W. J., Laflen, J. M. (1990). Interrill Erodibility: Collection and Analysis of Data From Cropland Soils. *Transactions of The Asae*, 33(6), p. 1882-1888. [Https://doi.org/10.13031/2013-31553](https://doi.org/10.13031/2013-31553).
- Lima, J. M., Curi, N., Resende, M., Santana, D. P. (1990). Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 14(1), p. 85-90. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/489138>.
- Lombardi Neto, F., Bertoni, J. (1975). *Erodibilidade de solos paulistas*. Instituto Agrônômico. 12p. (Boletim Técnico, 27).
- Meyer, L. D., Harmon, W. C. (1979). Simulador de chuva de intensidade múltipla para pesquisa de erosão em taludes. *Transactions of the ASAE*, 22(1), p. 0100-0103. <https://doi.org/10.13031/2013-34973>.
- Meyer, L. D., Harmon, W. C. (1984). Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5), p. 1152-1157. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800050040x>.
- Middleton, H. E. (1930). *Propriedades dos solos que influenciam a erosão do solo*. Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, 178, 16.
- Mota, J. C. A., Alves, C. V. O., Freire, A. G., de Assis Junior, R. N. (2014). Análises uni e multivariadas de indicadores de qualidade física do solo de um Cambissolo do Planalto do Apodi – CE, Brasil. *Soil and Tillage Research*, 140, p. 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.004>.

- Nunes, M. C. M., Cassol, E. A. (2008). Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, p. 2839-2845. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700030>.
- Oliveira, J. B. (2011). *Pedologia Aplicada*. (4^a ed.). FEALQ.
- Pragana, R. B., Ribeiro, M. R., Nóbrega, J. C. A., Ribeiro Filho, M. R., Costa, J. A. D. (2012). Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado piauiense. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 36, p. 1591-1600. <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500023>>.
- R Core Team (2021) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Saed-Moucheshi, A., Fasihfar, E., Hasheminasab, H., Rahmani, A., Ahmadi, A. (2013). Uma revisão sobre técnicas estatísticas multivariadas aplicadas em agricultura e ciência vegetal. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(1), p. 127-141. https://www.researchgate.net/profile/Armin_Saed.
- SANTOS, H. G. dos. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. (5^a ed.). EMBRAPA.
- Silva, M. L. N., Curi, N., Ferreira, M. M., Lima, J. M. D., Ferreira, D. F. (1999). Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de Latossolos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34, p. 2287-2298. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200016>.
- Simons, D.B., Şentürk, F. (1992). *Tecnologia de transporte de sedimentos: dinâmica da água e dos sedimentos*. Publicação de Recursos Hídricos. 5(1), 892 p.
- Singh, V. P. (1983). Soluções analíticas de equações cinemáticas para erosão num plano II. Precipitação de duração finita. *Avanços em Recursos Hídricos*, 6(2), p. 88-95. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(83\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0309-1708(83)90045-3).
- Thomaz, E. L, Fidalski, J. (2020). Erodibilidade entressulcos de diferentes solos arenosos aumenta ao longo de uma catena na Formação Arenítica Caiuá. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190064>.
- Uehara, G., Gillman, G. (1981). The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. Boulder: Westview Press. 170p. [The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. \(cabdirect.org\)](https://www.cabdirect.org/).
- Wischmeier, W.H, Mannering, JV (1969). Relação das propriedades do solo com a sua erodibilidade. *Soil Science Society of America Journal*, 33(1), p. 131-137. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300010035x>.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1978). *Prevenção de perdas por erosão pluvial: um guia para planejamento de conservação* (No. 537). Departamento de Administração da Agricultura, Ciência e Educação.
- Woolhiser, D. A., Liggett, J. A. (1967). Fluxo instável e unidimensional sobre um plano - O hidrograma ascendente. *Pesquisa de recursos hídricos*, 3(3), p. 753-771. <https://doi.org/10.1029/WR003i003p00753>.