

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO SOBRE O APORTE DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF SOIL NUTRIENT LOSS ON SEDIMENT INPUT IN A WATERSHED

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES DEL SUELO SOBRE EL APORTE DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

Vanessa Cezar Simonetti¹

Liliane Moreira Nery²

Gabriela Gomes³

Arthur Pereira dos Santos⁴

Renan Angrizani de Oliveira⁵

Darllan Collins da Cunha e Silva⁶

Resumo: A perda de solos por erosão hídrica pode causar uma série de implicações ambientais, resultando na deterioração da qualidade e quantidade de água disponível para uso humano e dos organismos vivos. Assim, este estudo objetivou analisar a possível correlação linear entre a perda de elementos químicos do solo por erosão hídrica com o eventual acúmulo deposicional de sedimentos nos leitos dos exutórios dos diferentes compartimentos de uma bacia hidrográfica. Para isso, os resultados obtidos das amostragens da análise textural do solo, dos elementos químicos dos sedimentos e dos solos, foram submetidos à análise estatística descritiva e ao teste de correlação linear de Pearson, sendo consideradas as variáveis químicas dos sedimentos e solo que tivessem correlação $\geq 0,80$ com significância ($p \leq 0,05$). O estudo demonstrou que as diferentes frações texturais do solo das sub-bacias não possuem correlações estatísticas que evidenciem uma relação linear de deposição nos exutórios dos leitos analisados, no entanto, grande parte do solo da bacia hidrográfica pode ser pouco favorável à sorção de elementos químicos com potencial contaminante devido à predominância da fração de areia no solo e no sedimento. Entretanto, ressaltam-se as significativas correlações entre os elementos do solo e sedimentos obtidos neste estudo, sugerindo fortemente que os macros elementos, como o Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), bem como os micronutrientes, como Zinco (Zn) e Manganês (Mn), além da Matéria Orgânica (MO), estão sendo carregados para os corpos d'água da bacia hidrográfica.

Palavras-chave: erosão hídrica; análise do solo; multivariada; monitoramento.

¹ Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: va_simonetti@hotmail.com

² Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: liliane.nery@unesp.br

³ Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: gabriela.gomes98@unesp.br

⁴ Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: arthur.p.santos@unesp.br

⁵ Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: renan.oliveira@prof.uniso.br

⁶ Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: darllan.collins@unesp.br

Abstract: Soil loss due to water erosion can have several environmental implications, leading to the degradation of water quality and quantity available for human and aquatic organism use. Therefore, this study aimed to analyze the linear correlation between the loss of soil chemical elements due to water erosion and the eventual deposition of sediments in the outflow channels of different compartments within a watershed. To achieve this, results from soil textural analysis, sediment chemical elements, and soil samples were subjected to descriptive statistical analysis and Pearson's linear correlation test, considering sediment and soil chemical variables with a correlation ≥ 0.80 with significance ($p \leq 0.05$). The study demonstrated that the different soil textural fractions in sub-basins do not exhibit statistically significant correlations indicating a linear relationship in the analyzed outflow channels. However, much of the soil in the watershed may be less favorable for sorption of potentially contaminating chemical elements due to the predominance of sand fraction in both soil and sediment. Nevertheless, significant correlations were observed between soil and sediment elements in this study, strongly suggesting that major elements such as Calcium (Ca), Magnesium (Mg), as well as micronutrients like Zinc (Zn) and Manganese (Mn), along with Organic Matter (OM), are being transported to the water bodies of the watershed.

Key words: water erosion; soil analysis; multivariate; monitoring.

Resumen: La pérdida de suelos por erosión hídrica puede causar una serie de implicaciones ambientales, resultando en el deterioro de la calidad y cantidad de agua disponible para el uso humano y de los organismos vivos. Así, este estudio tuvo como objetivo analizar la posible correlación lineal entre la pérdida de elementos químicos del suelo por erosión hídrica con el eventual acumulo deposicional de sedimentos en los lechos de los exutorios de los diferentes compartimentos de una cuenca hidrográfica. Para ello, los resultados obtenidos de los muestreos del análisis textural del suelo, de los elementos químicos de los sedimentos y de los suelos, fueron sometidos al análisis estadístico descriptivo y a la prueba de correlación lineal de Pearson, considerándose las variables químicas de los sedimentos y suelo que tuvieran correlación $\geq 0,80$ con significancia ($p \leq 0,05$). El estudio demostró que las diferentes fracciones texturales del suelo de las subcuencas no poseen correlaciones estadísticas que evidencien una relación lineal de deposición en los exutorios de los lechos analizados; sin embargo, gran parte del suelo de la cuenca hidrográfica puede ser poco favorable a la sorción de elementos químicos con potencial contaminante debido a la predominancia de la fracción de arena en el suelo y en el sedimento. No obstante, se resaltan las significativas correlaciones entre los elementos del suelo y sedimentos obtenidos en este estudio, sugiriendo fuertemente que los macroelementos, como el Calcio (Ca), Magnesio (Mg), así como los micronutrientes, como Zinc (Zn) y Manganese (Mn), además de la Materia Orgánica (MO), están siendo arrastrados hacia los cuerpos de agua de la cuenca hidrográfica.

Palabras clave: erosión hídrica; análisis del suelo; análisis multivariado; monitoreo.

1 INTRODUÇÃO

A perda de solos por erosão hídrica e suas consequências relacionadas à

diminuição da fertilidade do solo e da capacidade produtiva, aumento dos custos produtivos com fertilizantes, assoreamento de recursos hídricos e consequente eutrofização de reservatórios de abastecimento de água, assim como a redução da qualidade e quantidade de água disponível, têm sido objeto de estudo no âmbito global (Bowen & Johnson, 2017; Holz & Augustin, 2021; Melo et al., 2019; Sonnenberg et al., 2020; Wolka et al., 2021).

Segundo Wolka et al. (2021), estima-se que sejam perdidos anualmente, por erosão hídrica, entre 36 e 75 bilhões de toneladas de solo no mundo. Nesse sentido, a perda de solos constitui uma fonte importante de entrada de sedimentos nos corpos hídricos, sendo que o seu acúmulo em ambientes aquáticos pode reduzir as funções do ecossistema.

Os metais presentes no sedimento podem estar sob diferentes formas químicas, denominadas fases geoquímicas, devido às condições ambientais do próprio sedimento e da coluna d'água (Loureiro et al., 2012).

No ambiente aquático, o aporte de sedimentos provém de elementos-traço provenientes do intemperismo das rochas e de origem antrópica, além de nutrientes como Nitrogênio (N) e Fósforo (P), que podem ocasionar a proliferação de organismos capazes de desencadear a eutrofização do meio (Arantes et al., 2023; Cardoso-Silva et al., 2021; Frascareli et al., 2018).

Para compreender a complexidade e dinamismo envolvido no aporte de sedimentos e seu potencial acúmulo, é necessário estudar a interação entre processos naturais, físicos e antrópicos em múltiplas escalas espaciais e temporais. Em bacias hidrográficas, os rios apresentam-se como sistemas naturais dinâmicos e complexos que transferem água e sedimentos das fontes para os sumidouros (Schumm, 1977; Tuset et al., 2016). Todavia, estudos envolvendo a compartimentação de bacias hidrográficas são fundamentais (Simonetti et al., 2022a), podendo fornecer informações capazes de auxiliar no entendimento das fontes de sedimentos e suas possíveis implicações de forma pormenorizada.

Dentre os impactos antrópicos que podem alterar o fluxo de sedimentos em uma bacia e causar efeitos deletérios no meio, destaca-se o uso e cobertura da terra e a redução da cobertura vegetal de áreas de preservação permanente (Simonetti et al., 2019), a expansão de atividades agrícolas com o uso indiscriminado de agroquímicos (Silva et al., 2020), o despejo clandestino de efluentes domésticos e industriais (Souza & Gastaldini, 2014), entre outros.

A capacidade do sedimento em atuar como uma fonte ou dreno de potenciais contaminantes também depende de suas propriedades mineralógicas, grau de intemperismo, teor de MO e condições físico-químicas do meio (Rizzo et al., 2022; Frascareli et al., 2018). De acordo com Novais e Smyth (1999), a fração argila possui um importante papel na caracterização de um solo como fonte ou dreno de acordo com seu teor e constituição mineralógica.

Diante do exposto, e haja vista que o acúmulo de sedimentos antropogenicamente acelerado é amplamente conhecido como o principal impacto na redução das funções do ecossistema, este estudo buscou analisar uma eventual correlação linear entre a perda de elementos químicos do solo por erosão hídrica com o eventual acúmulo deposicional nos sedimentos dos leitos dos exutórios dos diferentes compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.

Essa bacia hidrográfica pode ser considerada uma área prioritária para o desenvolvimento de estudos e análise ambiental e estratégica na conservação dos recursos hídricos, pois em seus limites encontra-se a Represa do Ferraz e pode ser considerada uma região produtora de água, em virtude da presença de resquícius

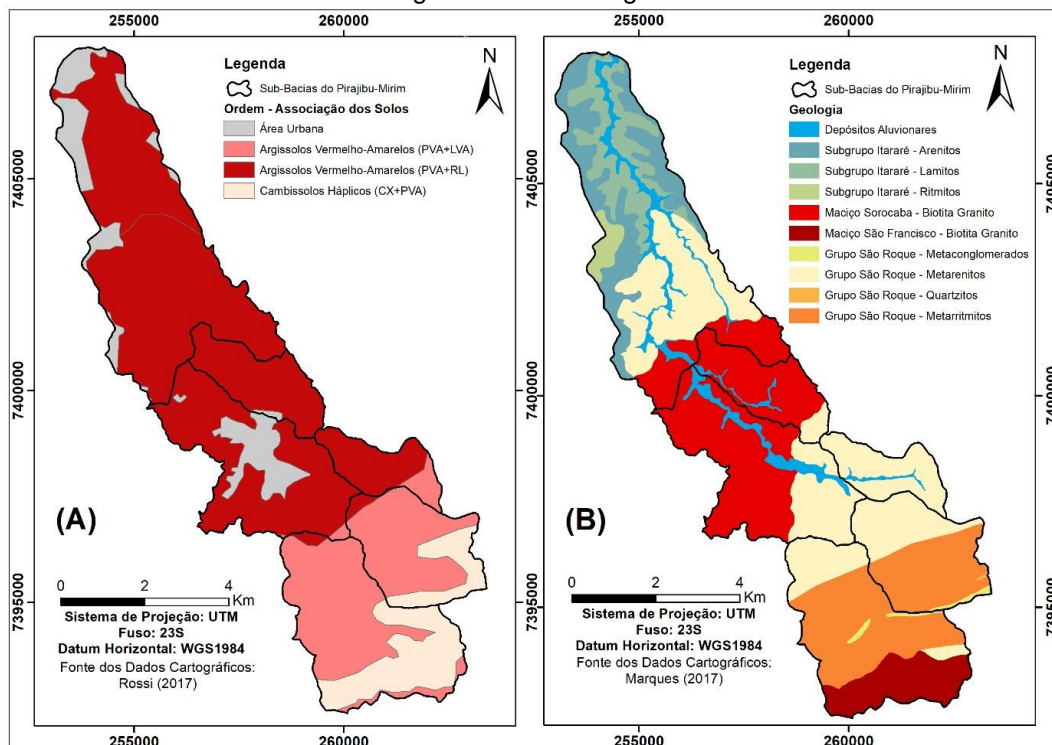
O município de Sorocaba possui clima Cfa de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado como clima subtropical com verão quente. Possui temperatura média de 20,5°C e pluviosidade média anual de 1290 mm (Climate-Data, 2022). Quanto a formação florestal, Sorocaba está inserida em uma zona de transição de Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual, além de elementos de Floresta Ombrófila Densa (Smith et al., 2014).

Os solos do trecho inferior e médio da bacia hidrográfica (Figura 2A) se caracterizam em Argissolos Vermelho-Amarelo com associação PVA+RL, sendo pouco profundo e raso e textura média; enquanto no trecho superior são encontrados Argissolos Vermelho-Amarelo (PVA+LVA), profundo e muito profundo, com textura argilosa, e Cambissos Háplicos (CX+PVA), pouco profundo e profundo, textura média/argilosa (Rossi, 2017).

Segundo o Macrozoneamento Ambiental do município de Sorocaba, a bacia do Pirajibu-Mirim pertence à macrozona com grandes restrições à ocupação e macrozona de conservação ambiental devido às suas várzeas planícies aluviais, possuindo base geológica cristalina (Lei n. 11.022, 2014).

A bacia hidrográfica contempla a represa do Ferraz, que é um importante manancial de abastecimento de água, e que corresponde a cerca de 10% da captação superficial do município, com outorga para captação de até 900 m³/h durante 24 horas/dia (Serviço Autônomo de Água e Esgoto [SAAE], 2016).

Figura 2 - A) Ordem e associação dos solos presentes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. B) Geologia da bacia hidrográfica.



Fonte: Autoria própria.

2.2 DELIMITAÇÃO DAS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS

As bases de dados utilizadas na composição deste estudo foram apoiadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sendo utilizados os critérios estabelecidos nos estudos de Simonetti et al. (2022a) para compartimentação da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. Assim, o estudo contemplou seis pontos amostrais denominados como sub-bacias numeradas de 1 a 6 (Tabela 1), cujas coordenadas apresentadas correspondem ao exutório de cada sub-bacia.

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos amostrados.

Sub-Bacias	Coordenadas planas UTM Datum Horizontal: WGS1984	Área de drenagem (km ²)
Sub1	254292 E - 7408090 N	19,94
Sub2	256307 E - 7400405 N	10,39
Sub3	256472 E - 7400699 N	4,08
Sub4	260050 E - 7398044 N	2,97
Sub5	260165 E - 7397458 N	6,60
Sub6	259728 E - 7396438 N	11,38

Fonte: Autoria própria.

2.3 COLETA E ANÁLISE QUÍMICA DOS SEDIMENTOS

A amostragem dos sedimentos superficiais foi realizada em duas campanhas representativas de cada período (seco e chuvoso - coletadas em fevereiro e julho de 2021), no leito do exutório de cada sub-bacia de forma superficial, não ultrapassando a profundidade 0-10 cm.

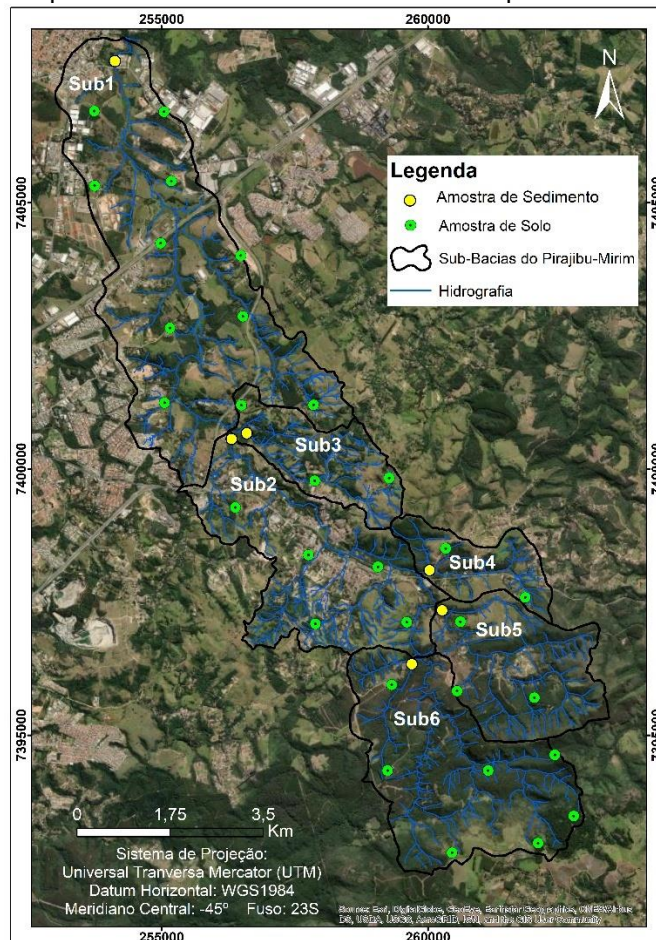
Os procedimentos de coleta seguiram as recomendações da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (Filizola et al., 2006), sendo utilizada uma pá de inox. Os pontos amostrados nos exutórios foram coletados próximos à margem, uma vez que a distribuição dos sedimentos pode ocorrer em bandas estreitas ao longo do canal e sob a forma de acumulações nos locais de baixa energia (Filizola et al., 2006).

Os sedimentos foram analisados de acordo com Raji et al. (2001), contemplando os seguintes parâmetros: Ca, P, K, Cu, Fe, Mg, Mn, Zn e MO. Para tanto, os elementos foram analisados de acordo com a fração trocável, ou seja, os elementos metálicos adsorvidos fracamente que são retidos na superfície sólida por interações eletrostáticas consideradas relativamente fracas e, portanto, podem ser liberados por meio de troca iônica (Alves-Neto et al., 2014), sendo a fração de maior interesse ambiental devido a caracterização das formas mais móveis dos metais no meio, e que apresentam um maior potencial de lixiviação (Jalali & Hemati, 2013).

2.4 ANÁLISE TEXTURAL DOS SEDIMENTOS E DO SOLO DAS SUB-BACIAS DO RIO PIRAJIBU-MIRIM

As amostragens foram realizadas em duas campanhas tanto para a análise textural dos sedimentos como a do solo. A amostragem do solo foi conduzida por meio de 30 pontos amostrais (Figura 3) pré-definidos que fossem representativos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim e que contemplassem todas as sub-bacias definidas de acordo com Simonetti et al. (2022a). As coletas de solo foram realizadas na profundidade de 0-20 cm, sendo retirados 500g de solo com um trado holandês confeccionado em aço inox.

Figura 3 - Distribuição dos pontos amostrais de solo e sedimento para fins de caracterização textural.



Fonte: Autoria própria.

As análises texturais relacionadas à granulometria foram executadas conforme metodologia da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária ([Embrapa], 2011), de acordo com o método da pipeta com fracionamento das porções de areia grossa, com diâmetro de partícula compreendido entre 1,00 e 0,50 mm; areia fina, com diâmetro entre 0,21 e 0,10 mm; silte com 0,05 e 0,002 mm e argila com diâmetro inferior a 0,002 mm.

O grupamento textural foi realizado de acordo com a classificação estabelecida segundo Embrapa (Santos, et al., 2006), que estabelece Textura Arenosa para classes que compreendem areia e areia franca; Textura Média para classes contendo menos de 35% de argila e mais de 15% de areia; Textura Argilosa para

classes que contenham entre 35% e 60% de argila; Textura Muito Argilosa para classes com mais de 60% de argila e Textura Siltosa para classes inferiores a 35% de argila e 15% de areia.

2.5 PERDA DE NUTRIENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM

Utilizou-se a perda de nutrientes do solo estimada por Simonetti et al. (2022b) (Tabela 2), que posteriormente compuseram a análise de correlação linear entre os elementos do solo perdidos por erosão e os elementos dos sedimentos dos leitos dos exutórios.

Tabela 2 - Perda anual de atributos do solo das sub-bacias do Pirajibu-Mirim.

Perda em kg/ano por sub-bacia do rio Pirajibu-Mirim						
Atributos do solo	Sub1	Sub2	Sub3	Sub4	Sub5	Sub6
Ca	4.703,5	9.794,4	5.721,0	1.221,6	3.911,4	3.173,4
P	150,8	184,7	92,6	14,7	25,8	22,8
MO	186.293,8	194.904,2	67.337,2	47.202,3	82.020,6	96.330,8
K	700,3	1.144,0	522,3	168,7	272,4	249,6
Al	478,9	115,9	40,2	117,0	244,7	400,2
Cu	95,0	76,3	28,7	28,8	45,6	40,2
Fe	5.210,9	3.559,0	1.581,6	1.119,5	1.451,8	2.208,0
Mg	705,6	1.225,3	492,7	187,6	353,4	473,1
Mn	260,3	560,9	222,5	119,9	80,2	79,4
Zn	234,7	366,6	128,3	74,9	163,5	43,9

Fonte: Simonetti et al. (2022b).

2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS EMPREGADAS NO ESTUDO

As unidades das variáveis utilizadas na composição da análise bivariada e multivariada foram padronizadas de acordo com \bar{x} e σ , eliminando o viés decorrente de diferentes escalas, uma vez que são atribuídos os mesmos pesos para cada variável (Simonetti et al., 2019) (Equação 1).

$$z = (xi - \bar{x})/\sigma \quad (1)$$

Sendo: z é a variável padronizada; xi é a variável a ser padronizada; \bar{x} é o valor médio, e σ é o desvio padrão.

Após a normalização dos dados, estes foram submetidos ao teste de correlação linear de Pearson (r), que permite avaliar o grau de inter-relação e associação entre duas variáveis, pois varia de -1 a 1 indicando, respectivamente, uma correlação perfeita negativa ou positiva, enquanto o valor zero (0) indica que não há correlação entre as variáveis (Figueiredo Filho & Silva Junior, 2009).

O teste foi realizado no *software* Past 4.09 (Hammer et al., 2001), onde somente foram consideradas as variáveis do sedimento e do solo que tivessem o intervalo de confiança maior ou igual a 95% ($p \leq 0,05$) para cada período avaliado, considerando para efeitos deste estudo o valor médio de cada período obtido pela

réplica das campanhas do período chuvoso e seco. A significância da correlação foi realizada pelo Teste T Bicaudal (Equação 2).

$$t = r\sqrt{(n - 2)/(1 - r^2)} \quad (2)$$

Sendo: $n - 2$ é o grau de liberdade; r é coeficiente de correlação Pearson; e r^2 é coeficiente de determinação.

Somente foram consideradas as correlações entre as variáveis dos sedimentos com os nutrientes do solo, assim como para a análise textural que obtiveram coeficiente de correlação ($r \geq 0,8$), por ser considerada uma forte correlação (Bhutiani et al., 2016) e, para efeitos deste estudo, que poderiam melhor representar os reflexos da perda de nutrientes do solo nos sedimentos dos exutórios das sub-bacias analisadas.

De acordo com Bhutiani et al. (2016), a associação de elementos metálicos com forte correlação é sugestiva de fontes de poluição semelhantes. A tabela de correlação para cada um dos períodos (chuvoso e seco) foi elaborada a partir da função elipse, evidenciando os coeficientes de correlação como elipses variando de tamanho de acordo com o grau de correlação, segundo Schilling (1984), disponível no *software* Past 4.09 (Hammer et al., 2001).

A análise multivariada foi realizada por meio da análise hierárquica de conglomerados (AHC), utilizando medidas de distâncias que pudessem expressar as similaridades/dissimilaridades entre as sub-bacias quanto à perda de nutrientes do solo e as variáveis encontradas nos sedimentos dos exutórios, bem como para a análise textural.

Para tanto, somente foram contempladas na análise as variáveis que seguiram os critérios estabelecidos na etapa anterior quanto à correlação ($r \geq 0,8$) e significância ($p \leq 0,05$). As medidas de distâncias utilizadas na AHC foram obtidas a partir da distância euclidiana, na qual a distância entre duas observações i e j refere-se à raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre os pares de observações i e j para todas as variáveis (p) (Fávero et al., 2009) (Equação 3 e 4).

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (3)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(X_{i1} - X_{j1})^2 + (X_{i2} - X_{j2})^2 + \dots + (X_{ip} - X_{jp})^2} \quad (4)$$

Sendo: X_{ik} é o valor da variável k em relação à observação i ; e X_{jk} é a representação da variável k para a observação j .

Portanto, esta abordagem parte do pressuposto de que quanto menor a distância mais similares serão as sub-bacias, sendo que o agrupamento aglomerativo resultará em um dendrograma. O algoritmo utilizado foi a média não ponderada de pares de grupos – *Unweighted Pair-Group Methods with Arithmetic Average* (UPGMA), cujos dendrogramas (*cluster*) são unidos com base na distância média entre todos os membros dos dois grupos (i e j) e (k), na qual a distância entre eles é representada pela Equação 5.

$$d(ij)k = \text{média}\{d_{ik}, d_{jk}\} \quad (5)$$

Para melhor elucidação dos resultados foi utilizado o agrupamento bidirecional, também utilizado por Idris et al. (2017) e Koki et al. (2020). Tal agrupamento foi selecionado para que houvesse melhor visualização das similaridades entre as sub-

bacias hidrográficas analisadas e as variáveis do sedimento representadas por uma matriz de dados com cores que satisfazem os valores de cada variável padronizada pelo score Z.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os maiores valores de MO no período chuvoso foram encontrados na Sub4 (25180 mg/kg), enquanto o menor valor foi encontrado na Sub6 (5110 mg/kg) (Tabela 3). Contudo, no período seco os valores encontrados foram superiores ao período chuvoso, sendo os maiores valores encontrados na campanha de junho de 2021, na qual a Sub1 obteve 58510 mg/kg (Tabela 3).

Os resultados evidenciam a influência da sazonalidade na concentração de MO dos sedimentos, no entanto, o padrão de concentração de MO nos exutórios não foi semelhante em ambos os períodos, o que sugere que os diferentes usos da terra interferem na sedimentação, além do regime hídrico.

Tabela 3 - Dados quantitativos dos elementos dos sedimentos dos exutórios das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim. As unidades são apresentadas em mg/kg.

Variáveis	Amplitude Chuvoso	\bar{x}	D P	C V (%)	Amplitude Seco	\bar{x}	D P	C V (%)	CONAMA 454/2012
MO	25180 - 5110	16 186	5 077	3 1,4	58510 - 6690	2 447	12 197	4 9,9	-
P	86,24 - 6,70	34 ,70	2 6,56	7 6,5	181,65 - 6,46	51 ,08	5 1,84	1 01,5	2000
K	2,81 - 1,19	1, 94	0 ,35	1 8,2	3,10 - 0,80	1, 57	0 ,45	2 8,8	-
Ca	142,80 - 18,05	51 ,77	2 6,98	5 2,1	71,50 - 12,78	44 ,27	1 7,59	3 9,7	-
Mg	16,50 - 4,68	7, 75	3 ,60	4 6,4	9,24 - 4,62	6, 57	1 ,02	1 5,5	-
Cu	1,98 - 0,56	1, 39	0 ,43	3 0,8	2,77 - 0,84	1, 86	0 ,37	1 9,7	197
Fe	285,00 - 45,00	14 4,08	5 8,04	4 0,3	362,10 - 6,68	17 6,36	4 4,73	2 5,4	-
Mn	64,32 - 2,35	40 ,83	1 6,91	4 1,4	77,90 - 7,56	46 ,56	1 9,14	4 1,1	-
Zn	4,16 - 0,60	1, 52	0 ,63	4 1,4	4,70 - 0,61	2, 09	0 ,97	4 6,4	315

Fonte: Autoria própria.

Legenda: \bar{x} = Média. DP = Desvio Padrão. CV = Coeficiente de Variação.

A Sub3 apresentou os maiores teores de P em ambas as campanhas, chuvosa e seca, enquanto a Sub6 registrou os menores valores em ambos os períodos (Tabela 3).

O aumento nas concentrações dos exutórios das sub-bacias analisadas no período seco sugere que as entradas de P podem estar aportando os tributários a partir de fontes pontuais ou então a baixa vazão concentrou esses elementos. Outro aspecto que se deve ressaltar é que as sub-bacias mantiveram o padrão quanto aos valores obtidos em ambos os períodos.

O K apresentou os valores mais elevados na Sub6 (2,81 mg/kg) na estação chuvosa, enquanto os menores valores foram obtidos pela Sub1 (1,19 mg/kg) (Tabela 3). No período seco, o valor mais expressivo foi obtido pela Sub1 na campanha de julho, com 3,10 mg/kg, enquanto o menor valor foi encontrado na Sub5 (0,80 mg/kg) (Tabela 3).

A Sub1 obteve uma dinâmica diferente de acordo com a sazonalidade, partindo do menor valor entre as sub-bacias analisadas no período chuvoso para o valor mais expressivo no período seco, sugerindo que a baixa vazão do exutório concentrou o elemento advindo à montante.

No período chuvoso, o Ca foi encontrado em maior quantidade na Sub1 (142,80 mg/kg), enquanto o menor valor foi obtido pela Sub5 (18,05 mg/kg) (Tabela 3). No período seco o valor mais expressivo foi de 71,50 mg/kg, obtido pela Sub2, enquanto o menor valor foi encontrado na Sub6 (12,78 mg/kg) (Tabela 3).

Diferente dos elementos MO, P e K, o Ca apresentou maiores valores no período chuvoso, sugestivo de que o carreamento deste elemento seja mais expressivo, fato corroborado pelos estudos de Simonetti et al. (2022b), que apontaram o Ca com as maiores perdas anuais na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.

Os valores obtidos para o Mg foram mais elevados na Sub1 no período chuvoso, na qual a sub-bacia apresentou 16,50 mg/kg (Tabela 3). No período seco, o maior valor foi para a Sub6 (9,24 mg/kg) e o menor valor foi encontrado na Sub4 (4,62 mg/kg). Os resultados acerca do Mg não apresentaram um padrão sazonal, variando significativamente entre os períodos e sub-bacias. No entanto, assim como o Ca, o elemento apresentou valores mais elevados no período chuvoso, sugestivo do carreamento por deflúvio superficial.

O Cu apresentou o maior valor no período chuvoso para a Sub3 (1,98 mg/kg), enquanto o menor valor foi obtido na Sub1 (0,56 mg/kg) (Tabela 3). No período seco a Sub5 obteve o valor mais elevado na campanha (2,77 mg/kg), enquanto o menor valor foi encontrado na Sub1 (0,84 mg/kg). Portanto, a maior concentração de Cu nos sedimentos dos exutórios aconteceu no período de estiagem.

O Fe foi encontrado em maior quantidade no período chuvoso na Sub4 (285,00 mg/kg) e o menor valor foi na Sub6 (45,00 mg/kg) (Tabela 3). No período seco a Sub5 obteve a maior concentração (362,10 mg/kg), enquanto a Sub6 obteve o menor valor (76,68 mg/kg) (Tabela 3). Observou-se que somente as sub-bacias 1 e 6 apresentaram o mesmo comportamento em ambos os períodos, ou seja, os menores valores em todas as campanhas.

O Mn apresentou os valores mais elevados na Sub2 (64,32 mg/kg), na campanha do período chuvoso, enquanto a Sub3 obteve os menores valores (2,35 mg/kg) (Tabela 3). No período seco, a Sub1 deteve o valor mais expressivo, com 77,90 mg/kg (Tabela 3). Observou-se que apenas a Sub6 apresentou o mesmo comportamento frente à sazonalidade, em ambas as campanhas.

Os valores de Zn no período chuvoso foram mais pronunciados na Sub3, com 4,16 mg/kg e o menor foi encontrado na Sub6 (0,60 mg/kg) (Tabela 3). No período seco, o maior valor foi observado na Sub1 (4,70 mg/kg) e o menor valor foi encontrado na Sub6 (0,60 mg/kg) (Tabela 3). Portanto, novamente a Sub6

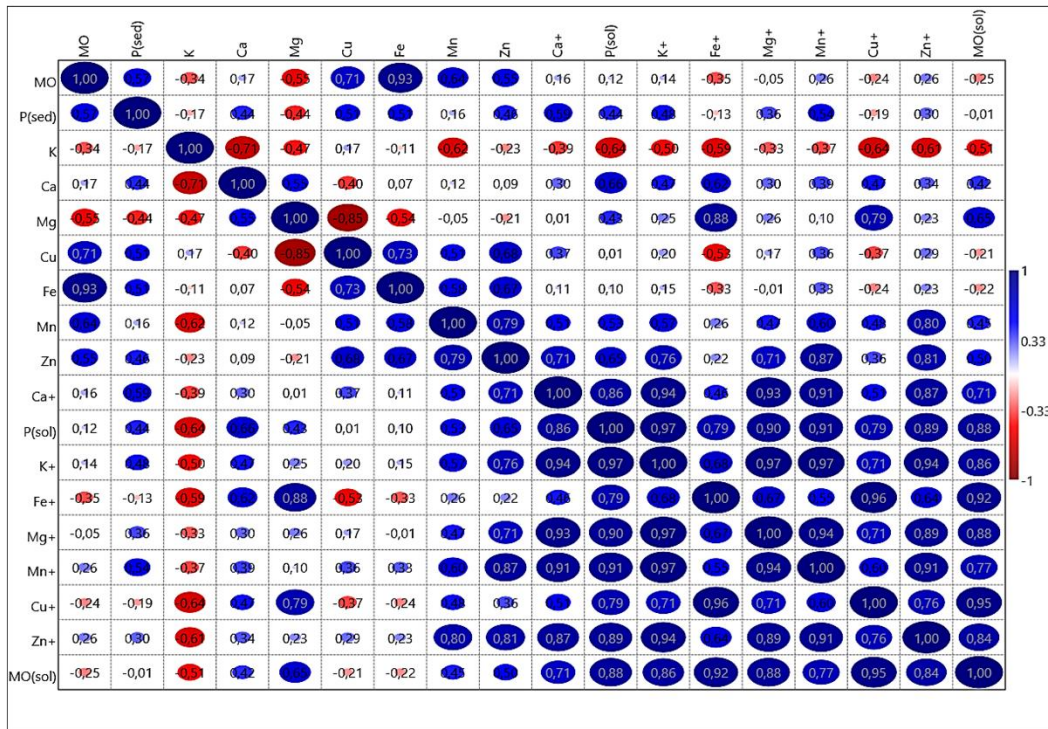
apresentou os menores valores em todos os períodos analisados.

3.1 CORRELAÇÃO ENTRE OS SEDIMENTOS DOS EXUTÓRIOS COM A PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO

No período chuvoso, todas as correlações obtidas de acordo com os critérios estabelecidos foram positivas (Figura 4), sendo que o Zn do sedimento foi o elemento que se correlacionou positivamente com duas variáveis do solo, dentre elas, o próprio Zn ($r = 0,81$; $p = 0,05$) (Tabela 4), sugerindo que o elemento tem sido aportado diante da perda de solos no período chuvoso.

Na Figura 5, as colunas são representadas pelas sub-bacias e as linhas pelas variáveis de nutrientes do solo e sedimentos que compõe a AHC. As cores representam os valores padronizados pelo Z escore e os sinais de (+) indicam os cátions do solo. Dessa forma, é possível verificar que a Sub2 se diferencia das demais sub-bacias por apresentar os maiores valores dos íons analisados, com exceção do Fe e Mg, que prevaleceram na Sub1 como fortemente correlacionados, formando um grupo isolado das demais variáveis (à direita da Figura 5). As dissimilaridades mais significativas foram encontradas nas sub-bacias 3 e 4, que por sua vez, se assemelharam à Sub5, formando um subgrupo que ficou mais próximo da Sub6.

Figura 4 - Correlação de Pearson do período chuvoso entre as variáveis dos sedimentos do exutório das sub-bacias e as variáveis do solo.



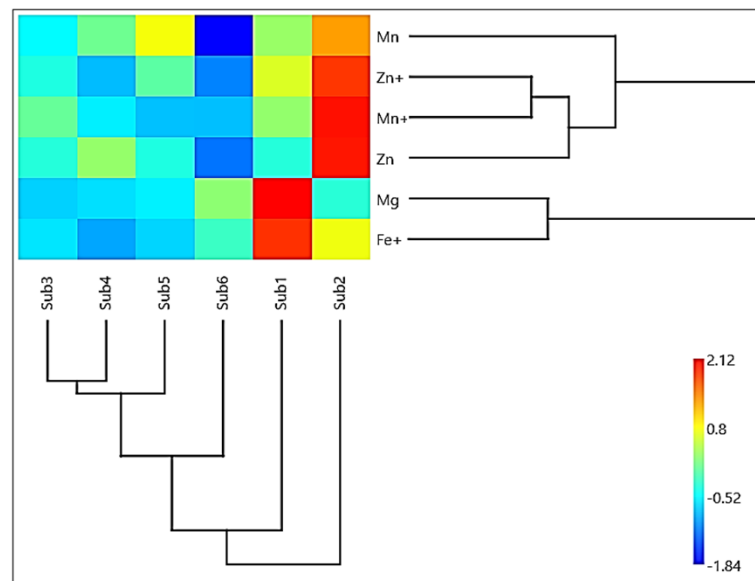
Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Correlações significativas do período chuvoso entre as variáveis de sedimento e solo obtidas no período chuvoso.

Variável Sedimento	Variável Solo	Correlação (r)	Significância (p ≤ 0,05)
Mg	Fe	0,88	0,02
Mn	Zn	0,80	0,02
Zn	Zn	0,81	0,05
Zn	Mn	0,87	0,05

Fonte: Autoria própria.

Figura 5 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período chuvoso.



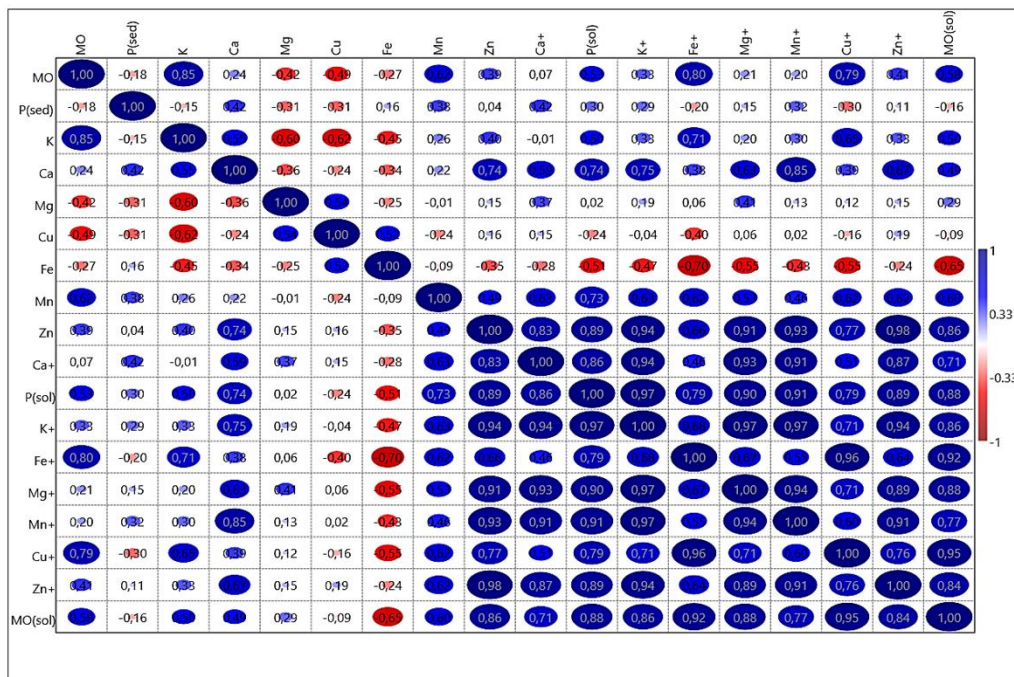
Fonte: Autoria própria.

Os resultados encontrados no período chuvoso são sugestivos do carreamento de sedimentos à montante da Sub 2, que pode ter ocorrido por meio de fontes difusas ou mesmo pontuais, e então carreadas para o trecho inferior da bacia, se concentrando nas sub-bacias 1 e 2.

No período seco as correlações foram superiores às do período chuvoso, sugerindo um aumento nas concentrações de MO no sedimento, que se correlacionou com o Fe do solo, enquanto o Ca apresentou correlação com o Mn do solo, e o Zn do sedimento obteve o maior número de correlações, inclusive as mais significativas, conforme ilustrado na Tabela 5 ($p \leq 0,05$), também observado na Figura 6.

Dentre as correlações do Zn, destaca-se a correlação entre o Zn do sedimento e Zn do solo ($r = 0,98$; $p < 0,01$), sendo um forte indicativo de deposição do sedimento no período seco que pode ser atribuído à menor vazão dos tributários no período de estiagem. O agrupamento das variáveis correlacionadas com as respectivas sub-bacias no período seco é apresentado na Figura 7.

Figura 6 - Correlação de Pearson do período seco entre as variáveis químicas dos sedimentos do exutório das sub-bacias e os elementos do solo.



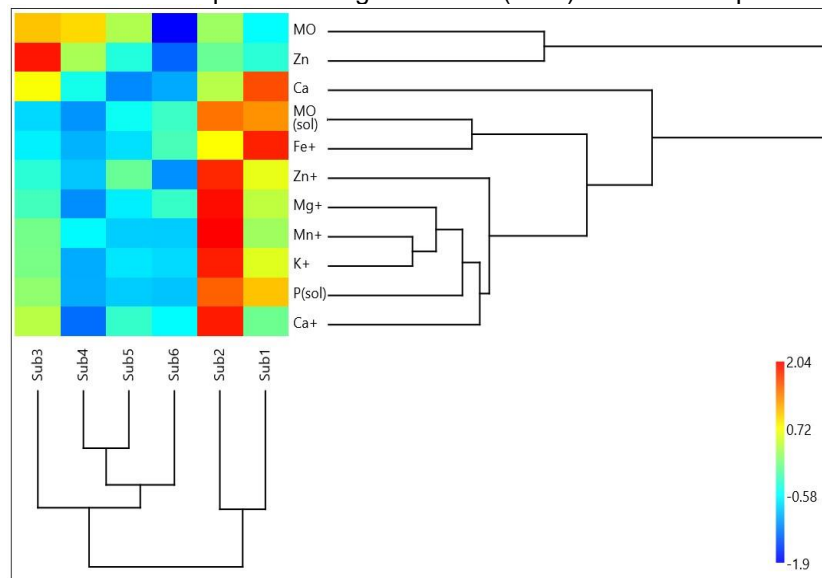
Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Correlação entre as variáveis de sedimento e solo obtidas no período seco.

Variável Sedimento	Variável Solo	Correlação r	Significância (p ≤ 0,05)
MO	Fe	0,80	0,05
Ca	Mn	0,85	0,03
	Ca	0,83	0,04
Zn	P	0,89	0,02
	K	0,94	0,01
	Mg	0,91	0,01
	Mn	0,93	0,01
	Zn	0,98	<0,01
	MO	0,86	0,03

Fonte: Autoria própria.

Figura 7. Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período seco.



Fonte: Autoria própria.

No período seco, verifica-se (à direita da Figura 7) que a Sub1 possui baixos valores de MO e Zn nos sedimentos de modo que essas variáveis separam os dois principais grupos de sub-bacias, uma vez que os maiores valores de MO e Zn foram obtidos pela Sub3.

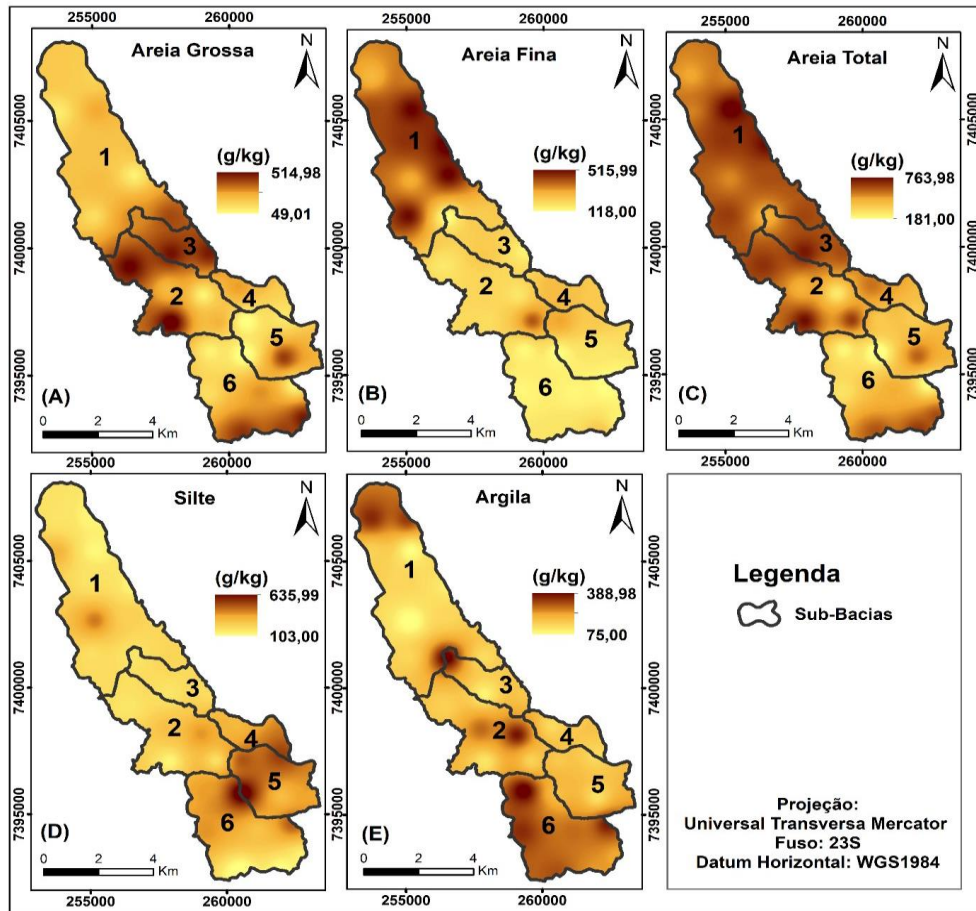
Para o grupo formado pelas sub-bacias 1 e 2 é possível verificar elevados valores de Ca (sedimento), MO e Fe do solo para a Sub1, e valores intermediários dos demais elementos representados à direita da Figura 7, enquanto a Sub2 apresenta elevados valores de MO e para todos os demais íons do solo (Zn, Mg, Mn, K, P e Ca), substanciando a aglutinação das sub-bacias 1 e 2 e distanciando-as das demais. Assim como no período chuvoso, a Sub3 apresentou maior dissimilaridade dentre as sub-bacias, enquanto as sub-bacias 4 e 5 se assemelharam e foram aglutinadas à Sub6. Ainda é possível constatar que as sub-bacias 1 e 2 apresentam as maiores correlações.

De acordo com os resultados (Figura 8A), é possível verificar que a Areia Grossa está predominantemente concentrada na porção central da bacia, assim como nas porções ao Sul das sub-bacias 5 e 6, sendo obtido um valor médio de 250 g/kg ($\sigma = 90$). A Areia Fina (Figura 8B) apresentou predominância dos maiores valores na Sub1, predominando os menores valores na Sub6. O valor médio obtido foi de 267 g/kg ($\sigma = 97,37$).

A Areia Total (Figura 8C) foi a mais expressiva dentre as frações, com os valores mais elevados predominantes nas sub-bacias 1 e 2 (com exceção da região central). O valor médio obtido foi de 517 g/kg ($\sigma = 107$). Os teores de Silte (Figura 8D) foram mais expressivos nas sub-bacias 4, 5 e 6, com valor médio de 276,45 g/kg ($\sigma = 85$).

A Argila (Figura 8E) correspondeu à menor parcela dentre as frações texturais distribuídos na porção Norte da Sub1 e na divisa com a Sub3. Elevados valores também foram encontrados à Oeste da Sub2 e predominantemente na Sub6, enquanto os menores valores foram encontrados na Sub1, nas suas faixas mais centrais. O valor médio foi de 206 g/kg ($\sigma = 59$).

Figura 8 - Distribuição espacial das frações texturais do solo das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 6 é possível verificar que os períodos amostrados possuem comportamentos distintos quanto à classe textural, evidenciando que a sazonalidade influencia no acúmulo de sedimentos dos exutórios. Na Sub1, no período chuvoso, a fração de areia representou 87,30% das classes texturais, com predominância de Areia Grossa. Já no período seco, os teores de Areia Grossa representaram 31,30%, a fração de Areia Fina. Contudo, a classificação textural da Sub1 manteve-se arenosa em ambos os períodos.

Tabela 6 - Valores quantitativos (em g/kg) das classes texturais dos exutórios das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim.

Campanha - Fevereiro de 2021 (Período Chuvoso)						
Sub-Bacias	Areia			Argila	Silte	Textura do Solo
	Grossa	Fina	Total			
(g/kg)						
Sub1	693	180	873	89	38	Arenosa
Sub2	706	127	833	90	77	Arenosa
Sub3	107	143	250	279	471	Média
Sub4	515	194	709	114	177	Arenosa
Sub5	349	382	731	83	186	Arenosa
Sub6	588	196	785	47	168	Arenosa
Mín	107	127	250	47	38	--
Máx	706	382	873	279	471	--
Média	493	204	697	117	186	--
DP	230	92	227	82	152	--
Campanha - Julho de 2021 (Período Seco)						
Sub-Bacias	Areia			Argila	Silte	Textura do Solo
	Grossa	Fina	Total			
(g/kg)						
Sub1	313	329	642	93	265	Arenosa
Sub2	39	302	341	215	444	Média
Sub3	549	148	697	154	149	Média
Sub4	260	343	603	98	299	Arenosa
Sub5	154	250	404	177	419	Média
Sub6	325	105	430	109	461	Arenosa
Mín	39	105	341	93	149	--
Máx	549	343	697	215	461	--
Média	273	246	520	141	340	--
DP	173	99	146	49	123	--

Fonte: Autoria própria.

A Sub2, no período chuvoso, apresentou 83,3% de teores de Areia Total, na qual a fração de Areia Grossa correspondeu a 70,6%. No período seco, os teores de Areia Total tiveram uma redução de 144,3%. A Argila apresentou um incremento de 138,9%, enquanto o Silte obteve um aumento de 476,6%. Diante da redução da Areia Total no período chuvoso e aumento das frações de Argila e Silte, a classificação textural do sedimento da Sub2 passou de Arenosa para Média.

No período chuvoso, a Sub3 apresentou 47,1% de Silte. No período seco, a Areia Total correspondeu a 69,7%, a Argila reduziu 81,2%, enquanto o Silte obteve uma redução de 216,1%. Embora tenha havido um aumento da fração de Areia Total na campanha do período chuvoso, a sub-bacia manteve sua classificação textural Média.

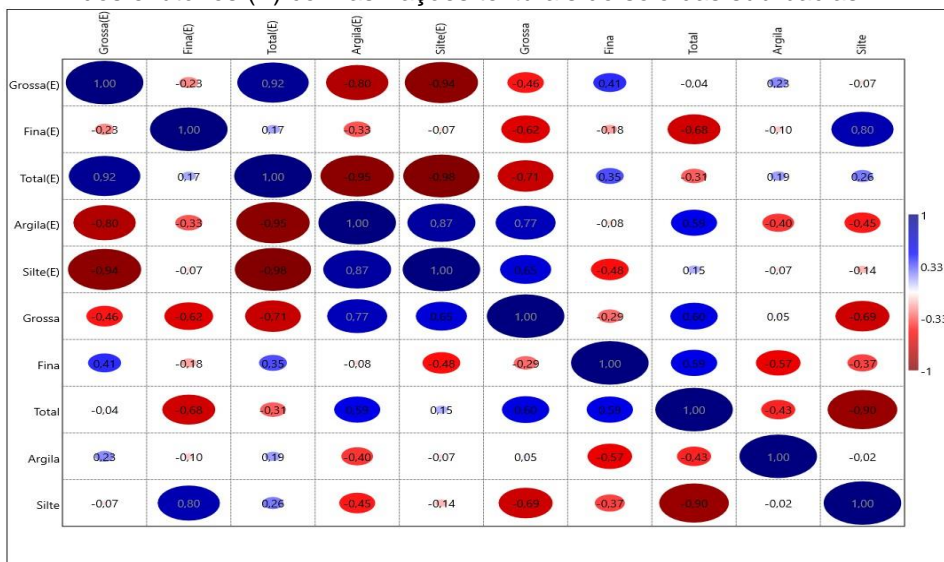
A Sub4 apresentou 70,9% de Areia Total no período chuvoso e no período seco a Areia Total representou 60,3%. O Silte foi a classe que sofreu a maior alteração, com um acréscimo de 68% no período seco. No entanto, as alterações nas frações minerais não foram suficientes para alterar a classificação textural, mantendo a Sub4 classificada com textura Arenosa em ambos os períodos.

No período chuvoso, a Sub5 apresentou 73,1% das frações texturais de Areia Total e no período seco a Areia Total foi de 40,4%. No período seco a fração de Argila obteve um aumento de 113,3%, enquanto o Silte teve um aumento de 80,9%. Diante das alterações das frações texturais, a Sub5 passou de textura Arenosa no período chuvoso para textura Média no período seco.

As reduções mais expressivas da Sub6 foram na fração de Areia Total, passando de 78,4% no período chuvoso para 43% no período seco. Já a fração de Argila passou de 4,7% no período chuvoso para 10,9% no período seco e a de Silte de 16,8% para 46,1%; no entanto, a classificação textural permaneceu a mesma em ambos os períodos (Arenosa).

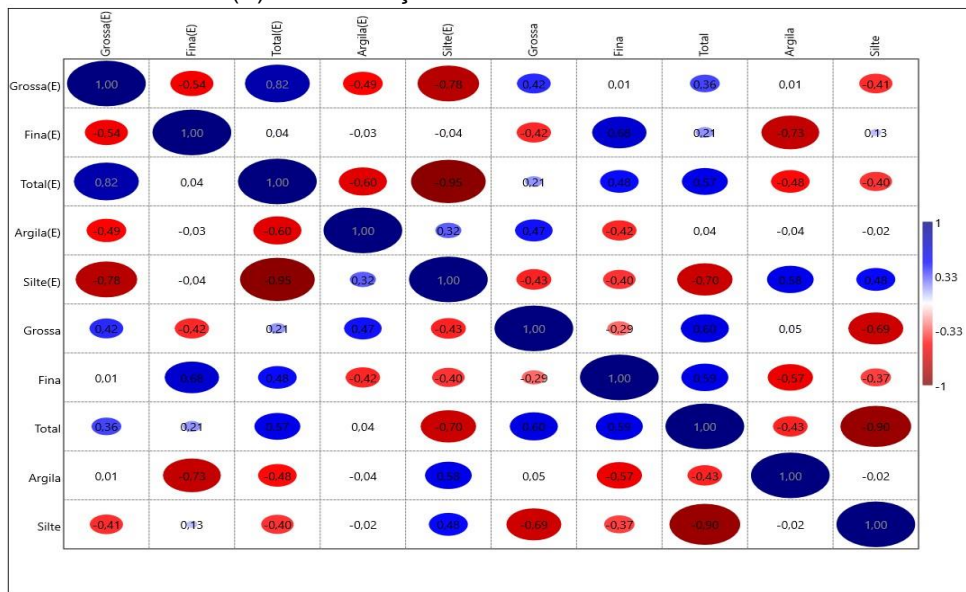
De modo a verificar possíveis correlações significativas entre as frações texturais dos sedimentos dos exutórios (E) nos diferentes períodos (chuvoso e seco) com as frações do solo analisadas nas sub-bacias é apresentada a Figura 9. Analogamente ao período chuvoso, também não foram encontradas correlações significativas no período seco, conforme pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 9. Correlação de Pearson do período chuvoso entre as frações texturais dos sedimentos dos exutórios (E) com as frações texturais do solo das sub-bacias.



Fonte: Autoria própria.

Figura 10 - Correlação de Pearson do período seco entre as frações texturais dos sedimentos dos exutórios (E) com as frações texturais do solo das sub-bacias.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos neste estudo revelaram que as partículas de solo podem estar aportando os cursos de água analisados, embora a estatística utilizada não tenha comprovado eventual relação linear. Os dados representados pelas frações mineralógicas do solo possuem intrínsecas relações de dependência espacial, como abordado nos estudos de Cambardella et al. (1994) e Zhao et al. (2016). Portanto, o solo é considerado um sistema complexo resultante de diversos fatores e interações (Cunha et al., 2016; Freitas et al., 2014).

Sendo assim, são recomendados estudos pormenorizados que avaliem a dependência espacial das diferentes frações texturais do solo e sua possível deposição na represa que abastece parte da população de Sorocaba, uma vez que esses ambientes lânticos favorecem o acúmulo deposicional de partículas que podem comprometer a qualidade e a quantidade de água desse importante reservatório de água para abastecimento público. São diversos os estudos que avaliaram os sedimentos em reservatórios de abastecimento público (Cardoso-Silva et al., 2021; Frascareli et al., 2018; Melo et al., 2019; Silva et al., 2016).

De acordo com Frascareli et al. (2018), os sedimentos superficiais podem reter os elementos potencialmente contaminantes e fornecer um registro das atividades antrópicas que afetam o ambiente aquático, dependendo das condições ambientais. Cardoso-Silva et al. (2021) avaliaram sete reservatórios no estado de São Paulo, e constataram um enriquecimento moderado de Mn no reservatório de Rio Grande associado a águas residuais municipais e processos erosivos. Os autores Cardoso-Silva et al. (2021) também constataram um elevado enriquecimento por Cu nos sedimentos cujas fontes podem ser oriundas da composição de algicidas (sulfato de cobre), atividades industriais, ou migração vertical envolvendo o transporte coloidal com aluminofilossilicatos.

O Cu possui forte complexação e quelação com as substâncias orgânicas, portanto, elevados valores de MO podem reduzir a quantidade de Cu disponível (Baldotto & Baldotto, 2014), fato que foi corroborado pelo presente estudo, haja vista que o Cu não foi detectado com correlações significativas em nenhuma campanha.

A MO do sedimento se correlacionou linearmente apenas no período chuvoso com o Fe do solo. Estudos realizados por Oliveira e Nascimento (2006) avaliaram 13 classes de solos do Estado de Pernambuco sob diferentes coberturas (contempladas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos), incluindo os solos presentes na bacia hidrográfica objeto deste estudo, e constataram que os maiores teores de Fe, potencialmente disponíveis, estão ligados à MO devido às significativas correlações apresentadas com o carbono orgânico do solo, com coeficiente de correlação igual a 0,64 e subsuperficial igual a 0,99 (ao nível de significância testados respectivamente a 5% e 1%). Do mesmo modo, o Mn também apresentou uma elevada afinidade com a MO, uma vez que os autores encontraram os maiores teores de Mn ligado à MO no horizonte superficial nas zonas de mata.

No período chuvoso, o Fe do solo apresentou forte correlação com o Mn do sedimento ($r = 0,88$; $p = 0,02$). Estudos realizados por Coringa et al. (2016), que também encontraram correlação de Pearson significativa para esses elementos, sugerem que a adsorção do Fe ocorra na forma de precipitado de óxidos/hidróxidos de Fe. Assim, a precipitação de óxidos hidratados de Fe está associada com o transporte e a disponibilidade de metais traço, que por sua vez, influenciarão as trocas na interface água-sedimento.

Vale destacar que a MO foi o elemento do solo encontrado em maior abundância quanto à perda por erosão (em kg/ano) na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, cujas perdas foram superiores a todos os outros elementos analisados, sendo mais expressivas nas sub-bacias 1 e 2. No entanto, provavelmente a redução da vazão dos afluentes analisados no período seco aumentou a concentração de MO nos sedimentos, principalmente relacionados às frações coloidais destes. Fontes et al. (2001) desenvolveram uma revisão acerca da eletroquímica das partículas coloidais com a mineralogia de solos intemperizados e verificaram, nos estudos de Stumm (1992), que a hidroxilação da superfície dos coloides possibilita a formação e o desenvolvimento de cargas variáveis nos coloides. Ressalta-se que as sub-bacias 1 e 2 estão localizadas a jusante da zona urbana (Figura 2), e as elevadas concentrações de MO observadas (Tabela 2) podem estar associadas à contribuição de águas residuais.

Entretanto, as frações texturais do solo mapeadas nos diferentes compartimentos trazem à luz os possíveis reflexos decorrentes de ações antrópicas, uma vez que as frações predominantes encontradas, principalmente nas Sub-Bacias 1 e 2, são compostas por areia, podendo assim haver uma intensa lixiviação de íons na solução do solo e maior potencial de percolação de contaminantes.

Estudos realizados por Silva et al. (2006) em um Argissolo, evidenciaram que a interação entre os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos com o solo ocorre devido à MO aderida às suas partículas, assim, essa interação aumenta de acordo com a superfície de contato da partícula, ou seja, as interações são maiores nos argilominerais.

Portanto, as frações predominantes de areia na bacia hidrográfica, assim como as frações texturais dos sedimentos nos exutórios das sub-bacias classificadas como arenosas, podem reduzir a capacidade de adsorção de alguns contaminantes, facilitando sua liberação na coluna d'água conforme alterações no meio, como variações de pH e potencial redox.

Além disso, essa característica textural (Santos et al., 2025) favorece a percolação para camadas mais profundas, com risco de contaminação do lençol freático, atingindo tanto poços outorgados quanto poços caipiras, comuns em áreas rurais e muitas vezes sem regularização.

De acordo com Santos et al. (2008), as características e as propriedades do solo também exercem grande influência nas formas e no grau de labilidade do fósforo. Ao analisar a distribuição espacial da fração de Areia Total (Figura 8C) e da fração de Argila (Figura 8E), observa-se que as sub-bacias 2 e 3 apresentam predominância de Areia Total, além de concentrações mais elevadas de P nos sedimentos de seus respectivos exutórios. Do mesmo modo, as sub-bacias com predominância da fração Argila, como as sub-bacias 5 e 6, obtiveram os menores valores de P tanto no período seco quanto no chuvoso.

Nesse sentido, devido à função reducionista da disponibilidade de P mediante processos de adsorção e fixação (Melo et al., 2019), elevada atenção deve ser dada às sub-bacias de contribuição direta da Represa do Ferraz, bem como na bacia do rio Pirajibu-Mirim como um todo, visto o potencial do P em eutrofizar ambientes lânticos.

De acordo com Silva et al. (2020), o Zn, na maioria das vezes, está na sua forma indisponível, razão pela qual diversos estudos apontaram a carência desse elemento em termos de disponibilidade para as plantas. Contudo, o presente estudo identificou uma relação linear entre a perda desse nutriente no solo e os sedimentos dos leitos dos exutórios, principalmente para o exutório da Sub2, que concentrou a maioria das espécies iônicas analisadas, fato que evidencia um potencial reflexo antrópico proveniente da perda de solos na sub-bacia. Entretanto, cabe ressaltar que tanto a toxicidade quanto a mobilidade dos metais e metaloides em sedimentos não dependem apenas da sua concentração total; mas também deve ser levada em consideração a sua forma química específica (Coringa et al., 2016).

Haja vista a complexidade dos sistemas que regem os processos geoquímicos nos diferentes compartimentos de uma bacia hidrográfica, além da interação com fatores morfofisiográficos, biológicos e antrópicos, são recomendados estudos que envolvam um maior nível de detalhamento acerca da constituição mineralógica e química do solo da bacia para melhor elucidar sobre as fontes e rotas de aporte dos sedimentos nos corpos de água, por meio da elaboração de uma malha amostral de coleta de sedimentos mais detalhada ao longo da bacia hidrográfica, envolvendo todo o seu perfil longitudinal, incluindo os mananciais de abastecimento. Todavia, o presente estudo forneceu um ponto de partida no tocante a distribuição espacial das frações mineralógicas do solo da bacia hidrográfica, bem como a inferência da perda de nutrientes do solo e sua relação linear com os sedimentos dos leitos dos exutórios analisados.

O presente estudo sugere que os elementos-traço analisados (macro e micronutrientes) são residuais, e podem conter os elementos de origem natural (com silicatos), ligados às estruturas cristalinas dos minerais. Os Argissolos, predominantes na área de estudo, associado aos Latossolos, possuem um elevado grau de intemperismo, cuja mineralogia da fração argila, como analisada nos estudos de Fontes et al. (2001), é composta por minerais silicatados do tipo 1:1, assim como óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de Fe, Al e Mn.

As correlações significativas encontradas entre os teores de Zn no solo e no sedimento, em ambos os períodos amostrados (seco e chuvoso), assim como as correlações homólogas com os demais íons, sugerem o carreamento de partículas de solo provenientes de fontes difusas (Toniolo et al. 2024).

Esse processo pode, a longo prazo, representar um problema de grande magnitude. Isso se deve ao fato de que as concentrações dos elementos foram determinadas por meio de um método que avalia a fração prontamente trocável — a forma mais lábil. Segundo Alves-Neto et al. (2014), essa fração é a que apresenta

maior biodisponibilidade para os organismos aquáticos, que podem assimilar esses elementos diretamente da água ou por meio das partículas de sedimento.

Cabe ressaltar que os ambientes amostrados foram representativos da dinâmica fluvial (ambientes lóticos) e não refletem a dinâmica de ambientes deposicionais, representados por ambientes lênticos, como lagos e reservatórios. Ainda, a baixa atividade de sorção da fração areia, predominante nos solos e sedimentos, alerta para possíveis problemas relacionados à lixiviação de íons do solo, biodisponibilidade e potencial de contaminação.

4 CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que as diferentes frações texturais do solo das sub-bacias hidrográficas não possuem correlações estatísticas que evidenciem uma relação linear de deposição nos exutórios dos leitos analisados nos diferentes compartimentos, fato que pode ser explicado pela complexidade e particularidade dos compartimentos ambientais quanto aos diferentes tipos de solos e estruturas geológicas e morfofisiográficas.

No entanto, ficou evidente que as sub-bacias à montante da represa do Ferraz, assim como a própria sub-bacia que contempla o reservatório (Sub1), possuem quantidades significativas de frações texturais representadas pela Areia Total que podem ser transportadas e carreadas até a represa, cabendo assim, uma atenção especial quanto às práticas conservacionistas nessas áreas, bem como atenção quanto ao uso e ocupação do solo previstos para a bacia.

Portanto, dada a característica natural do solo (intrínseca às frações mineralógicas), somadas à modelos preditivos que apontam uma elevada perda de solos e nutrientes nos compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, podem fornecer informações valiosas no âmbito da gestão municipal. Nesse sentido, o estudo demonstrou que grande parte do solo da bacia hidrográfica pode ser pouco favorável à quimiosorção de elementos químicos com potencial contaminante, embora não tenham sido detectadas grandes concentrações de elementos nos sedimentos dos leitos dos exutórios analisados. No entanto, isso também se deve à dinâmica desses ambientes lóticos que não são favoráveis à deposição de sedimentos.

Embora os valores quantitativos dos elementos químicos analisados estejam em conformidade com as resoluções normativas pertinentes, ressalta-se as correlações entre os elementos do solo e sedimentos obtidos neste estudo, sugerindo fortemente que os considerados macroatmentos, como o Ca, Mg, bem como os micronutrientes, como Zn e Mn, além da MO, estão sendo carreados para os tributários do rio Pirajibu-Mirim, advindos, provavelmente, da perda desses elementos por fatores antrópicos, assim como pelas condições biogeoquímicas atuantes nesses compartimentos.

REFERÊNCIAS

- Alves-Neto, J. L., Barbosa, A. V. L., Medeiros, M. A., Casartelli, E. A., Guarino, A. W. S., & Merçon, F. (2014). Transposição de Cádmiio e Zinco da Baía de Sepetiba, e sua Deposição em Sedimentos do Estuário do Rio Cabuçu-Piraquê (Rio de Janeiro, Brasil). *Revista Virtual de Química*, 6(5), 1295-1315.

<http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140085>

- Arantes, L. T., Arantes, B. H. T., Sacramento, B. H., Costa, H. F., Oliveira, R. A., Simonetti, V. C., Silva, C. C., & Lourenço, R. W. (2023). Application of spatial environmental indicators in the assessment of degradation potential of water resources in water basins. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(931), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11499-w>
- Baldotto, M. A., & Baldotto, L. E. B. (2014). Ácidos húmicos. *Revista Ceres*, 61, 856-881. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201461000011>
- Bowen, M. W., & Johnson, W. C. (2017). Anthropogenically accelerated sediment accumulation within playa wetlands as a result of land cover change on the High Plains of the central United States. *Geomorphology*, 294, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.017>
- Bhutiani, R., Kulkarni, D. B., Khanna, D. R., & Gautam, A. (2016). Water quality, pollution source apportionment and health risk assessment of heavy metals in groundwater of an industrial area in North India. *Exposure and Health*, 8(1), 3-18. <https://doi.org/10.1007/s12403-015-0178-2>
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Novak, J. M., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- Cardoso-Silva, S., Mizael, J. O. S. S., Frascareli, D., Ferreira, P. A. L., Rosa, A. H., Vicente, E., Figueira, R. C. L., Pompêo, M. L. M., & Moschini-Carlos, V. (2021). Paleolimnological evidence of environmental changes in seven subtropical reservoirs based on metals, nutrients, and sedimentation rates. *Catena*, 206, 105432. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105432>
- Climate-Data. (2022). *Clima: Sorocaba*. <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/sorocaba-756/>.
- Coringa, J. D. E. S., Pezza, L., Coringa, E. D. A. O., & Weber, O. L. D. S. (2016). Distribuição geoquímica e biodisponibilidade de metais traço em sedimentos no Rio Bento Gomes, Poconé-MT, Brasil. *Acta Amazonica*, 46(2), 161-174. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201502215>
- Cunha, J. E. M., Campos, M. C., Gaio, D. C., Nogueira, J. E. S., Soares, M. D., Silva, D. M., & Oliveira, I. A. (2016). Fractal analysis in the description of soil particle-size distribution under different land-use patterns in Southern Amazonas State, Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 11(23), 2032-2042. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10649>
- Dong, S., Shang, Z., Gao, J., & Boone, R. B. (2020). Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 287, 106684.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106684>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (2011). *Manual de métodos de análise de solos*.

Fávero, I. P., Belfiore, P., Silva, F. D., & Chan, B. L. (2009). *Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões*. Elsevier.

Figueiredo Filho, D. B., & Silva Júnior, J. A. da. (2009). Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)*. *Revista Política Hoje*, 18(1), 115–146.

Filizola, F. F., Gomes, M. A. F., & Souza, M. D. (2006). *Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos*. Embrapa Meio Ambiente.

Fontes, M. P. F., Camargo, O. A., & Sposito, G. (2001). Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Scientia Agricola*, 58(3), 627-646. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029>

Frascareli, D., Cardoso-Silva, S., Mizael, J. O. S. S., Rosa, A. H., Pompêo, M. L. M., López-Doval, J. C., & Moschini-Carlos, V. (2018). Spatial distribution, bioavailability, and toxicity of metals in surface sediments of tropical reservoirs, Brazil. *Environmental Monitoring And Assessment*, 190(4), 199. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6515-8>

Freitas, L., Casagrande, J. C., Oliveira, I. A., Souza Júnior, P. R., & Campos, M. C. C. (2014). Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. *Revista Agro@ambiente On-line*, 8(2), 155-164. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i2.1684>

Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Palaeontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(9). https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf 2001.

Holz, M., & Augustin, J. (2021). Erosion effects on soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes: A meta-analysis. *Geoderma*, 397, 115045, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115045>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). *Cidades*. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sorocaba/panorama>.

Idris, N. S. U., Low, K. H., Koki, I. B., Kamaruddin, A. F., Salleh, K. M., & Zain, S. M. (2017). Hemibagrus sp. as a potential bioindicator of hazardous metal pollution in Selangor River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(5), 220. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5939-x>

Jalali, M., & Hemati, N. (2013). Chemical fractionation of seven heavy metals (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn) in selected paddy soils of Iran. *Paddy and Water*

Environment, 11(1), 299-309. <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0320-8>

- Koki, I. B., Lowa, K. H., Zaina, S. M., Juahir, H., Bayerob, A. S., Azidd, A., & Zalie, M. A. (2020). Spatial variability in surface water quality of lakes and ex-mining ponds in Malacca, Malaysia: the geochemical influence. *Desalination and Water Treatment*, 197, 319-327. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25982>
- Loureiro, D., Fernandez, M., Herms, F., Araújo, C., & Lacerda, L. D. D. (2012). Distribuição dos metais pesados em sedimentos da Lagoa Rodrigo de Freitas. *Oecologia Australis*, 16(03), 353–364. <https://doi.org/10.4257/oeco.2012.1603.04>
- Melo, D. S., Gontijo, E. S. J., Frascareli, D., Simonetti, V. C., Machado, L. S., Barth J. A. C., Moschini-Carlos, V., Pompêo, M. L. Rosa, A. H., & Friese, K. (2019). Self-organizing maps for evaluation of biogeochemical processes and temporal variations in water quality of subtropical reservoirs. *Water Resources Research*, 55(12), 10268-10281. <https://doi.org/10.1029/2019WR025991>
- Nery, L. M., Silva, D. C. C., & Sabonaro, D. Z. (2022). Perfil tecnológico dos pecuaristas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. *Revista de Gestao Ambiental e Sustentabilidade*, 11(1), 1-33, e20468. <https://doi.org/10.5585/geas.v11i1.20468>
- Nery, L. M., Silva, D. C. C., & Sabonaro, D. Z. (2023). Agriculture technology transfer: A multicriteria analysis for decision making. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03261-6>
- Novais, R. F., & Smyth, T. J. (1999). *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Universidade Federal de Viçosa.
- Oliveira, A. B., & Nascimento, W. A. (2006). Formas de manganês e ferro em solos de referência de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(1), 99-110. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100011>
- Pacheco, F. A. L., Fernandes, L. F. S., Valle Júnior, R. F., Valera, C. A., & Pissarra, T. C. T. (2018). Land degradation: Multiple environmental consequences and routes to neutrality. *Current Opinion in Environmental Science e Health*, 5, 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.002>
- Raij, B. V., Andrade, J. C., Cantarella, H., & Quaaggio, J. A. (2001). *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*. IAC.
- Rizzo, F. A., Nery, L. M., Tonello, P. S., & Silva, D. C. C. (2022). Índice de qualidade da água e do estado trófico da bacia hidrográfica do córrego Pequiá - MA. *Geoambiente On-Line*, 43, 119-144. <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/72658/38687>
- Rossi, M. (2017). *Mapa pedológico do estado de São Paulo: Revisado e ampliado*. CINP Instituto Florestal.

- SAAE. Serviço Autônomo de Água e Esgoto. Adequação e Revisão do Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água de Sorocaba. Sorocaba, 2016. 205p. Disponível em: <<https://www.saaesorocaba.com.br/downloads/314+-+Plano+Diretor+do+SES+de+Sorocaba+-+Volume+I.pdf>>. Acesso em: 19 de agosto de 2025.
- Santos, A. P, Silva Junior, A. X., Nery, L. M., Gomes, G., Toniolo, B. P, Silva, D. C. C., & Lourenço, R. W. (2025). Random forest algorithm applied to model soil textural classification in a river basin. *Environmental Monitoring And Assessment*, 197(3), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13786-0>
- Santos, D. R., Gatiboni, L. C., & Kaminski, J. (2008). Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38(2), 576-586. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Oliveira, J. B., Coelho, M. R., Lumberras, J. F., & Cunha T. J. F. (2006). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (2ª ed). Embrapa Solos.
- Schilling, M. F. (1984). Some remarks on quick estimation of the correlation-coefficient. *American Statistician*, 38(4), 330-330.
- Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*. John Wiley.
- Silva, A. A. R., Lobo, I., Guedes, C. L. B., & Pinto, J. P. (2006). Análise de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) em solos utilizando agitação ultrassônica, tubo aquecedor/minicondensador e cromatografia gasosa. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, 27(2), 105-112. <http://dx.doi.org/10.5433/16790375.2006v27n2p105>
- Silva, D. C. C., Albuquerque Filho, J. L., Sales, J. C. A., & Lourenço, R. W. (2016). Caracterização morfométrica e suas implicações no acúmulo de sedimentos em reservatórios: O caso da Represa Hedberg, Iperó/SP. *Raega-O Espaço Geográfico em Análise*, 36, 225-245. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v36i0.42324>
- Silva, D. C. C., Sales, J. C. A., Simonetti, V. C., & Lourenço, R. W. (2020). Análise espacial do custo de reposição de nutrientes do solo em uma bacia hidrográfica. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, 13(1), 189-212. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n1p189-212>
- Simonetti, V. C., Silva, D. C. C., & Rosa, A. H. (2019). Análise da influência das atividades antrópicas sobre a qualidade da água da APA Itupararanga (SP), Brasil. *Geosul*, 34(72), 01-27. <https://doi.org/10.5007/1982-5153.2019v34n72p01>

- Simonetti, V. C., Silva, D. C. C., & Rosa, A. H. (2022a). Correlação espacial compartimentada dos padrões de drenagem com características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(1), 1135-1154. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2037>
- Simonetti, V. C., Silva, D. C. C., e Rosa, A. H. (2022b). Reflexos ambientais da perda de nutrientes do solo por erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim (SP). *Revista Caminhos de Geografia*, 23(87), 84-102. <https://doi.org/10.14393/RCG238758895>
- Smith, W. S., Moita Junior, V. D., & Carvalho, J. de L. (Org.). (2014). *Biodiversidade do Município de Sorocaba* (1ª. ed.). Secretaria de Meio Ambiente; Prefeitura municipal de Sorocaba.
- Sonnenberg, R. K. H., Santinelli, E. O., Andrade, E. L., Simonetti, V.C., & Silva, D. C. C. (2020). Análise de parâmetros da água por sensoriamento remoto para fins de aquíicultura em reservatórios. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 10(3), 168-178. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v10.3.p168-178>
- Lei n. 11.022, de 16 de dezembro de 2014. (2014, 16 dezembro). Dispõe sobre a revisão do Plano Diretor de Desenvolvimento Físico Territorial do Município de Sorocaba e dá outras providências. Câmara Municipal.
- Souza, M. M., & Gastaldini, M. C. C. (2014). Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 19(3), 263-274. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000001097>
- Stumm, W. (1992). *Chemistry of the solid-water interface*. John Wiley & Sons.
- Toniolo, B. P., Nery, L. M., & Silva, D. C. C. (2024). Modelagem espacial para identificação de áreas potenciais à geração de poluição difusa na Bacia Hidrográfica do Rio Cotia - SP. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 16, e20220207. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.016.e20220207>
- Tuset, J., Vericat, D., & Batalla, R. J. (2016). Rainfall, runoff and sediment transport in a Mediterranean mountainous catchment. *Science of the Total Environment*, 540, 114-132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.075>
- Wolka, K., Biazin, B., Martinsen, V., & Mulder, J. (2021). Soil and water conservation management on hill slopes in Southwest Ethiopia. I. Effects of soil bunds on surface runoff, erosion and loss of nutrients. *Science of The Total Environment*, 757, 142877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142877>
- Yang, T., Siddique, K. H. M., & Liu, K. (2020). Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01118. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01118>
- Zhao, C., Jia, X., & Zhang, C. (2016). Particle size distribution of soils (0–500 cm) in the Loess Plateau, China. *Geoderma Regional*, 7(3), 251-258.

<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.05.003>