

TEORES NATURAIS DE ELEMENTOS-TRAÇO NO PLANALTO NORTE

CATARINENSE: EVIDÊNCIAS PARA REGIONALIZAÇÃO DE VRQS

Elias da Silva **Scopel**¹, Daniely Neckel **Rosini**², Tamiris **Amorim**³, Samara Alves **Testoni**⁴,
David José **Miquelluti**⁵, Mari Lucia **Campos**⁶

1 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, elias.scopel@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3314-2323>; 2 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, danielybio@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9873-6750>; 3 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Curso de Bacharelado em Agronomia, tamirisamorim76@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7909-8745>; 4 – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Ciência do solo, samara.testoni@unesp.br, <https://orcid.org/0000-0003-2049-037X>; 5 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Departamento de Solos e Recursos Naturais, david.miquelluti@udesc.br, <https://orcid.org/0000-0002-7369-6163>; 6 – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Departamento de Solos e Recursos Naturais, mari.campos@udesc.br, <https://orcid.org/0000-0003-3250-2067>.

Resumo A presença de elementos-traço nos solos pode representar tanto uma condição natural quanto um indicativo de contaminação ambiental, tornando fundamental a distinção entre teores naturais e antrópicos. Este estudo teve como objetivo avaliar a distribuição de elementos-traço em solos representativos do Planalto Norte Catarinense, gerando evidências pedogeoquímicas para subsidiar a regionalização e a interpretação dos VRQs estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 e pela Portaria IMA nº 164/2025. Foram analisados cinco perfis de solo, com amostras coletadas nas camadas de 0–20 e 20–40 cm, considerando atributos físicos e químicos, como textura, carbono orgânico, pH e teores de alumínio. Os resultados indicaram que a distribuição dos elementos-traço é associada principalmente pelo material de origem, pela fração argila, pela acidez e pelo conteúdo de carbono orgânico. Os Cambissolos e o Latossolo estudados — embora majoritariamente desenvolvidos sobre unidades sedimentares paleozoicas

(Formações Mafra, Rio Bonito, Rio do Rastro e Terezina) — apresentaram concentrações naturalmente elevadas de Fe, Mn, Cr, Cu, Zn, Ni, Pb, V e Ba, em consonância com padrões descritos para solos máficos do sul do Brasil, incluindo estudos específicos sobre teores naturais de bário em solos catarinenses. Embora baseado em número limitado de perfis (n=5), o estudo fornece evidências consistentes de controle litopedológico (material de origem e fração argila) sobre os teores naturais de elementos-traço, reforçando a necessidade de interpretar VRQs à luz da variabilidade pedogeológica regional e apoiando a priorização de campanhas ampliadas de amostragem no Planalto Norte Catarinense.

Palavras-chave: elementos-traço; Formação Serra Geral; variabilidade pedogeológica.

BACKGROUND CONTENTS OF TRACE ELEMENTS IN THE NORTHERN PLATEAU OF SANTA CATARINA: EVIDENCE FOR THE REGIONALIZATION OF VRQS

Abstract: The presence of trace elements in soils can represent both a natural condition and an indicator of environmental contamination, making it fundamental to distinguish between natural and anthropogenic levels. This study aimed to evaluate the distribution of trace elements in representative soils of the Northern Plateau of Santa Catarina, generating pedogeochemical evidence to support the regionalization and interpretation of the Reference Quality Values (VRQs) established by Resolution CONAMA No. 420/2009 and IMA Ordinance No. 164/2025. Five soil profiles were analyzed, with samples collected from the 0–20 and 20–40 cm layers, considering physical and chemical attributes such as texture, organic carbon, pH, and aluminum levels. The results indicated that the distribution of trace elements is mainly associated with parent material, clay fraction, acidity, and organic carbon content. The Cambisols and Latosol studied — although predominantly developed on Paleozoic sedimentary units (Mafra, Rio Bonito, Rio do Rastro, and Terezina formations) — exhibited naturally elevated concentrations of Fe, Mn, Cr, Cu, Zn, Ni, Pb, V, and Ba, in line with patterns described for mafic soils in southern Brazil, including specific studies on natural barium levels in Santa Catarina soils. Although based on a limited number of profiles (n=5), the study provides consistent evidence of lithopedological control (parent material and clay fraction) over natural trace element levels, reinforcing the need to interpret VRQs in light of regional pedogeological variability and supporting the prioritization of expanded sampling campaigns in the Northern Plateau of Santa Catarina.

Keywords: trace elements; Serra Geral Formation; pedogeological variability

NIVELES NATURALES DE ELEMENTOS TRAZA EM EL PLANALTO NORTE CATARINENSE: EVIDENCIAS PARA LA REGIONALIZACIÓN DE VRQS

Resumen: La presencia de elementos traza en los suelos puede representar tanto una condición natural como un indicador de contaminación ambiental, haciendo fundamental la distinción entre niveles naturales y antrópicos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la distribución de elementos traza en suelos representativos del Planalto Norte Catarinense, generando evidencia pedogeoquímica para subsidiar la regionalización e interpretación de los Valores de Referencia de Calidad (VRQs) establecidos por la Resolución CONAMA nº 420/2009 y la Ordenanza IMA nº 164/2025. Se analizaron cinco perfiles de suelo, con muestras recolectadas en las capas de 0–20 y 20–40 cm, considerando atributos físicos y químicos como textura, carbono orgánico, pH y niveles de aluminio. Los resultados indicaron que la distribución de los elementos traza está principalmente asociada al material de origen, la fracción arcilla, la acidez y el contenido de carbono orgánico. Los Cambisoles y el Latosol estudiados — aunque desarrollados mayoritariamente sobre unidades sedimentarias paleozoicas (Formaciones Mafra, Rio Bonito, Rio do Rastro y Terezina) — presentaron concentraciones naturalmente elevadas de Fe, Mn, Cr, Cu, Zn, Ni, Pb, V y Ba, en consonancia con patrones descritos para suelos máficos del sur de Brasil, incluyendo estudios específicos sobre niveles naturales de bario en suelos catarinenses. Aunque basado en un número limitado de perfiles (n=5), el estudio proporciona evidencia consistente del control litopedológico (material de origen y fracción arcilla) sobre los niveles naturales de elementos traza, reforzando la necesidad de interpretar los VRQs a la luz de la variabilidad pedogeológica regional y apoyando la priorización de campañas ampliadas de muestreo en el Planalto Norte Catarinense.

Palabras clave: elementos traza; Formación Serra Geral; variabilidad pedogeológica

1 Introdução

A presença de elementos-traço no solo é uma preocupação ambiental crescente devido aos seus potenciais riscos para a saúde humana e a integridade dos ecossistemas. Embora alguns desses elementos, como cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e molibdênio (Mo), sejam essenciais em baixas concentrações para o desenvolvimento de organismos vivos, atuando como cofatores em reações enzimáticas cruciais (Alloway, 2013; Wang et al., 2020)

outros, a exemplo do chumbo (Pb), cádmio (Cd) e arsênio (As), não possuem função biológica conhecida e podem ser altamente tóxicos (Oliveira, 2008). A toxicidade desses elementos é multifacetada, dependendo da sua natureza, forma química, biodisponibilidade e capacidade de bioacumulação e biomagnificação ao longo da cadeia alimentar (Ali *et al.*, 2019; Dal Cortivo, Costa Junior e Pletsch, 2024).

A contaminação do solo por elementos-traço pode ter origens tanto naturais (geológicas), provenientes do intemperismo de minerais primários, quanto antropogênicas, resultantes de atividades como agricultura intensiva, industrialização, descarte de resíduos, emissões veiculares e aplicação de fertilizantes e pesticidas (Wuana e Okieimen, 2011; Wang *et al.*, 2020; Nadporozhskaya, Shurpali e Majumder, 2022).

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 420/2009 estabeleceu critérios e valores orientadores para a determinação de elementos químicos e substâncias orgânicas no solo (Brasil, 2009). Essa resolução define o Valor de Prevenção (VP) como o teor limite de uma substância no solo que ainda permite a manutenção de suas funções principais, e o Valor de Investigação (VI) como o teor acima do qual há riscos potenciais para a saúde humana. Já os Valores de Referência de Qualidade (VRQ) determinam as concentrações naturais dos elementos nos solos e devem ser determinados por cada estado, observando a pedologia e geologia de cada região.

A Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) tem conduzido estudos extensivos desde 2009 para estabelecer os teores naturais de elementos-traço nos solos catarinenses, que subsidiaram a Portaria IMA nº 164/2025. Contudo, estudos como os de Suppi *et al.* (2022), Machado, Miquelluti e Campos (2021), Rocha *et al.* (2024) e Rosini, Rauber e Campos (2025) têm demonstrado que os VRQs vigentes podem não refletir adequadamente a realidade de toda a cobertura pedológica do estado, especialmente em áreas com formações geológicas distintas.

Em ambientes com solos derivados de rochas máficas e ultramáficas, como os encontrados na Formação Serra Geral, que abrange grande parte de Santa Catarina, os solos tendem a apresentar naturalmente concentrações mais elevadas de certos elementos-traço, como Fe, Co, Cr, Cu, Zn e Mn (Alleoni *et al.*, 2005; Zinn *et al.*, 2020). Essa variação substancial entre os VRQs e o *background* natural dos solos basálticos catarinenses reforça a necessidade de valores de referência mais específicos para diferentes províncias geológicas.

Nesse contexto, a presente pesquisa concentra-se nos solos do Planalto Norte Catarinense, abrangendo diferentes formações geológicas (Mafra, Rio Bonito, Rio do Rastro e Terezina) o que permite reduzir lacunas existentes no conhecimento sobre a distribuição natural de elementos-traço em condições litopedológicas variadas. A região do estudo é caracterizada por elevada diversidade ambiental e pela coexistência de atividades agrícolas e industriais, a área apresenta tanto suscetibilidade à contaminação quanto relevância como referência geoquímica regional. Assim, o estudo tem como objetivo quantificar e caracterizar os teores de elementos-traço nas camadas de 0–20 e 20–40 cm em cinco perfis de solo representativos do Planalto Norte Catarinense, avaliando sua variabilidade em função das condições pedológicas e geológicas locais. Os resultados serão comparados aos VRQ estabelecidos na Resolução CONAMA nº 420/2009 e pela Portaria IMA nº 164/2025, com o objetivo de fornecer evidências pedogeoquímicas para interpretação regional desses valores no Planalto Norte Catarinense e para subsidiar, quando pertinente, discussões de regionalização por províncias geológicas e classes de solo, reconhecendo o caráter exploratório da amostragem.

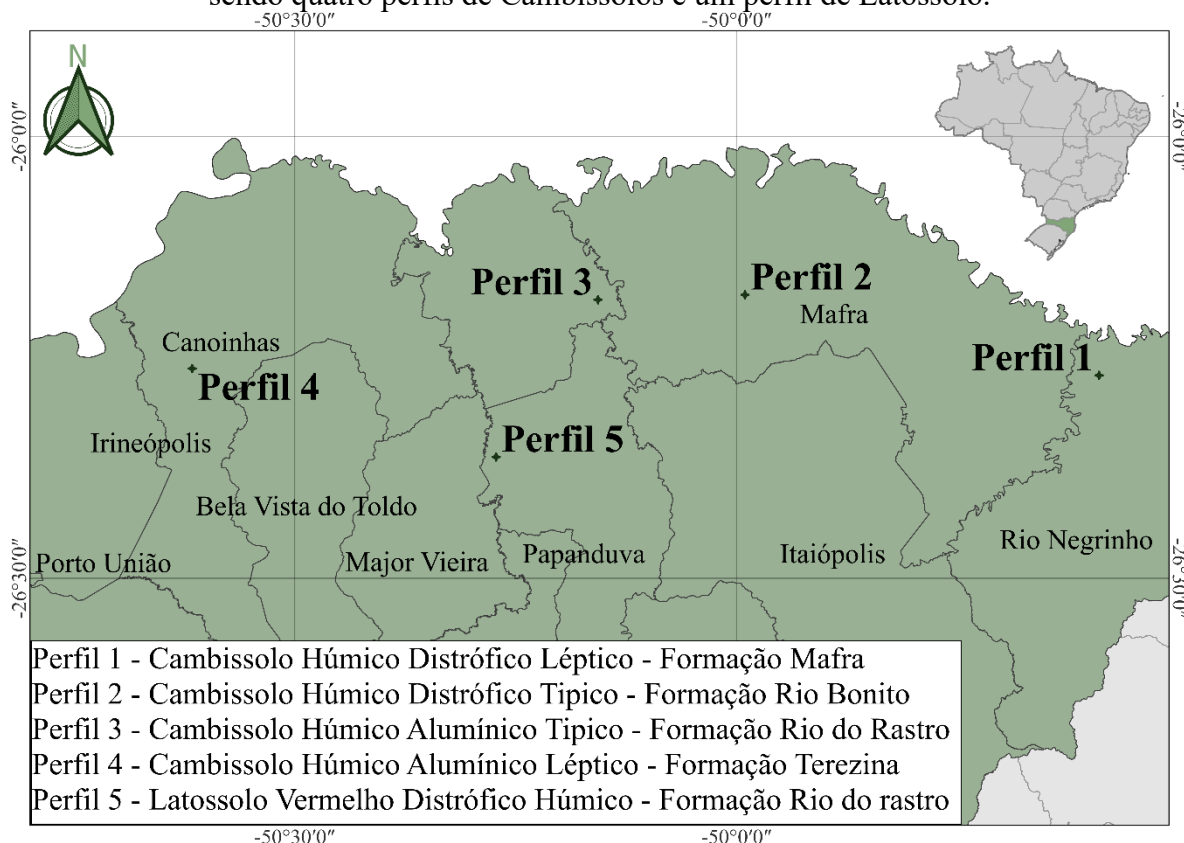
2 Material e Métodos

2.1 Coleta de dados

Para este estudo, foram coletadas amostras de diferentes profundidades (0-20 e 20-40cm) de 5 perfis modais de solo no Planalto Norte Catarinense, sendo quatro perfis de Cambissolos e um perfil de Latossolo caracterizados e descritos por Almeida *et al.* (2018). Embora Alleoni *et al.* (2005) e Suppi *et al.* (2022) recomendem a amostragem por horizontes pedogenéticos para o estabelecimento dos VRQs, especialmente para avaliar a influência do material de origem sobre os teores de elementos-traço, optou-se neste estudo pelas profundidades fixas de 0–20 e 20–40 cm. Essa escolha foi motivada pela padronização com programas oficiais de monitoramento ambiental (CONAMA 420/2009) e pela disponibilidade de perfis já descritos morfológicamente por Almeida *et al.* (2018), o que permitiu associar os intervalos de profundidade aos horizontes diagnósticos. A seleção dos perfis considerou: representatividade pedológica, diversidade litológica (Mafra, Rio Bonito, Rio do Rastro, Terezina), áreas sob vegetação nativa e integridade morfológica. Reconhece-se que $n=5$ é uma

limitação; os resultados são evidências exploratórias, não valores definitivos para VRQs. (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização de 5 perfis modais de solo no Planalto Norte Catarinense, sendo quatro perfis de Cambissolos e um perfil de Latossolo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As descrições e coletas dos perfis ocorreram nas localidades de Major Vieira, Três Barras, Mafra, Irineópolis e Rio Negrinho. A classificação do solo, localização, coordenadas geográficas, formação geológica, e altitude de cada perfil estão detalhados na Tabela 1.

Ao final dos trabalhos de campo, as amostras de cada horizonte dos perfis foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas para o Laboratório de Levantamento e Análises Ambientais (LLAA) do Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) para início do processamento das amostras.

Inicialmente, as amostras foram secas ao ar, seus torrões foram desmanchados, moídos e peneirados em peneira de 2 mm, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). No

laboratório, as amostras dos cinco perfis de solo foram submetidas a uma série de análises físicas e químicas.

Tabela 1 – Classificação, localização, coordenadas geográficas, formação geológica e altitude dos solos coletados.

Perfil	Classificação do solo ¹	Localização	Coordenadas geográficas	Formação geológica	Altitude (m)
1	Cambissolo Húmico Distrófico Léptico	Rio Negrinho	26°16'13.13" S 49°35'23.05" W	Mafra	904
2	Cambissolo Húmico Distrófico Típico	Mafra	26°10'46.44" S 49°59'25.50" W	Rio Bonito	868
3	Cambissolo Húmico Alúminico Típico	Irineópolis	26°15'45.44" S 50°36'57.53" W	Rio do Rastro	826
4	Cambissolo Húmico Alúminico Léptico	Três Barras	26°11'05.01" S 50°09'24.45" W	Terezina	801
5	Latossolo Vermelho Distrófico Húmico	Major Vieira	26°22'05.88" S 50°16'57.53" W	Rio do Rastro	804

¹Como base para classificação de solos, Almeida et al. (2016), utilizou-se a época do estudo, a 3ª Edição do Sistema Brasileiro de Classificação dos solos.

Fonte: adaptado de Almeida *et al.* (2016).

2.2 Análises físicas e químicas do solo

As amostras dos cinco perfis foram encaminhadas para o laboratório de química do solo do CAV-UDESC para determinação de atributos químicos na terra fina seca ao ar (TFSA). O valor de pH foi determinado em água e em solução de KCl 1 M, na relação solo/solução de 1:1, por potenciometria. O carbono orgânico foi determinado após oxidação úmida com dicromato de potássio em meio ácido, por titulação (Tedesco *et al.*, 1995). As demais características químicas tiveram valores determinados segundo as instruções da EMBRAPA (1997).

Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Alumínio (Al) trocáveis foram extraídos com solução de KCl 1 M. Potássio (K) e Sódio (Na) foram extraídos com acetato de amônio e quantificados por fotometria de chama. A acidez potencial (H+Al) foi extraída com acetato de cálcio tamponado a pH 7 e quantificada por titulometria de neutralização. Com os valores desses atributos, foi possível calcular, seguindo as fórmulas descritas no Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (2016) (tabela 3), as seguintes propriedades: a soma de bases (S), a CTC efetiva, a CTC a pH 7, a saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m).

Tabela 2 – Equações matemáticas para cálculo de propriedades químicas do solo

Propriedade química do solo	Equação matemática
Soma de bases (S) ¹	$S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+}$
CTC efetiva ²	$CTC_{efetiva} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Al^{3+}$
CTC pH 7,0 ²	$CTC_{pH\ 7,0} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + (H + Al)$
Saturação por bases (V) ¹	$V = \left(\frac{S}{CTC_{pH\ 7,0}} \right) * 100$
Saturação por alumínio (m) ¹	$m = \left(\frac{Al^{3+}}{CTC_{efetiva}} \right) * 100$

¹Valores expressos em porcentagem (%).

²Valores expressos em cmolc kg⁻¹.

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2.3. Análise do teor dos elementos-traço

Para a quantificação de elementos-traço nos cinco perfis de solo, foi utilizado o equipamento de fluorescência de raios X da marca PANalytical – Epsilon 3. Para esta análise, uma quantidade de 5g de terra fina seca ao ar, de cada um dos cinco perfis de solo, foi preparada em triplicata.

Após peneiradas em malha de 0,053 mm, as amostras foram acondicionadas em porta amostras padrão com o fundo coberto por um filme poliéster “mylar” de 3,6 micrômetros, e prensadas em prensa hidráulica manual, de forma a criar uma pastilha com o solo. Com o uso do *software*, todo o processo foi iniciado digitalmente. O Epsilon 3 quantificou mais de vinte óxidos, os quais tiveram seus valores convertidos para valor elementar, sendo eles: Ag, Al, Br, Ca, Cr, Cu, Eu, Fe, Ga, K, Mg, Mn, Nb, Ni, P, Pb, Si, Ti, V, Y, Zn, Zr. Na tabela 3, é possível verificar a comparação entre valor certificado, pelo *NIST San Joaquin Soil* e valor obtido pelo equipamento de FRX, e o cálculo da taxa de recuperação pelo equipamento. As recuperações obtidas para a amostra referência variam entre 67 e 138%, e são aceitáveis para estudos exploratórios com FRX (tabela 3).

Tabela 3 – Valores certificados do NIST, valores obtidos por FRX e taxas de recuperação e comparação

Elemento	Valor certificado (mg kg ⁻¹)	Valor FRX (mg kg ⁻¹)	Taxa de Recuperação (%)
Al	75000,00	62353,18	83,14
Ba	968,00	904,61	93,45
Cr	130,00	87,18	67,06
Cu	34,60	47,92	138,51
Fe	35000,00	48445,66	138,42
Mn	538,00	606,33	112,70
Ni	88,00	102,16	116,09
Pb	18,90	23,19	122,69
Si	296600,00	295164,83	99,52
V	112,00	105,03	93,78
Zn	106,00	122,51	115,58
Zr	160,00	175,81	109,88

*Solos com teores de argila acima de 15%.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os elementos arsênio (As) e cádmio (Cd) foram analisados pelo laboratório Terranálises – Laboratório de Análises Ambientais, localizado em Fraiburgo, SC. A extração dos elementos foi realizada pelo método 3050B, conforme a U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), e a quantificação foi efetuada por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). As informações relativas aos limites de detecção e aos limites de quantificação encontram-se apresentadas na Tabela 4. As recuperações obtidas para As e Cd foram de 85% e 116%, respectivamente.

Tabela 4 - Limite de detecção, limites de quantificação das análises de As e Cd

	As	Cd
	mg kg ⁻¹	
Limite de Detecção	0,001	0,005
Limite de Quantificação	0,02	0,02
Nist certificado	6,4 – 10	0,33 - 0,66
Nist obtido	7,00	0,77
Taxa de recuperação (%)	85%	116%

Fonte: Elaborado pelos autores.

4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização química e física

A distribuição granulométrica dos solos avaliados evidenciou variações significativas entre os perfis analisados, refletindo diferenças dos processos pedogenéticos, do material de origem e do grau de intemperismo. Essas variações exercem influência direta sobre a retenção, mobilidade e disponibilidade de elementos-traço, uma vez que as frações texturais apresentam distintas capacidades de adsorção e interação com os constituintes químicos do solo. Os valores de cada classe granulométrica podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Teores de argila, silte e areia e de classificação textural do solo em diferentes perfis e profundidades

Perfil	Profundidade Cm	Areia	Silte g kg ⁻¹	Argila	Classificação textural do solo
Perfil 1	0-20	63,6	624,7	311,6	Franco argilo siltosa
	20-40	66,0	616,6	317,3	Franco argilo siltosa
Perfil 2	0-20	156,1	702,2	141,6	Franco siltosa
	20-40	153,8	710,2	135,9	Franco siltosa
Perfil 3	0-20	30,0	342,5	627,4	Muito argilosa
	20-40	28,6	319,7	651,6	Muito argilosa
Perfil 4	0-20	27,9	383,0	589,0	Argilosa
	20-40	41,5	376,1	582,3	Argilosa
Perfil 5	0-20	66,8	364,8	568,3	Argilosa
	20-40	49,5	361,4	589,0	Argilosa
Média		68,3	480,1	451,4	
Desvio padrão		48,0	161,2	203,5	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os cinco perfis avaliados apresentam predominância de silte e argila, com média de 451,4 g kg⁻¹ de argila e 480,2 g kg⁻¹ de silte, e menor participação de areia (média de 68,4 g kg⁻¹), caracterizando solos de textura média a muito argilosa, especialmente nos perfis 3, 4 e 5 (tabela 5). Esses solos estão associados a Cambissolos Húmicos e Latossolo Vermelho Distrófico Húmico desenvolvidos sobre formações sedimentares (Mafra, Rio Bonito, Rio do Rastro e Terezina), com relevo de encosta e altitudes entre 800 e 900 m. A elevada fração argila e os teores expressivos de óxidos de Fe e Al indicam avançado grau de intemperismo, compatível com o clima quente e úmido da região (Almeida *et al.*, 2018). Os valores de pH em

água (tabela 6) variaram em torno de 4,3 a 5,6, indicando acidez moderada a forte, com destaque para os Cambissolos húmicos aluminícos, que exibem altas saturações por Al (m acima de 90%) e baixa saturação por bases (V geralmente inferior a 50%), sobretudo nos perfis mais argilosos.

A presença de altos teores de carbono orgânico (C.O. superior a 15 g kg⁻¹ em vários horizontes superficiais) reforça o caráter húmico desses solos, com significativa capacidade de complexar elementos-traço, o que contribui para sua retenção e menor mobilidade no perfil (Alloway, 2013; Ali, Khan, Ilahi, 2019).

Tabela 6 – Atributos químicos dos cinco perfis de solo em diferentes profundidades (0-20 cm e 20-40 cm).

Perfil	Profundidade	pH H ₂ O	C.O.	Al ³⁺	Valor t ¹	S ²	V ³	m ⁴
	cm		g kg ⁻¹	cmolc kg ⁻¹			%	
Perfil 1	0-20	4,8	13,9	5,9	6,6	42,6	2,5	89,4
	20-40	4,5	12,8	8,2	8,3	32,0	0,3	98,8
Perfil 2	0-20	5,6	5,8	0,0	2,1	34,1	35,1	0,0
	20-40	5,1	4,1	1,2	1,5	21,3	4,6	80,1
Perfil 3	0-20	4,4	19,1	11,4	12,0	64,5	1,4	94,9
	20-40	4,3	15,7	11,3	11,6	53,1	0,5	97,8
Perfil 4	0-20	4,3	16,2	11,6	12,0	64,2	0,8	97,1
	20-40	4,4	13,9	9,3	9,6	53,1	0,5	97,7
Perfil 5	0-20	4,7	12,8	5,3	5,7	32,3	2,3	93,5
	20-40	4,9	11,6	5,2	5,5	21,3	1,4	94,9
Média		4,7	12,6	7,0	7,5	41,9	4,9	84,4
Desvio padrão		0,4	4,6	4,2	3,9	16,2	10,7	30,2

¹Valor t= CTC efetiva. ²S = Soma de bases. ³V = Saturação de bases. ⁴m =

Saturação por Al.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 Correlações entre frações granulométricas e atributos químicos

A matriz de correlação de Pearson (Figura 2) evidencia que a fração areia apresenta correlações negativas muito fortes com argila ($r = -0,91$), carbono orgânico ($r = -0,94$) e Al³⁺ ($r = -0,92$), indicando que solos mais arenosos tendem a ser menos ácidos, com menor teor de matéria orgânica e menor Al trocável. Em contrapartida, a argila correlaciona-se positivamente com carbono orgânico ($r = 0,82$) e Al³⁺ ($r = 0,80$), mostrando que horizontes mais argilosos

concentram maior C.O. e acidez trocável, condição típica de solos basálticos húmicos sob clima úmido (Almeida *et al.*, 2018).

O pH em água, por sua vez, correlaciona-se negativamente com Al^{3+} ($r = -0,96$) e carbono orgânico ($r = -0,88$), denotando que a elevada acidez está intimamente associada à presença de Al trocável e de matéria orgânica, o que reforça o caráter distrófico e aluminico de parte dos perfis. A CTC apresenta correlação positiva muito forte com Al^{3+} ($r = 0,99$) e com C.O. ($r = 0,94$), evidenciando que a combinação de argila e carbono orgânico é determinante para a capacidade de retenção de cátions, condição que favorece a adsorção de elementos-traço, em especial metais de transição e seus óxidos (Embrapa, 1997).

Figura 2 - Matriz de correlação entre atributos físicos e químicos dos cinco perfis de solo

Areia	1.00	0.84	-0.91	-0.94	-0.92	0.90	-0.90	-0.65	0.72
Silte	0.84	1.00	-0.99	-0.76	-0.74	0.69	-0.72	-0.53	0.54
Argila	-0.91	-0.99	1.00	0.82	0.80	-0.76	0.79	0.57	-0.60
Carbono orgânico	-0.94	-0.76	0.82	1.00	0.93	-0.88	0.94	0.79	-0.59
Al^{3+}	-0.92	-0.74	0.80	0.93	1.00	-0.96	0.99	0.81	-0.66
pH H ₂ O	0.90	0.69	-0.76	-0.88	-0.96	1.00	-0.93	-0.69	0.81
CTC efetiva	-0.90	-0.72	0.79	0.94	0.99	-0.93	1.00	0.86	-0.57
Soma de bases	-0.65	-0.53	0.57	0.79	0.81	-0.69	0.86	1.00	-0.23
Saturação por bases	0.72	0.54	-0.60	-0.59	-0.66	0.81	-0.57	-0.23	1.00
	Areia	Silte	Argila	Carbono orgânico	Al^{3+}	pH H ₂ O	CTC efetiva	Soma de bases	Saturação por bases

Fonte: Elaborado pelos autores

4.3 Relação dos elementos-traços com a matriz de solo

A análise por fluorescência de raios X indicou a presença e a participação relativa de Fe, Mn, Cr, Cu, Zn, Ni, Pb, V e Zr nos solos do Planalto Norte Catarinense (Tabela 7), refletindo principalmente a composição geoquímica dos minerais resistentes e das fases secundárias formadas durante o intemperismo. Embora perfis derivados de rochas máficas sejam classicamente associados a maiores teores totais de Cr, Ni e V (Alleoni et al., 2005; Zinn et al., 2020), os solos avaliados neste estudo desenvolvem-se majoritariamente sobre unidades sedimentares paleozoicas (Tabela 1).

A presença de Cr, Ni, V e Zr pode ser atribuída à herança de minerais resistentes presentes nos sedimentos, como óxidos e minerais pesados acessórios, especialmente zircão, que tendem a ser pouco mobilizados durante o intemperismo químico (Best *et al.*, 2019; Short, 1961). Em contraste, os elevados conteúdos relativos de Fe e Mn refletem o avanço do intemperismo químico sob clima úmido, com formação e acúmulo de óxidos e hidróxidos pedogênicos, amplamente reconhecidos como indicadores do grau de evolução dos solos (Schwertmann, 1958). A forte associação entre Fe_2O_3 e Al_2O_3 observada na matriz de correlação (Figura 3) reforça o controle pedogenético exercido pelos minerais secundários sobre a distribuição geoquímica dos elementos, independentemente do material de origem (Aldis; Aherne, 2021).

Na matriz de correlação, o chumbo (Pb) mostra correlação positiva forte com argila ($r = 0,91$) e carbono orgânico ($r = 0,66$), bem como alta correlação com Cu ($r = 0,83$) e Zn ($r = 0,73$), sugerindo que esses elementos-traço tendem a se concentrar em horizontes mais argilosos e ricos em matéria orgânica. Esse padrão indica forte controle geoquímico por adsorção em superfícies de argilominerais e óxidos de Fe/Al, além de complexação orgânica, o que reduz sua mobilidade e potencial de lixiviação, fenômeno amplamente discutido por Alloway (2013) e Wuana e Okieimen (2011) para solos com alto teor de óxidos de Fe e Al.

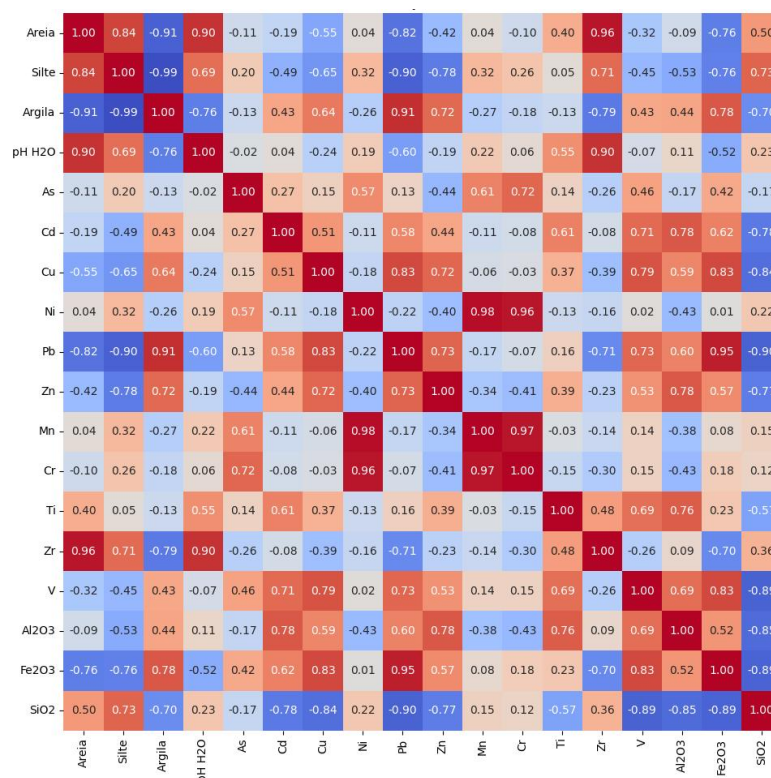
4.4 Correlações entre elementos-traços e atributos físicos e químicos do solo

O cobre (Cu) apresenta correlação positiva (Figura 3) com argila ($r = 0,64$), Pb ($r = 0,83$), Fe_2O_3 ($r = 0,83$) e V ($r = 0,79$), reforçando que sua distribuição está intimamente ligada às fases oxídicas e à fração fina do solo. Esse padrão indica um controle geoquímico exercido principalmente pela adsorção em óxidos e hidróxidos de Fe, bem como pela associação com partículas de maior área superficial, típicas da fração argila.

O zinco (Zn) exibe correlações positivas relevantes com argila ($r = 0,72$), Pb ($r = 0,73$), Cu ($r = 0,72$) e Al_2O_3 ($r = 0,78$), evidenciando um comportamento geoquímico semelhante entre esses elementos-traço, fortemente condicionado pela presença de argilominerais, óxidos de Fe e Al e, possivelmente, pela matéria orgânica do solo (Alloway, 2013; Suppi *et al.*, 2022).

O cromo (Cr) e o manganês (Mn) apresentam correlações muito fortes entre si ($r \approx 0,97$) e com Ni ($r \geq 0,96$ para os pares Mn–Ni e Cr–Ni), caracterizando um conjunto de metais que compartilha fontes minerais e comportamento geoquímico semelhante. Essa associação indica que a ocorrência desses elementos está predominantemente relacionada à herança mineralógica do material de origem e à retenção em óxidos e hidróxidos de Fe e Mn formados ao longo do processo pedogenético, mais do que a possíveis contribuições antrópicas. De modo geral, tais padrões refletem processos convergentes de intemperismo químico sob clima úmido, com acúmulo de argila e óxidos secundários, que atuam como principais controladores da distribuição geoquímica dos metais nos solos estudados.

Figura 3 - Matriz de correlação entre elementos traço, atributos físicos e químicos dos cinco perfis de solo



Fonte: Elaborado pelos autores.

4.5 Influência do Material de Origem e atributos morfológicos

Os perfis descritos estão localizados sobre unidades sedimentares paleozoicas (Formações Mafra, Rio Bonito, Rio do Rastro e Terezina), conforme detalhado na Tabela 1. Embora não sejam derivados de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (unidade mesozoica que recobre essas formações em partes da região), alguns dos teores de elementos-traço observados (como Cr, Ni, Cu, V e Zn) assemelham-se, em magnitude, aos descritos para solos desenvolvidos sobre basaltos da Serra Geral (Suppi *et al.*, 2022; Machado; Miquelluti; Campos, 2021). Essa semelhança pode estar associada à contribuição de sedimentos com minerais pesados, à influência de colúvios provenientes de encostas basálticas ou à herança de paleossolos formados sob condições geoquímicas distintas (Sallun; Suguio, 2008). A combinação de relevo de encosta, clima úmido e presença de argilominerais e óxidos de Fe e Al favorece o desenvolvimento de Cambissolos rasos a moderadamente profundos, com acúmulo de matéria orgânica na superfície e formação de horizontes B com alto teor de argila, criando um ambiente propício à retenção de elementos-traço em teores naturalmente elevados.

Do ponto de vista morfológico, os perfis com horizontes A-húmicos com coloração mais escura indicam acúmulo de carbono orgânico, o qual contribui para a complexação de Cu, Pb, Zn e Ni, reduzindo sua biodisponibilidade imediata, embora mantenha altos teores totais no solo (Oliveira, 2008; Wang *et al.*, 2020). Já os horizontes subsuperficiais mais argilosos e de coloração avermelhada a brunada refletem maior concentração de óxidos de Fe, que, segundo Newell *et al.* (2024), atuam como importantes sítios de adsorção para elementos-traço, contribuindo para uma distribuição vertical relativamente estável dos elementos-traço em solos não perturbados.

4.6 Comparação com valores de referência de qualidade.

Os valores dos elementos-traço obtidos foram comparados aos Valores de Prevenção (VP) da Resolução CONAMA n.º 420/2009 e aos Valores de Referência de Qualidade (VRQ) estabelecidos pela Portaria IMA n.º 164/2025 (tabela 7) para solos catarinenses. Ressalta-se que esta comparação tem finalidade interpretativa e exploratória, uma vez que o conjunto amostral contempla cinco perfis representativos. Assim, os resultados não pretendem substituir os VRQs vigentes, mas apresentar evidências de que determinados elementos podem apresentar teores naturais que se aproximam ou excedem VRQs estaduais, o que reforça a importância de

considerar a variabilidade pedogeológica e de ampliar a base amostral regional para avaliações futuras. Em vários casos, elementos como Cr, Ni, Cu e Zn se aproximam ou superam os VRQ definidos para solos com textura argilosa, embora esses teores sejam compatíveis com o background natural de solos derivados de basaltos, conforme relatado por Suppi *et al.* (2022) e pela própria base de calibração com o solo de referência NIST San Joaquin.

Tabela 7 - Valores dos elementos-traço comparados aos Valores de Prevenção (VP) da Resolução e aos Valores de Referência de Qualidade (VRQ)

Elemento	Valor médio	VP Conama	VRQ IMA
		420/2009 (mg kg ⁻¹)	164/2025
Al	62353,18	-	-
As	8,98	15	10,97*
Ba	904,61	150	105,19*
Cd	1,03	1,3	0,12
Cr	87,18	75	43,2
Cu	47,92	60	175,27*
Fe	48445,66	-	-
Mn	606,33	-	-
Ni	102,16	30	24,87
Pb	23,19	72	15,52
Si	295164,83	-	-
V	105,03	-	405,18
Zn	122,51	300	60,88
Zr	175,81	-	-

*Solos com teores de argila >15%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tal constatação reforça que a comparação direta com VRQs estaduais deve ser acompanhada de contextualização litopedológica, pois teores naturalmente elevados podem ocorrer em áreas controladas por rochas máficas, o que justifica discutir a interpretação regionalizada e a necessidade de amostragem ampliada para consolidar faixas de referência específicas (BRASIL, 2009; SUPPI *et al.*, 2022). Assim, os resultados desta pesquisa corroboram a necessidade de valores de referência estratificados por províncias geológicas e

classes de solo, como já sugerido por Wuana e Okieimen (2011) e por estudos recentes em solos catarinenses de encostas basálticas (Machado; Miquelluti; Campos, 2021; Suppi *et al.*, 2022).

4.7 Implicações ambientais e pedogênicas

As fortes correlações entre elementos-traço (Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Mn, V) e atributos como argila, C.O., Al^{3+} , CTC e óxidos de Fe e Al indicam que a retenção desses elementos é associada principalmente por mecanismos naturais de sorção, complexação e co-precipitação, associados à pedogênese sobre rochas máficas. Isso implica que, embora os teores totais possam ser elevados, a biodisponibilidade tende a ser moderada, especialmente em horizontes superficiais ricos em matéria orgânica, o que mitiga riscos imediatos à biota, ainda que não os elimine por completo (Fraga, 2005; Waseem; Arshad, 2016; Rashid *et al.*, 2023).

Por outro lado, a forte acidez e a elevada saturação por Al em alguns perfis indicam que eventuais mudanças de uso do solo, como calagens intensivas ou remoção de cobertura, podem alterar o equilíbrio de adsorção–dessorção e aumentar a mobilidade de certos elementos, sobretudo em condições de variação de pH e de matéria orgânica (Ali; Khan; Ilahi, 2019; Wuana; Okieimen, 2011). Dessa forma, os resultados sugerem que o manejo agrícola e ambiental desses solos deve considerar simultaneamente a textura, o material de origem, a acidez e os teores naturais de elementos-traço, de modo a evitar tanto a subestimação de riscos quanto a classificação indevida de áreas naturais como contaminadas.

Os teores naturais de Cr, Ni e Zn superam VRQs estaduais (Tabela 7), mas não indicam contaminação, tratando-se de *background* regional. A aplicação linear de VRQs pode gerar falsas classificações. Recomendam-se valores estratificados por província geológica (Suppi *et al.*, 2022; Rosini, Rauber; Campos, 2025).

5. Conclusões

- Os resultados obtidos indicam que a distribuição dos elementos-traço nos cinco perfis avaliados do Planalto Norte Catarinense é controlada principalmente por atributos pedológicos, destacando-se a fração argila, o teor de carbono orgânico, a acidez do solo e a presença de óxidos de Fe e Al. Esses fatores exercem papel determinante na retenção e no comportamento geoquímico de elementos como Fe, Mn, Cr, Cu, Zn, Ni, Pb e V,

independentemente de fontes antrópicas, refletindo predominantemente processos naturais de pedogênese.

- Os Cambissolos e o Latossolo desenvolvidos sobre formações sedimentares paleozoicas (Mafra, Rio Bonito, Rio do Rastro e Terezina) apresentaram teores naturalmente elevados de alguns elementos-traço, associados à elevada proporção de argila, ao caráter distrófico e aluminico e às condições de forte intemperismo químico sob clima úmido. As análises de correlação reforçam que a acumulação desses elementos está vinculada a mecanismos de adsorção, complexação e co-precipitação em fases finas do solo, especialmente argilominerais, óxidos de Fe e Al e matéria orgânica, resultando em elevada concentração total, porém com mobilidade potencialmente limitada.
- A comparação dos resultados com os Valores de Referência de Qualidade (VRQs) estabelecidos pela Portaria IMA nº 164/2025 indica que, para alguns elementos, os teores naturais observados podem se aproximar ou exceder os valores de referência estaduais, sem que isso represente contaminação ambiental. Essa constatação evidencia a importância de interpretar os VRQs à luz da variabilidade pedogeológica regional, evitando classificações equivocadas de solos naturalmente enriquecidos como áreas contaminadas.
- Embora baseado em um número limitado de perfis ($n = 5$), o estudo fornece evidências pedogeoquímicas consistentes que contribuem para o entendimento do comportamento natural dos elementos-traço nos solos do Planalto Norte Catarinense. Os resultados reforçam a necessidade de ampliar campanhas de amostragem e de aprofundar a estratificação dos VRQs por classes de solo e contextos litopedológicos, de modo a tornar esses instrumentos mais representativos da diversidade pedológica do estado de Santa Catarina.

Referências

Aldis, M., & Aherne, J. (2021). Exploratory Analysis of Geochemical Data and Inference of Soil Minerals at Sites Across Canada. *Mathematical Geosciences*, 53(6), 1201–1221. <https://doi.org/10.1007/s11004-020-09912-y>

- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Alloway, B. J. (Ed.) (2013). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Almeida, J. A. D., Ribeiro, C. F., Oliveira, M. V. R. D., & Sequinato, L. (2018). Mineralogia da argila e propriedades químicas de solos do Planalto Norte Catarinense. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 17(2), 267–277. <https://doi.org/10.5965/223811711722018267>
- Best, F., Readford, M., & Walcott, K. (2019). Application of multi-element geochemistry in the weathered environment: Controls, considerations and implications for exploration. *ASEG Extended Abstracts*, 2019(1), 1–5. <https://doi.org/10.1080/22020586.2019.12073224>
- Brasil. (2009). Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. *Diário Oficial da União*.
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. (2016). *Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina* (11º ed.).
- Dal Cortivo, N. S., Laurindo Costa Júnior, I., & Lowe Pletsch, A. (2024). Valores de Referência de Qualidade para Íons Metálicos em TFSA e nas Frações Areia, Silte e Argila para Diferentes Classes de Solo do Oeste do Paraná-Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(3), 1560–1581. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.3.p1560-1581>
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). *Manual de métodos de análise de solo*. Centro Nacional de Pesquisa de Solos.
- Fraga, C. G. (2005). Relevance, essentiality and toxicity of trace elements in human health. *Molecular Aspects of Medicine*, 26(4–5), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2005.07.013>
- Machado, M. R., Miquelluti, D. J., & Campos, M. L. (2021). Arsenic in Santa Catarina soils. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 16(5), 1–11. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2720>

- Mackey, E. A., Johnson, C. S., Lindstrom, R. M., Long, S. E., Marlow, A. F., Murphy, K. E., Paul, R. L., Popelka-Filcoff, R. S., Rabb, S. A., Sieber, J. R., Oflaz, R., Tomlin, B. E., Wood, L. J., Yen, J. H., Yu, L. L., Zeisler, R. L., Wilson, S. A., Adams, M. G., Brown, Z. A., ... Nebelsick, J. (2010). *Certification of Three NIST Renewal Soil Standard Reference Materials for Element Content: SRM 2709a San Joaquin Soil, SRM 2710a Montana Soil I, and SRM 2711a Montana Soil II* (NIST SP 260-172; p. NIST SP 260-172). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.260-172>
- Nadporozhskaya, M., Kovsh, N., Paolesse, R., & Lvova, L. (2022). Recent Advances in Chemical Sensors for Soil Analysis: A Review. *Chemosensors*, 10(1), 35. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10010035>
- Newell, M. E., Babbrah, A., Aravindan, A., Rathnam, R., Kiernan, R., Driver, E. M., Bowes, D. A., & Halden, R. U. (2024). Prevalence rates of neurodegenerative diseases versus human exposures to heavy metals across the United States. *Science of The Total Environment*, 928, 172260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172260>
- Oliveira, L. R. (2008). *Metais pesados e atividade enzimática em Latossolos tratados com lodo de esgoto e cultivados com milho* [Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista]. <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/4ea02877-a2c8-477e-b2ba-143a2a95a8ea/content>
- Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A., & Beck, L. (2023). Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*, 13(6), 1521. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
- Rocha, T. A. L. C. G., Silva, S. S. D., Batista, R. O., Farias, P. K. P., Oliveira, P. V. C. D., Oliveira, F. É. R. D., & Cunha, V. T. D. (2024). Valores de referência de qualidade do solo em território brasileiro. *Contribuciones A Las Ciencias Sociales*, 17(13), e14024. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-445>
- Rosini, D. N., Matias, C. A., Lopes, B. C., Muniz, B. R. B., Delfino, F. A., Borges, L. V., & Campos, M. L. (2024). Caracterização dos teores naturais de bário em diferentes solos no

estado de Santa Catarina. *Agropecuária Catarinense*, 37(2), 45–51.
<https://doi.org/10.52945/rac.v37i2.1750>

Rosini, D. N., Rauber, L. P., & Campos, M. L. (2025). *Desafios da implementação dos valores de referência de qualidade (VRQs) para solos brasileiros*. 51.
<https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/76995>

Sallun, A. E. M., & Suguio, K. (2008). Sedimentological characterization of the quaternary deposits in the region between Marília and Presidente Prudente, São Paulo State, Brazil. *Rem: Revista Escola de Minas*, 61(3), 343–356. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000300013>

Schwertmann, U. (1958). The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. Em B.A. Stewart (Ed.), *Advances in Soil Science* (V. 1, pp. 171–200). Springer New York.
https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5046-3_5

Short, N. M. (1961). Geochemical Variations in Four Residual Soils. *The Journal of Geology*, 69(5), 534–571. <https://doi.org/10.1086/626770>

Steffens, G. D. L., Rosini, D. N., Suppi, I. M., Scopel, E. D. S., Souza, L. C. D., Almeida, J. A. D., Miquelluti, D. J., Laus, R., & Campos, M. L. (2025). Soil Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Mn, Pb, and Zn contents in the Basaltic Hillsides of Santa Catarina, Brazil. *Ciência Rural*, 55(8), e20240287. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240287>

Suppi, I. M., De Souza, L. C., Huguen, C., Miquelluti, D. J., & Campos, M. L. (2022). Trace elements reference values for soils from santa catarina, brazil. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, 26(3), 328–337. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2022v26n3p328-337>

Tedesco, M. J., Gianello, C., Bissani, C. A., Bohnen, H., & Volkweiss, S. J. (1995). *Análises de solo, plantas e outros materiais* (2ª ed.). Departamento de Solos, UFRGS.

Wang, X., Dan, Z., Cui, X., Zhang, R., Zhou, S., Wenga, T., Yan, B., Chen, G., Zhang, Q., & Zhong, L. (2020). Contamination, ecological and health risks of trace elements in soil of landfill and geothermal sites in Tibet. *Science of The Total Environment*, 715, 136639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136639>

Waseem, A., & Arshad, J. (2016). A review of Human Biomonitoring studies of trace elements in Pakistan. *Chemosphere*, 163, 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.011>

Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1–20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Elias da Silva Scopel: Elaboração, coleta, organização e análise dos dados, tabelas, gráficos, mapas, escrita e discussão; Daniely Neckel Rossini: Revisão; Tamiris Amorim: Coleta e análises; Samara Alves Testoni: Revisão; David José Miquelluti: organização e análise dos dados; Mari Lucia Campos: Orientação, revisão, escrita e discussão.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Uso de Inteligência Artificial: Os autores declaram que ferramentas de inteligência artificial generativa (ChatGPT, OpenAI) foram utilizadas durante a preparação deste manuscrito exclusivamente para aprimoramento da legibilidade, estrutura linguística e organização textual. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para gerar resultados científicos, interpretações ou conclusões. Os autores revisaram e aprovaram integralmente a versão final do manuscrito e assumem total responsabilidade pelo conteúdo apresentado.

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho.