



Metais potencialmente tóxicos em solos cultivados com cana-de-açúcar

Potentially toxic metals in soils cultivated with sugar cane

Rozilda Vieira Oliveira¹, Washington Luiz Cotrim Duete²

RESUMO: O uso intensivo de insumos agrícolas e a ausência de rotação de cultura contribuem para a degradação química do solo. Na região do Recôncavo da Bahia, o cultivo de cana-de-açúcar, iniciado desde o período colonial, ainda permanece em alguns municípios como monocultura. Este estudo foi desenvolvido nos municípios de Amélia Rodrigues e São Sebastião do Passé, Bahia, com o objetivo de avaliar os teores pseudototais de metais em solos cultivados com cana-de-açúcar e adubados com torta de filtro, vinhaça, N, P e K. As amostras de solos foram coletadas em glebas de cana-de-açúcar nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, contemplando quatro classes de solos: Vertissolo Háptico (VCo), Vertissolo Hidromórfico (VGz), Luvisolo Crômico (TCo) e Argissolo Amarelo (PADx). Para avaliação dos metais Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn e Fe foi utilizado o extrator água régia, tendo as determinações analíticas sido feitas por espectrometria de absorção atômica. Nos Vertissolos, os teores de Cd, Co e Mn foram superiores aos valores máximos recomendados para uso agrícola do solo. No Luvisolo, apenas o Cd registrou teores acima do valor de prevenção e no Argissolo as concentrações dos metais ficaram abaixo dos valores de prevenção. Os resultados indicam a necessidade de um programa de monitoramento da qualidade do solo.

Palavras-chave: Agricultura; Água-régia; Poluição do solo

ABSTRACT: The intensive use of agricultural inputs and the lack of crop rotation contribute to the soil chemical degradation. Sugar cane cultivation started in the *Recôncavo* region of Bahia State (BA), Brazil, since the colonial period and still remains in some municipalities as monoculture. This study was carried out in the municipalities of Amélia Rodrigues and São Sebastião do Passé, BA, aiming to evaluate the pseudototal metal contents in soils cultivated with sugar cane and fertilized with filter pie, vinasse, N, P, and K. Soil samples were collected on sugar cane plots at depths of 0 to 20 cm and 20 to 40 cm, covering four soil classes: (a) Haplic Vertisol; (b) Hydromorphic Vertisol; (c) Chromic Luvisol; and (d) Yellow Argisol. The aqua regia extractor was used to evaluate the metals Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, and Fe and analytical determinations were made by atomic absorption spectrometry. Cd, Co, and Mn levels were higher in Vertisols than the maximum values recommended for agricultural soil use. Just Cd registered levels above the prevention value in Luvisol, and metal concentrations were below prevention values in Argisol. The results indicate the need for a soil quality monitoring program.

Keywords: Agriculture; Aqua regia; Soil pollution.

Autor correspondente: Rozilda Vieira Oliveira
E-mail: rvoliveira@uneb.br

Recebido em: 23/05/2022
Aceito em: 01/04/2024

¹ Doutora em energia e Ambiente pela UFBA Docente no Programa de Pós-Graduação em Estudos Territoriais (PROET) na Universidade do Estado da Bahia (UNEB), Salvador (BA), Brasil.

² Doutor em Solos e Nutrição de Plantas pela USP. Docente do Curso de Engenharia Agrônoma do Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas (BA), Brasil.

INTRODUÇÃO

A zona canavieira do Recôncavo Baiano compreende os municípios cujo processo histórico de ocupação foi impulsionado pela existência de engenhos para a produção açucareira. Conforme afirma Szmrecsányi (1979), a cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum*, se adaptou às condições edafoclimáticas do Brasil, e durante o período colonial foi intensamente cultivada ao longo da costa do Brasil, apresentando bons rendimentos, principalmente no Recôncavo Baiano e Pernambuco. Nos dias atuais, ainda há registros desse processo nas paisagens, o qual é expresso pelos canaviais que margeiam a BR-324 nos domínios dos Vertissolos cultivados desde então. Os municípios que se destacam na produção de cana-de-açúcar no Recôncavo da Bahia são Amélia Rodrigues, Cachoeira, Muniz Ferreira, Santo Antônio de Jesus, Santo Amaro da Purificação, São Francisco do Conde, São Felipe, São Sebastião do Passé e Terra Nova (IBGE, 2022).

Nesse sistema de produção, os resíduos da agroindústria açucareira, torta de filtro e vinhaça, são frequentemente incorporados ao solo. A torta de filtro, além de apresentar propriedades corretivas da acidez do solo, tem quantidades expressivas de ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu) (Almeida Júnior *et al.*, 2011; Bridhikitti *et al.*, 2023; Leão *et al.*, 2022). Da mesma forma, a vinhaça, além da matéria orgânica, apresenta altos teores de potássio (K), nitrogênio (N), zinco (Zn), manganês (Mn) e cobre (Cu) (Bridhikitti *et al.*, 2023; Leão *et al.*, 2022). Nos solos cultivados com cana-de-açúcar é comum a associação da adubação fosfatada com a torta de filtro, precedida da aplicação de calcário. Para atender à demanda da cultura, são utilizados de 100 a 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no sulco de plantio e 80 a 150 kg ha⁻¹ de K₂O tanto para cana-planta quanto nas soqueiras (Rossetto e Santiago, 2022).

O uso intensivo do solo para produção agrícola pode alterar suas propriedades e comprometer a capacidade produtiva dos agroecossistemas e a qualidade dos corpos hídricos. A aplicação desordenada de insumos agrícolas e o manejo inadequado do solo, com predomínio de monoculturas, são algumas das causas do processo de degradação e redução da fertilidade do solo. Estudos relativos a metais pesados nos ecossistemas têm indicado concentrações elevadas de chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), mercúrio (Hg), arsênio (As) e de outros elementos em áreas próximas de complexos industriais urbanos e nas áreas de agricultura altamente tecnificada (Ramalho; Amaral Sobrinho, 2001; Ramos *et al.*, 2020).

O incremento dos teores de metais potencialmente tóxicos tem preocupado os pesquisadores, principalmente pelo risco de comprometer a segurança alimentar e a saúde pública. Com o objetivo de estudar os efeitos do uso de resíduos agroindustriais em solos cultivados com cana-de-açúcar, Ramalho e Amaral Sobrinho (2001) avaliaram os teores de metais em solos Gley pouco húmicos e Cambissolos, sob cultivo de cana desde 1970, utilizando a vinhaça e a torta de filtro por mais 10 e 20 anos, respectivamente, no município de Campos dos Goitacazes, RJ. Os resultados mostraram que a vinhaça só trouxe aumento significativo para os teores totais de Zn, a torta de filtro apresentou aumentos significativos para os teores de Cd, cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni) e chumbo (Pb). Entretanto, a maior porcentagem desses elementos estava na fração residual, de baixa biodisponibilidade. Estudos recentes avaliando a concentração de metais potencialmente tóxicos em solos cultivados com cana-de-açúcar e adubados com vinhaça e/ou fertilizantes químicos têm indicado incremento nos teores de Pb (Silva, 2019), Cr (175, 60 mg kg⁻¹), Co (53,70 mg kg⁻¹) (Serafim, 2020), Cd (Bento *et al.*, 2022), Zn e Fe (Bridhikitti *et al.*, 2023). A aplicação da torta de filtro contribuiu para elevar os teores dos metais Cr, Fe, As, Cd e Mn, modificando as propriedades físico-químicas do solo com o incremento de matéria orgânica (Bridhikitti *et al.*, 2023).

A presença de metais no solo ocorre de forma natural em razão do processo de intemperismo das rochas, mas pode atingir concentração elevada em razão de ações antrópicas (Bento *et al.*, 2022; Ramos *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2019). Apesar de estarem associados à toxidez, alguns metais são essenciais como o

Fe, Mn, Cu e Zn e benéficos como o Co. Dessa forma, é importante identificar e monitorar a concentração desses metais no sistema para definir quando são considerados contaminantes, bem como avaliar o potencial do solo para fornecer micronutrientes ao metabolismo vegetal, a médio e longo prazos. Neste contexto, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) adota o termo contaminação para designar a presença de substâncias químicas no meio ambiente, em resposta a uma ação antrópica que pode comprometer o uso desse recurso, oferecendo riscos à saúde pública e ao meio ambiente (CONAMA, 2009).

A Resolução do CONAMA nº 420, de 28/12/2009, dispõe sobre critérios e valores orientadores da qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Esse documento define o valor de prevenção (VP) - concentração acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo, indicando sua capacidade de sustentar suas funções primárias; e valor de investigação (VI) - concentração acima da qual há riscos potenciais diretos ou indiretos à saúde humana, considerando um cenário de exposição agrícola, Área de Proteção Máxima (APMax), residencial e industrial. Estabelece que os valores de referência de qualidade (VRQs), concentração que define a qualidade natural do solo, serão definidos pelos órgãos ambientais competentes de cada Estado e do Distrito Federal. Ressalta ainda que a proteção do solo deve ser feita de maneira preventiva, mantendo sua funcionalidade, ou de maneira corretiva, visando a restaurar sua qualidade em compatibilidade com os usos previstos (Brasil, 2009).

Com base no exposto, este estudo visa a responder à seguinte questão problema: As concentrações de metais nos solos cultivados com cana-de-açúcar desde o período colonial, no Recôncavo da Bahia, estão de acordo com os valores sugeridos pelo CONAMA?

Esta pesquisa é relevante para avaliar se o uso contínuo do solo com a cana-de-açúcar e a aplicação de resíduos da agroindústria açucareira tem contribuído para o acúmulo de metais tóxicos no solo. Por se tratar de uma região produtora de cana-de-açúcar desde o período colonial, ela se torna um laboratório a céu aberto para esta pesquisa. O acúmulo de metais no solo pode comprometer a cadeia alimentar através da absorção de nutrientes pelas plantas. Como na região do Recôncavo é comum a comercialização do caldo de cana *in natura*, o monitoramento da concentração desses metais no solo é de suma importância para garantir a segurança alimentar, a qualidade dos mananciais e, conseqüentemente, a saúde da população. Apesar da relevância do tema, pesquisas dessa natureza ainda são incipientes nesta área de estudo.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi determinar os teores pseudototais de Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn e Fe em solos cultivados com cana-de-açúcar no Recôncavo da Bahia, bem como analisar as correlações com o pH, a matéria orgânica e a argila.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida nos municípios de Amélia Rodrigues e São Sebastião do Passé, Bahia, pertencentes à mesorregião metropolitana de Salvador e à microrregião de Catu, Figura 1, conforme divisão administrativa do IBGE (2020). A seleção destes municípios se justifica pelo histórico de produção de cana-de-açúcar desde o período colonial e pela extensa área de cultivo ainda existente.

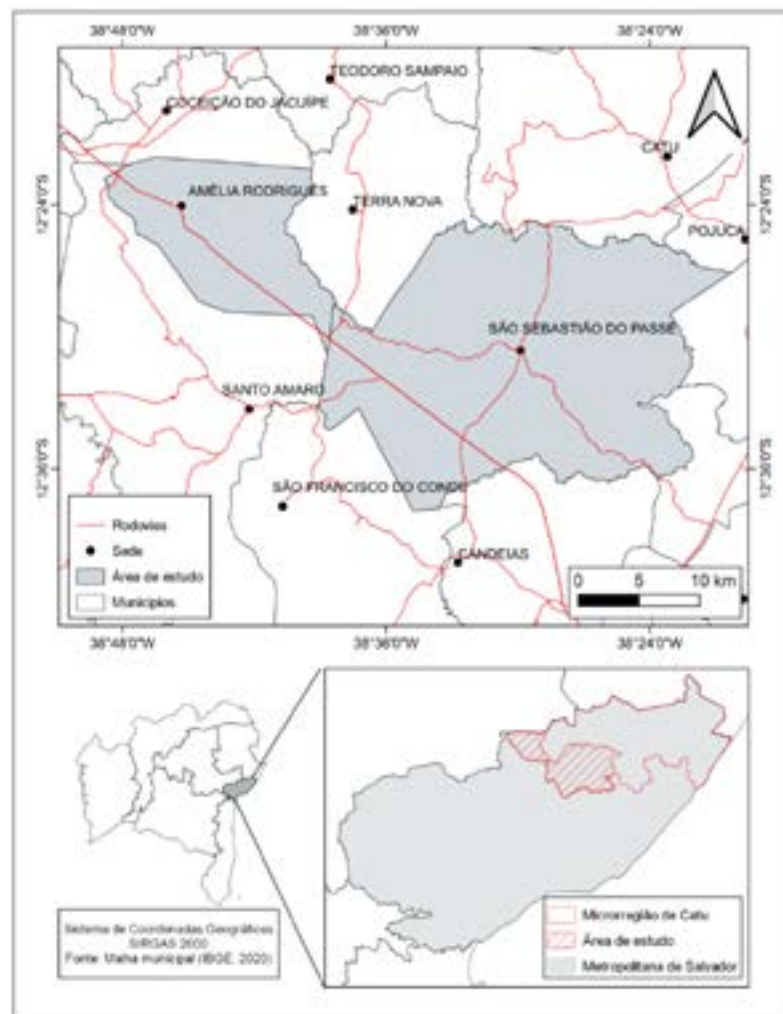


Figura 1. Localização dos municípios de Amélia Rodrigues e de São Sebastião do Passé, Bahia (2022)
 Fonte: IBGE (2020). Elaboração: Os autores (2022).

O clima da região é tropical chuvoso do tipo Am, com vegetação primária original do tipo subperenifólia, restando apenas alguns remanescentes em razão do cultivo expressivo de cana-de-açúcar. A área está inserida nos domínios dos Planaltos Pré-Litorâneos e da Bacia Sedimentar do Recôncavo, com relevo de topos aplainados, bordas desniveladas com degraus e planos embutidos às encostas de forma predominantemente convexas, dissecadas nas rochas sedimentares arenosas e argilosas (IBGE, 2018).

A geologia da área é caracterizada por sedimentos do Cretáceo Inferior e Terciário, Grupo Santo Amaro, Formação Candeias e Formação Barreiras, respectivamente. A Formação Candeias é constituída por folhelhos de coloração cinza-chumbo, basal, seguido de folhelhos sílticos, cinza-esverdeados, calcíferos, micáceos, carbonosos, ricos em ostracoides. Na parte superior da formação, há intercalações de lentes de arenitos cinza e calcários criptocristalinos. A Formação Barreiras capeia parte da bacia do Recôncavo e do substrato cristalino, sendo constituída por camadas arenosas e argilosas, por vezes, conglomeráticas (IBGE, 2018).

A cobertura pedológica predominante é de Argissolo Amarelo Distrocoeso arênico fragipânico espódico – PAdx, Vertissolo Háplico Órtico gleissólico – VCo; Vertissolo Hidromórfico Sáfico Solódico - VGz e Luvissole Crômico Órtico planossólico vértico - TCo, localizados na região fisiográfica da Zona da Mata (Oliveira, 2020). O Quadro 1 apresenta a caracterização geral das classes de solo e o manejo. As características físicas e químicas dos horizontes pedogenéticos estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Quadro 1. Descrição geral das classes de solo e manejo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Recôncavo da Bahia, 2022

Classe de solo	Material de Origem	Clima	Uso atual	Manejo	Município Coordenadas (UTM SIRGAS 2000)
VERTISSOLO HÁPLICO Órtico gleissólico (VCo), A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical e subperenifólia, relevo plano.	Folhelhos calcários, siltitos e arenitos Grupo Santo Amaro – Formação Candeias	Clima tropical chuvoso do tipo Am	Cana-de-açúcar	Torta de filtro Vinhaça Nitrogênio Fósforo	Amélia Rodrigues 535269 E e 8622164 N
VERTISSOLO HIDROMÓRFICO SÁLICO Solódico (VGz), textura muito argilosa, A chernozêmico, fase floresta tropical subperenifólia, relevo plano.	Folhelhos calcários, siltitos e arenitos Grupo Santo Amaro – Formação Candeias	Clima tropical chuvoso do tipo Am	Cana-de-açúcar	Nitrogênio Potássio	Amélia Rodrigues Coordenadas: 534277 E e 8622364 N
LUVISSOLO CRÔMICO Órtico planossólico vértico (TCo), textura argilosa/muito argilosa, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia, relevo suave ondulado.	Folhelhos calcários, siltitos e arenitos Grupo Santo Amaro – Formação Candeias	Clima tropical chuvoso do tipo Am	Cana-de-açúcar	Nitrogênio Potássio	São Sebastião do Passé Coordenadas: 539511 E e 8617982 N
ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso fragipânico (PAdx), textura arenosa/média, A moderado, fase floresta tropical subperenifólia relevo plano.	Areias, arenitos e argilas Formação Barreiras	Clima tropical chuvoso do tipo Af	Cana-de-açúcar	Torta de filtro Nitrogênio Potássio	Amélia Rodrigues Coordenadas: 526397 E e 8625345 N

Fonte: Oliveira (2020). Elaboração e adaptação: os autores (2022)

2.2 COLETA DE AMOSTRAS DE SOLOS

Para avaliação dos teores pseudototais de metais, foram coletadas, em zigue-zague, 20 amostras simples, nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, em cada gleba de cana-de-açúcar, perfazendo cinco amostras compostas por profundidade nas quatro classes de solos, Quadro 1, totalizando 40 amostras compostas. Após a coleta, as amostras foram postas para secar ao ar até atingirem 4 a 6% de umidade e passadas em peneira de malha 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Tabela 1. Atributos físicos dos solos da Zona Canvieira do Recôncavo da Bahia

Hor.	Prof.	Granulometria				ADA ^{1/}	GF ^{2/}	Silte/ Argila	Dp ^{3/}	Ds ^{4/}	Poros Totais
		Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila						
	cmg kg ⁻¹%		g cm ⁻³		cm 100 cm ⁻³
Vertissolo Háplico Órtico gleissólico - VCo											
A	0-10	44	56	322	578	396	31	0,56	2,62	1,52	42
AB	-19	37	52	324	587	452	23	0,55	2,65	1,67	37
Biv	-50	5	21	111	863	626	27	0,13	2,75	1,42	48
Cv ₁	-90	6	23	114	857	587	32	0,13	2,75	1,40	49
Cg ₂	-110 -140	6	29	127	838	588	30	0,15	2,76	1,41	49
Cg ₃	-150	9	18	126	847	601	29	0,15	2,74	1,47	46
Vertissolo Hidromórfico Sílico solódico - VGz											

Hor.	Prof.	Granulometria				ADA ^{1/}	GF ^{2/}	Silte/ Argila	Dp ^{3/}	Ds ^{4/}	Poros Totais
		Arcia Grossa	Arcia Fina	Silte	Argila						
A ₁	0-10	19	28	268	685	537	22	0,39	2,74	1,62	41
A ₂	-35	16	26	270	688	584	15	0,39	2,48	1,68	32
ACg	-50	16	24	248	712	627	12	0,35	2,63	1,50	43
Cvg ₁	-65 -80	11	15	260	715	673	6	0,36	2,63	1,45	45
	-135 - 145	38	15	254	694	658	5	0,37	2,79	1,58	43
	185+	12	6	414	568	526	8	0,73	2,74	1,70	38
Luvissole Crômico Órtico planossólico vértico - TCo											
A	0-15	100	127	372	402	337	16	0,92	2,60	1,55	40
AB	-22	97	124	355	424	369	13	0,84	2,60	1,55	40
Btg _v	-63 -90	47	51	219	684	557	19	0,32	2,67	1,48	45
	-105 -140	58	65	224	653	573	12	0,34	2,64	1,42	46
	-145 -180	44	52	226	678	628	7	0,33	2,64	1,56	41
CR	180+	36	33	180	752	744	1	0,24	2,52	1,42	44
Argissolo Amarelo Distrocioso arênico fragipânico espódico - PAdx											
A	0-27	634	232	56	78	71	9	0,71	2,65	1,63	38
E	-52	593	262	79	66	66	0	1,19	2,65	1,77	33
Bt ₁	-68	543	260	87	110	88	20	0,79	2,64	1,71	35
	-80	625	156	79	139	90	36	0,57	2,42	1,47	39
Btx ₃	-105	381	169	141	309	179	42	0,45	2,58	1,67	35
Bt ₄	-148 -163	383	168	116	333	205	38	0,35	2,61	1,53	41
Bt ₅	200+	320	148	78	454	247	45	0,17	2,63	1,40	47

^{1/} Argila dispersa em água; ^{2/} grau de floculação; ^{3/} densidade da partícula; ^{4/} densidade do solo
Fonte: Oliveira (2020).

2.3 PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

As determinações dos teores de Cd, Co, Cr, Cu, Zn, Ni, Pb, Mn e Fe nas amostras foram feitas em triplicata, pesando 250 mg de TFSA, previamente triturada em gral e passada em peneira com malha de 150 µm. A extração foi feita em água régia, adicionando 9 mL de HCl 37% e 3 mL de HNO₃ 65%, e as amostras foram deixadas em repouso em temperatura ambiente por uma noite. Em seguida, foram postas no bloco digestor e a cada tubo foi adicionado um funil de vidro (com 3 cm de diâmetro)

Tabela 2. Atributos químicos dos solos da Zona Canavieira do Recôncavo da Bahia

Hor.	Prof.	pH (1:2,5)			P	C. O.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	H ⁺	Al ³⁺	T	V	m
		KCl														
	cm				mg dm ⁻³	g kg ⁻¹ cmol _c dm ⁻³ %				
Vertissolo Háplico Órtico gleissólico – Vco																
A	0-10	5,6	4,4	4,8	8	24,89	21,6	7,3	0,88	0,31	30,1	8,2	0,1	38,4	78	0
AB	-19	5,1	3,9	4,4	2	15,89	21,2	7,2	0,34	0,33	29,1	8,6	0,3	38,0	77	1
Biv	-50	4,8	3,3	3,9	< LQ	9,49	13,8	12,6	0,33	0,81	27,5	6,5	16,0	50,0	55	37
Cv ₁	-90	5,1	3,2	3,7	< LQ	4,84	7,0	10,8	0,33	1,17	19,3	5,4	24,2	48,9	39	56
Cg ₂	-110 -140	5,4	3,2	3,7	< LQ	4,22	7,9	11,4	0,36	1,58	21,2	4,9	24,2	50,3	42	53
Cg ₃	-150	5,6	3,2	3,8	< LQ	3,86	15,9	12,9	0,39	1,95	31,1	4,9	16,4	52,4	59	34
Vertissolo Hidromórfico Sáfico solódico – VGz																
A ₁	0-10	6,0	4,5	5,2	27	27,41	41,8	13,4	0,84	0,27	56,3	8,0	< LQ	64,3	88	0
A ₂	-35	6,6	5,0	5,8	5	17,62	43,4	15,6	0,35	0,45	59,8	4,4	< LQ	64,2	93	0
ACg	-50	6,9	5,3	6,2	3	16,99	41,6	17,0	0,25	1,36	60,2	2,8	< LQ	63,0	96	0
Cvg ₁	-65 -80	7,0	5,7	6,6	2	7,80	46,2	18,5	0,27	2,80	67,8	0,9	< LQ	68,7	99	0
Cvgn ₂	-135 -145	8,0	6,6	7,5	18	4,71	39,6	21,6	0,15	4,29	65,6	< LQ	< LQ	65,6	100	0
2Cvgn		8,1	6,8	7,7	39	3,44	32,8	14,0	0,14	4,76	51,7	< LQ	< LQ	51,7	100	0
Luvisolo Crômico Órtico planossólico vértico – Tco																
A	0-15	4,5	3,4	3,8	3	16,29	6,4	6,9	0,30	0,16	13,8	8,3	3,3	25,4	54	19
AB	-22	4,7	3,4	3,9	2	14,23	6,1	7,1	0,22	0,17	13,6	8,4	3,4	25,4	54	20
Btgv	-63 -90	4,8	3,3	3,8	< LQ	7,65	5,0	9,2	0,33	0,94	15,5	8,5	12,0	36,0	43	44
Cvgn ₁	-105 -140	4,5	3,3	3,8	< LQ	6,07	3,4	3,6	0,34	1,89	9,2	7,8	10,7	27,7	33	54
Cvgn ₂	-145 -180	4,7	3,4	4,2	< LQ	5,34	8,7	10,1	0,25	4,98	24,0	5,4	2,2	31,6	76	8
CR		6,7	5,2	6,2	35	4,82	12,1	21,4	0,30	7,29	41,1	1,2	< LQ	42,3	97	0
Argissolo Amarelo Distrocoeso arênico fragipânico espódico - PAdx																
A	0-27	4,5	4,1	4,0	24	12,92	0,2	0,1	0,03	0,01	0,3	4,9	0,6	5,8	5	67
E	-52	4,5	4,2	4,1	4	7,75	0,1	0,1	0,01	< LQ	0,2	4,1	0,5	4,8	4	71
Bt ₁	-68	4,6	4,3	4,2	4	14,18	0,1	< LQ	0,01	< LQ	0,1	7,3	0,5	7,9	1	83
Bthx ₂	-80	4,8	4,3	4,3	4	48,46	0,2	0,1	0,03	0,01	0,3	16,3	0,6	17,2	2	67
Btx ₃	-105	4,9	4,6	4,6	1	18,46	0,2	< LQ	0,02	0,01	0,2	7,5	0,2	7,9	2	50
Bt ₄	-148 -163	5,0	4,7	4,7	2	8,06	0,1	< LQ	0,01	0,01	0,1	4,8	0,1	5,0	0	50
Bt ₅		4,9	4,4	4,4	4	8,46	0,1	0,1	0,01	0,01	0,2	5,7	0,3	6,2	3	60

Fonte: Oliveira (2020).

A temperatura foi gradualmente elevada para $140^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$, sendo os tubos retirados quando restava apenas 1 a 1,5 mL da mistura. Após resfriamento, foram adicionados 10 mL de HCl a 20% (v/v) e as amostras reaquecidas a $80^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{C}$ por 20 minutos. Posteriormente, os extratos foram filtrados e o volume ajustado para 25 mL (Fadigas, 2002). As determinações foram feitas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). As leituras obtidas nos extratos foram feitas utilizando os seguintes comprimentos de onda (nm): Cd (226,502), Co (228,616), Cr (267,716), Cu (324,754), Fe (259,940), Mn (257,610), Ni (231,604), Pb (220,353) e Zn (213,856) (Abreu, C; Abreu, M; Andrade, 2001).

Para interpretação dos teores de metais, foram utilizados os valores orientadores para solos definidos pelo CONAMA (2009), classificados como valor de prevenção (VP) e valor de intervenção (VI). Como na Bahia ainda não foram definidos valores de referência de qualidade (VRQ) para os metais potencialmente tóxicos, neste estudo foram utilizados como referência os valores propostos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2021) e pela Agência de Meio Ambiente do Estado de Pernambuco (CPRH, 2014), por apresentar zonas fisiográficas semelhantes ao Estado da Bahia. Foram também utilizadas informações da literatura, amparadas em pesquisas feitas em condições edafoclimáticas similares às da área de estudo (Biondi *et al.*, 2011; Fadigas *et al.*, 2006) (Tabela 3).

Tabela 3. Valores orientadores para concentração de metais no solo

Substâncias	Prevenção ¹	Investigação ¹			VRQ ² (CETESB, 2021)	VRQ ³ (CPRH, 2014)
		Agrícola APMax	Residencial	Industrial		
..... mg kg ⁻¹						
Cádmio	1,3	3,0	8,0	20	< 0,5	0,5
Cobalto	25	35	65	90	13	4,0
Cromo	75	150	300	400	40	35
Cobre	60	200	400	600	35	5,0
Manganês	-	-	-	-	-	-
Níquel	30	70	100	130	13	9,0
Chumbo	72	180	300	900	17	13
Zinco	300	450	1.000	2.000	60	35
Ferro	-	-	-	-	-	-

Fonte: ¹Valores orientadores (CONAMA, 2009), ²Valores de referência de qualidade (CETESB, 2021), ³Valores de referência de qualidade (CPRH, 2014)

A determinação do pH foi feita em água, utilizando um potenciômetro com eletrodo de vidro na relação terra/solução 1:2,5. A matéria orgânica foi obtida pelo método volumétrico, utilizando o dicromato de potássio. Os teores de argila total foram determinados pelo método da pipeta, utilizando o dispersante Na OH 1 mol L⁻¹. Todas as análises foram feitas conforme Teixeira *et al.* (2017).

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Aos resultados das análises foram empregadas a estatística descritiva e a correlação linear simples de Pearson entre os metais e as características do solo, incluindo pH, matéria orgânica e argila total, utilizando o programa Jamovi v. 2.2.5.0.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores máximos para todos os metais foram observados no Vertissolo Háptico Órtico gleissólico (VCo) e no Vertissolo Hidromórfico Sáfico solódico (VGz), seguidos do Luvisolo Crômico Órtico planossólico vértico (TCo), com valores mínimos para o Argissolo Amarelo Distrocoeso arênico fragipânico espódico (PAdx) (Tabela 4). Os valores mais baixos observados no Argissolo se devem ao material de origem pré-intemperizado, areia, arenito e argilas da formação Barreiras. Enquanto os Vertissolos e Luvisolo são solos menos intemperizados, tendo como material de origem folhelhos calcários, textura argilosa, com predomínio de argila do tipo 2:1 de alta atividade (Quadro 1).

Tabela 4. Médias dos teores de metais e coeficientes de variação em solos cultivados com cana-de-açúcar, municípios de Amélia Rodrigues e São Sebastião do Passé, Bahia, 2022

Solo	Prof.cm.....	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe
VCo	0 - 20	3,0	54,1	74,5	67,9	1.955,0	40,8	27,1	97,7	48,2
	20 - 40	3,6	10,0	109,0	54,5	103,0	35,5	18,3	62,1	57,8
VGz	0 - 20	2,5	26,9	67,2	71,6	1.072,0	36,4	20,9	111,6	42,1
	20 - 40	2,7	36,1	70,3	63,5	1.451,0	42,3	20,6	78,0	50,0
TCo	0 - 20	1,4	13,1	35,1	29,7	216,0	21,0	18,0	44,6	25,6
	20 - 40	1,5	12,5	36,7	31,7	186,0	21,8	18,4	44,1	26,1
PAdx	0 - 20	0,4	1,9	7,6	5,9	84,1	2,4	12,5	6,3	4,1
	20 - 40	0,3	1,9	6,9	3,0	99,1	1,6	7,6	4,7	4,5
Média		1,9	19,6	50,9	41,0	645,8	25,2	17,9	56,1	32,3
CV		63,1	93,2	69,8	66,8	114,8	64,8	32,4	69,7	63,7

Elaboração: os autores (2022)

As médias das concentrações de metais ocorreram na seguinte ordem: Fe > Mn > Zn > Cr > Cu > Ni > Co > Pb > Cd, com valores de coeficiente de variação (CV) entre 32,4 e 114,8%. O Pb apresentou menor coeficiente de variação, sugerindo baixa variação entre as classes de solos e as profundidades, enquanto o Mn apresentou o mais elevado coeficiente de variação com altos teores nos Vertissolos (Tabela 4). Valores de CVs entre 30 e 50% ou superiores são frequentes para muitos metais no solo quando as amostras são coletadas aleatoriamente (Gharaibeh *et al.*, 2020). Neste estudo, a variação das classes de solos, material de origem e grau de intemperismo justifica a variabilidade observada.

Nos Vertissolos, as concentrações dos metais Cr, Cu, Ni, Pb e Zn não oferecem riscos ao uso agrícola, estando abaixo dos valores de investigação (VI) sugeridos pelo CONAMA (2009). Entretanto, os teores de Cr no VCo na profundidade de 20 a 40 cm e Ni em ambas as profundidades nos Vertissolos foram superiores aos limites de prevenção. Concentrações mais elevadas, acima do valor máximo permitido para uso agrícola, foram observadas para os metais Cd e Co no VCo e Co no VGz (Tabela 4). Incrementos nos teores de Cd em solos cultivados, durante cinco anos, com cana-de-açúcar e adubação inorgânica, foram observados por Bento *et al.* (2022). Entretanto, segundo os autores, os valores obtidos (0,15 a 1,07 mg kg⁻¹) não representaram riscos ao meio ambiente, pois as concentrações permaneceram abaixo dos valores máximos permitidos e os teores de Co estiveram abaixo do limite de detecção do método utilizado. A torta de filtro

promoveu aumento nos teores de Cd (mediana 1,35 mg kg⁻¹) em solos cultivados com cana-de-açúcar (Bridhikitti *et al.*, 2023). Convém ressaltar que valores mais elevados para Cd, variando de 5,99 a 20,76 mg kg⁻¹, foram observados por Souza (2014) nos horizontes superficiais de um Vertissolo Háplico órtico no município de Santo Amaro, Recôncavo da Bahia, em área contaminada por uma minerometalúrgica de chumbo. A Tabela 4 mostra que, estes valores estão muito acima dos obtidos na área de estudo.

Importante ressaltar que, apesar de os teores pseudototais obtidos para Cd, dados da literatura indicarem baixa disponibilidade desse elemento nos solos, ele apresentou forte correlação com os teores de argila ($r = 0,92$) e de Fe ($r = 0,99$), bem como ausência de correlação com pH e carbono orgânico (Tabela 5), sugerindo que a mobilidade desse elemento nos solos da área de estudo é influenciada pelos minerais da fase sólida e apresenta baixa biodisponibilidade.

O Vertissolo (VCo), além da torta de filtro, N e P, é adubado com vinhaça. Concentrações de Co mais elevadas em solos sob tratamento com vinhaça também foram observadas por Ramalho e Amaral Sobrinho (2001) em um Cambissolo, nas profundidades de 0 a 30 cm. Os teores de Co na área controle (AC) eram de 30,7 a 37,4 mg kg⁻¹, aumentando para 42,4 a 47,4 mg kg⁻¹ após tratamento com vinhaça. Para o mesmo solo, o tratamento com torta de filtro elevou os teores de Co de 25,5 para 35,5 mg kg⁻¹ na AC, para 34,5 a 40,4 mg kg⁻¹ após aplicação do resíduo. Elevação nos teores de Co (53 mg kg⁻¹) foi também observada por Serafim (2020) em solos cultivados com cana-de-açúcar e adubados com vinhaça. Esse resultado é muito próximo ao observado na profundidade de 0 a 20 cm no VCo (54,1 mg kg⁻¹) (Tabela 4).

Dessa forma, considerando as classes de qualidade do solo, segundo a concentração de substâncias químicas, estabelecidas pelo CONAMA, os Vertissolos foram classificados na classe 4, que corresponde aos solos que apresentam concentrações de pelo menos uma substância química maior que o valor de investigação. Entretanto, quando a concentração de uma substância for reconhecida como de ocorrência natural, a área não será considerada contaminada, mas será necessária a implementação de ações específicas de proteção à saúde humana pelo poder público competente. Este resultado reforça a necessidade de pesquisas para definir valores naturais de metais potencialmente tóxicos para solos do estado da Bahia. Isto porque os valores observados para Co nos Vertissolos estão acima dos valores máximos (8,97 mg dm⁻³) obtidos para solos da Zona da Mata, PE (Biondi *et al.*, 2011), região fisiográfica similar à área de estudo, bem como supera os valores máximos (Cd = 1,6 mg dm⁻³ e Co = 20 mg dm⁻³) observados por Fadigas *et al.* (2006) para diferentes classes de solos do Brasil.

Nas glebas de cana-de-açúcar cultivadas no Luvisolo e Argissolo, todos os metais avaliados apresentaram concentrações abaixo do valor máximo permitido para o uso agrícola. Entretanto, assim como observado nos Vertissolos, os teores de Cd no Luvisolo foram superiores aos valores de prevenção. Esses dados indicam a necessidade de monitorar a concentração desses metais nos solos, principalmente nos insumos agrícolas utilizados para produção da cana-de-açúcar, evitando comprometer a qualidade do solo e da água. Importante considerar que no perfil do Argissolo as concentrações para todos os metais se situaram abaixo do valor de referência de qualidade, indicando que a aplicação de torta de filtro + nitrogênio + potássio não contribuiu para o acúmulo de metais que comprometessem a qualidade do solo.

Com base nos resultados, o Argissolo obteve classe 1 de qualidade do solo e o Luvisolo foi classificado na classe 3 por apresentar pelo menos uma substância química maior que o valor de prevenção.

Para os teores de Mn e Fe, o CONAMA não definiu valores orientadores. Biondi *et al.* (2011) ressaltam que, apesar de os elementos Mn e Fe não serem referenciados em legislações ambientais, a identificação desses teores é importante por se tratar de micronutrientes e por indicar indiretamente os teores de outros metais pesados.

Os teores de Fe foram mais elevados nos Vertissolos e Luvisolos. Segundo Malavolta (1994), o teor de Fe no solo reflete a natureza do material de origem e os processos pedogenéticos, sendo as rochas sedimentares aquelas que apresentam menores teores de Fe, da ordem de 43 a 48 g kg⁻¹ para os folhelhos,

material de origem desses solos. Neste estudo, o Fe apresentou correlação positiva forte ($r > 0,90$) com Cd, Cr e Cu e moderada ($r \geq 0,65$) com Pb e Zn, enquanto o Mn apresentou correlação positiva moderada ($r > 0,50$) com Co, Ni, Pb e Zn (Tabela 5). Correlação entre Cr e Fe foi também observada por Bento *et al.* (2022) em solos cultivados com cana-de-açúcar e adubados com fertilizantes inorgânicos. Esse comportamento pode ser explicado pela influência positiva do óxido de ferro na especiação do Cr (USEPA, 2007).

Tabela 5. Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre os teores de metais e as propriedades dos solos na profundidade de 0 a 40 cm nos solos cultivados com cana-de-açúcar, no Recôncavo da Bahia, 2022

Atributos	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe
Cd	—								
Co	0,30 ^{ns}	—							
Cr	0,96 ^{***}	0,24 ^{ns}	—						
Cu	0,90 ^{***}	0,49 [*]	0,86 ^{***}	—					
Mn	0,24 ^{ns}	0,95 ^{***}	0,18 ^{ns}	0,44 [*]	—				
Ni	0,22 ^{ns}	0,94 ^{***}	0,20 ^{ns}	0,41 [*]	0,86 ^{***}	—			
Pb	0,68 ^{***}	0,56 ^{**}	0,59 ^{**}	0,65 ^{***}	0,59 ^{**}	0,35 ^{ns}	—		
Zn	0,62 ^{***}	0,87 ^{***}	0,60 ^{**}	0,80 ^{***}	0,78 ^{***}	0,82 ^{***}	0,68 ^{***}	—	
Fe	0,99 ^{***}	0,31 ^{ns}	0,97 ^{***}	0,90 ^{***}	0,24 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,67 ^{***}	0,65 ^{***}	—
pH água	0,34 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,53 ^{**}	0,43 [*]	0,30 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,48 [*]	0,36 ^{ns}
C.O	-0,32 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,31 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	-0,00	-0,21 ^{ns}	-0,34 ^{ns}
Argila total	0,92 ^{***}	0,38 ^{ns}	0,94 ^{***}	0,87 ^{***}	0,28 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,63 ^{***}	0,72 ^{***}	0,94 ^{***}

*, **, *** e ^{ns} significativo a $P < 0,05$; 0,01; 0,001 e não significativo, respectivamente.

Elaboração: os autores (2022)

De acordo com Kabata-Pendias e Pendias (2011), a concentração de Mn de 1.955 mg kg⁻¹ na profundidade de 0 a 20 cm no VCo é considerada excessiva (1.500 a 3.000 mg kg⁻¹). O aumento da disponibilidade de Mn no solo pode causar toxidez às plantas, uma vez que elas absorvem os nutrientes de forma não seletiva. As concentrações desse elemento nos horizontes superficiais, de 0 a 20 cm no VCo e no VGz até a profundidade de 40 cm, indicam provável acúmulo em razão do frequente uso agrícola desses solos com adubações de torta de filtro e vinhaça. Os teores de Mn observados nos horizontes superficiais dos Vertissolos são superiores aos observados por Biondi *et al.* (2011) em solos de referência em Pernambuco, com valores máximos de 530,75 mg kg⁻¹ e 619,50 mg kg⁻¹ nos horizontes superficiais e subsuperficiais, respectivamente. Os resultados obtidos neste estudo estão muito acima dos valores (100 a 160 mg kg⁻¹) observados por Bento *et al.* (2022) em solos cultivados com cana-de-açúcar, durante cinco anos, e adubados com fertilizantes químicos. A elevação dos teores de Mn em solos adubados com torta de filtro e vinhaça tem relatos na literatura (Almeida Júnior *et al.*, 2011; Bridhikitti *et al.*, 2023; Ramalho; Amaral Sobrinho, 2001). É importante ressaltar que os solos da área de estudo são cultivados com cana-de-açúcar desde o período colonial, recebendo frequentes adubações com torta de filtro e vinhaça (Quadro 1).

Os resultados reforçam a necessidade de pesquisas no estado da Bahia para definição dos valores de referência de qualidade para a concentração de metais potencialmente tóxicos no solo, considerando a diversidade do material de origem e condições climáticas tão adversas nos diferentes biomas do Estado. Isto porque a utilização de valores de referência obtidos para solos derivados de material máfico, com teores mais elevados de metais, pode subestimar uma contaminação, caso esses valores sejam comparados com regiões de solos derivados de rochas sedimentares, metamórficas e sedimentos do Terciário (Biondi *et al.*, 2011). As especificidades dos solos de cada região respondem pelas diferenças observadas entre os valores

de referência de qualidade propostos para os estados de São Paulo e Pernambuco, apresentando este último teores mais baixos para todos os metais, exceto para Cd (Tabela 3).

A distribuição dos teores de Cd, Cr, Cu, Pb, Zn e Fe nos perfis apresentou correlação positiva moderada ($r > 0,5$) a forte ($r > 0,9$) com os teores de argila, o que sugere uma associação comum com o material de origem. Resultado semelhante foi obtido por Biondi *et al.* (2011) para os elementos Cu, Fe e Zn e por Bento *et al.* (2022) para Cu e Fe. De acordo com os autores, esse comportamento é resultado da liberação desses metais pelos minerais de argila ou pela sua afinidade com sítios de troca na superfície dos minerais de argila. Conforme dados da literatura, o Zn, associado aos óxidos de Fe e Mn, é facilmente adsorvido aos minerais de argila (USEPA, 2007), explicação que confirma os resultados obtidos neste trabalho, em que o Zn apresentou correlação moderada com Fe ($r = 0,65$), Mn ($r = 0,78$) e argila ($r = 0,72$) (Tabela 5).

Os teores de Co apresentaram correlação positiva forte com os teores de Mn e Ni e moderada com Zn e Pb (Tabela 5). Estes resultados concordam com os observados por Biondi *et al.* (2011) quando avaliaram teores naturais de metais em solos de referência em Pernambuco. Além dos metais acima, os autores observaram também correlação positiva entre os teores de Co e os atributos pH e argila, atribuindo esse comportamento à influência do material de origem na distribuição dos teores de Co no solo. Entretanto, neste trabalho, a associação entre os teores dos metais Co, Mn e Ni bem como a ausência de correlação entre eles e os valores de carbono orgânico e argila evidenciam a influência do uso e do manejo na distribuição dos teores desses metais nos solos cultivados com cana-de-açúcar no Recôncavo da Bahia.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos solos cultivados com cana-de-açúcar no Recôncavo Baiano desde o período colonial, os teores de Cd e Co excederam os valores máximos permitidos para uso agrícola, estabelecidos pelo CONAMA, tendo os teores de Mn sido classificados como excessivos. Como resultado, os Vertissolos estão classificados na classe 4 de qualidade do solo. No Luvissole e Argissolo, as concentrações dos metais estão abaixo do valor máximo permitido para uso agrícola, não oferecendo riscos à saúde humana. Entretanto, no Luvissole, os teores Cd excedem os valores de prevenção, obtendo a classe 3 de qualidade do solo. No Argissolo, a concentração de todos os metais está abaixo do valor de referência de qualidade, enquadrado na classe 1 de qualidade do solo. Os metais apresentam correlações significativas com os teores de argila, confirmando a influência do material de origem na concentração desses metais no solo, exceto para Co, Mn e Ni. Para as áreas de Vertissolos e Luvissoles, é necessária a adoção de medidas preventivas de controle e monitoramento da qualidade do solo e da água subterrânea. As diferenças observadas entre os Valores de Referência de Qualidade do Estado de Pernambuco e de São Paulo evidenciam a importância de cada estado estabelecer seus valores orientadores, considerando a diversidade das condições edafoclimáticas de cada região.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. A. de; ABREU, M. F. de; ANDRADE, J. C. de. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos, usando a solução de DTPA em pH 7,3. *In*: RAIJ et al. (ed.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo,

2001. p. 240-250. ISBN 85-85564-05-9 Disponível em: http://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf. Acesso em: 10 maio 2021.

CPRH - Agência Estadual do Meio Ambiente. Instrução Normativa CPRH nº 7, de 07 de julho de 2014. Estabelece os valores de referência da qualidade do solo (VRQ) do Estado de Pernambuco quanto à presença de substâncias químicas para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias. **Diário Oficial do Estado de Pernambuco**, Recife, p. 13, 31 dez. 2014. Disponível em: <https://www2.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2022/09/Instrucao-Normativa-CPRH-No-7-2014.pdf>. Acesso em 01 fev. 2024.

ALMEIDA JÚNIOR, A. B. de; NASCIMENTO, C. W. A. do; SOBRAL, M. F.; SILVA, F. B. V. da; GOMES, W. A. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.10, p. 1004-1013, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011001000003>.

BENTO, C. B.; CARMO, J. B.; GABRIEL, G. V. M.; BOTERO, W. G.; FERNANDES, A. P.; MARTINELLI, L. A.; OLIVEIRA, L. C. Soil metal concentrations after five years of pasture-to-sugarcane conversion. **Bragantia**, 81, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210038>.

BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A do; FABRÍCIO NETA, A. de B.; RIBEIRO, M. R. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 35, p.1057-1066, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300039>.

BRIDHIKITTI, A. et al. Sources and Magnitude of Heavy Metals in Sugarcane Plantation Soils with Different Agricultural Practices and their Implications on Sustainable Waste-to-Foods Strategy in the Sugar–Ethanol Industry. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 20, p. 14816, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152014816>.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420/2009, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 30 de dezembro de 2009. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-420-2009_110436.html

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021. Dispõe sobre a Aprovação da Atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea no Estado de São Paulo – 2021. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, 17 de dezembro de 2021.

FADIGAS, F. de S.; AMARAL-SOBRINHO, N. M. B. do; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C. dos; FREIXO, A. A. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 2, p. 151-159, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052002000200008>.

FADIGAS, F. de S.; AMARAL-SOBRINHO, N. M. B. do; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C. dos; FREIXO, A. A. Proposição de valores de referência para concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 699-705, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000300024>.

GHARAIBEH, M. A.; MARSCHNER, B.; HEINZE, S.; MOOS, N. Spatial distribution of metals in soils under agriculture in the Jordan Valley, **Geoderma Regional**, v. 20, 2020, e00245, ISSN 2352-0094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00245>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil**. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em maio de 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal (2022)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?edicao=37886&t=resultados>. Acesso em fevereiro de 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas municipais- 2020**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias>. Acesso em agosto de 2021.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011, 413 p.

LEÃO, D. A.; BOLZANI, H. R.; OLIVEIRA, D. L. do A.; POMPEI, C. M. E. Lixiviação de nutrientes e alteração das propriedades químicas de solos submetidos à aplicação de vinhaça associada à torta de filtro. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v.6, n.2, p. 421-436, mar./abr. 2022. ISSN: 2595-3621. DOI: <https://doi.org/10.34115/basrv6n2-005>.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos**. São Paulo: Produquímica, 1994. 153p.

OLIVEIRA, R. V. Caracterização e classificação de solos em canaviais do Recôncavo Baiano. *In*: COELHO NETO, A. S.; FRANCO, G. B.; OLIVEIRA, R. V (org.). **Leituras territoriais: ambiente, planejamento e dinâmicas urbanas e rurais**. Curitiba: CRV, 2020. p. 61-82. ISBN digital 978-65-5868-653-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.24824/978655868654.5>.

RAMALHO, J. F. G. P.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. do. Metais pesados em solos cultivados com cana-de-açúcar pelo uso de resíduos agroindustriais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 8, n. 1, p. 120-129, jan./dez. 2001.

RAMOS, R. R.; ABREU, M. F. de; GUIZZO, J. V. de M.; CORDEIRO, D. G.; FERREIRA, P. F. Contaminação por metais pesados em áreas agrícolas no estado do Tocantins. **Tecno-lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 24, n. 2, p. 166-178, jul./dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v24i2.14845>.

ROSSETTO, R; SANTIAGO, A. D. **Cana**. Embrapa 50 anos. 2022. Disponível em <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao>. Acesso em mar. 2024.

SERAFIM, R. F. **Avaliação da fertilidade do solo de uma fazenda na região de Pirassununga SP sujeito à aplicação de vinhaça**. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2020.

SILVA, B. F. da. **Contaminação ambiental por metais em solo sob cultivo intenso de cana-de-açúcar**. 2019. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SOUZA, J. P. de. **Caracterização de solos de uma topossequência, em área contaminada por rejeitos de mineração de chumbo**. 2014. 50 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Qualidade de Ecossistemas) – Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2014.

SZMRECSÁNYI, T. **O planejamento da agroindústria canavieira no Brasil (1930-1975)**. São Paulo: Hucitec, 1979. 540p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. atual. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. 574p.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Ecological soil screening levels for zinc: Interim final** [OSWER Directive 9285.7-73]. Washington: USEPA, 2007 Acesso em Mar. 2024. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/eco-ssl_zinc.pdf nc/June 2007/Eco-SSL for Zinc (epa.gov)

YIN, J.; DENG, C-B.; WANG, X-F.; CHEN, G-I.; MIHUCZ, V. G.; XU, G-P.; DENG, Q-C. Effects of long-term application of vinasse on physicochemical properties, heavy metals content and microbial diversity in sugarcane field soil. **Sugar Technol.** v. 21, p. 62-70, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0630-2>.