

EFEITOS DA APLICAÇÃO DE VINHAÇA NA FERTILIDADE DO SOLO

**RUBENS FERNANDO SERAFIM¹; LAUREN NOZOMI MARQUES YABUKI¹;
JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ¹; LARISSA RUAS GALDEANO¹; MARCELO
LOUREIRO GARCIA¹**

*Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Avenida 24 A, 1515, Bela Vista,
CEP: 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil. E-mail: rubens.serafim@unesp.br; lauren.yabuki@unesp.br;
queluz@fca.unesp.br; larissa_ruas@hotmail.com marcelo.garcia@unesp.br*

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos da aplicação de vinhaça sobre as características de fertilidade do solo. Um estudo de monitoramento desses parâmetros foi realizado em uma fazenda localizada no interior do estado de São Paulo, no período de 2012 a 2017. Informações mineralógicas e sobre a concentração de metais no solo foram reportadas. Alterações significativas nas propriedades químicas do solo ao longo do tempo foram observadas, sendo a aplicação da vinhaça um dos fatores que exerceram influência na variação das características do solo, em combinação com fatores ambientais e o manejo agrícola. A saturação por bases decresceu em média de 64 para 40% entre 2012 e 2017, respectivamente, enquanto o volume médio anual de vinhaça foi $188 \pm 31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. A tendência de crescimento ao longo dos anos do parâmetro saturação por alumínio foi evidente e os valores de pH foram em torno de 5. Apesar da adoção de aplicação da vinhaça nos solos proporcionar a disponibilidade de nutrientes e água, é recomendado que o monitoramento e controle da qualidade do solo seja sempre realizado, mantendo-se consequentemente, a sua fertilidade e a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: fertirrigação, dosagens de efluente, características químicas do solo, impactos ambientais.

**SERAFIM, R. F.; YABUKI, L. N. M.; QUELUZ, J. G. T.; GALDEANO, L. R.;
GARCIA, M. L.**

EFFECTS OF VINASSE APPLICATION ON SOIL FERTILITY

2 ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effects of vinasse application on soil fertility characteristics. A monitoring study of soil fertility parameters was conducted in a farm fertirrigated with vinasse, located in the state of São Paulo, over the period from 2012 to 2017. Mineralogical and soil metal concentration information was reported. Significant alterations in the chemical properties of the soil over time were observed, being the vinasse application one of the factors that influenced the variation of the soil characteristics, combined with environmental factors and agricultural management. The base saturation decreased on average from 64 to 40% between 2012 and 2017, respectively, while the mean annual volume of vinasse was $188 \pm 31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. The increasing trend in the years for the parameter aluminum saturation was

remarkable and the pH values were around 5. Although the adoption of vinasse application in soils provides the availability of nutrients and water, it is recommended that the monitoring and control of soil quality be performed at all times maintaining, consequently, its fertility and the sustainability of sugarcane production.

Keywords: fertigation, effluent dosage, soil's chemical characteristics, environmental impacts.

3 INTRODUÇÃO

No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar tem um grande e expressivo destaque socioeconômico desde a época da colonização. Com a valorização do etanol como biocombustível renovável, a produção brasileira de cana-de-açúcar se destaca mundialmente e tem aumentado constantemente devido às melhorias nas variedades da planta, do manejo da cultura e do sistema de colheita (KOHLHEPP, 2010). O volume de produção de cana-de-açúcar na safra 2020/21 foi de 654,8 milhões de toneladas, com uma produção de 41,25 milhões de toneladas de açúcar e de 32,8 bilhões de litros de etanol. Desta forma, foram gerados bagaços da ordem de 143 milhões de toneladas, 23 milhões de toneladas de torta de filtro, 110 milhões de toneladas de palha, 6,3 milhões de toneladas de cinzas e 426 bilhões de litros de vinhaça. Para a safra de 2021/22 há uma previsão de decréscimo de 9,14% na produção de etanol e 5,71% na produção de açúcar em comparação à safra anterior (CANA-DE-AÇÚCAR, 2021).

A vinhaça é considerada como a principal água residuária do processo produtivo de etanol em usinas sucroalcooleiras; é gerada em grandes quantidades e apresenta certas características peculiares como: alta temperatura, pH ácido, altas concentrações de matéria orgânica, sólidos suspensos (partículas > 1,2 µm), cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo, entre outros nutrientes (FUESS; GARCIA, 2014). Devido aos grandes impactos negativos do lançamento

direto da vinhaça em corpos d'água, a Portaria n° 323 de 1978 proibiu seu despejo em cursos hídricos (BRASIL, 1978). Assim, o principal, mais viável e econômico destino dado à vinhaça é a sua aplicação na própria cultura de cana-de-açúcar através da técnica denominada fertirrigação (PRADO; CAIONE; CAMPOS, 2013). Ao longo do tempo, a normatização da destinação da vinhaça envolvendo órgãos ambientais foi realizada mediante diversas portarias e/ou resoluções regulamentando os critérios e procedimentos para sua aplicação no solo. Atualmente vigente no estado de São Paulo há a Portaria P4.231 da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) denominada "Vinhaça – Critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça no solo agrícola" que está na 3ª. edição e 2ª. versão (CETESB, 2015).

Dentre as inúmeras vantagens da aplicação da vinhaça, sob critérios técnicos, no solo pode-se citar o aumento da fertilidade natural do solo e consequente incremento na produtividade agrícola, elevação do pH, acréscimo na disponibilidade de nutrientes, elevação da atividade microbiana que contribui para o aumento do estado de agregação do solo e capacidade de retenção da água (FUESS, 2013). No estudo de Sivaloganathan et al. (2013), o tratamento controle apresentou valores de produtividade agrícola da cana e açúcar de 78 t ha⁻¹ e 9,02 t ha⁻¹, enquanto os melhores resultados da fertirrigação com vinhaça foram alcançados com a diluição 1:10, com valores de produtividade agrícola

da cana e açúcar de 115,0 t ha⁻¹ e 13,5 t ha⁻¹.

O uso controlado da técnica da fertirrigação por meio da vinhaça também é essencial do ponto de vista econômico e ambiental devido à redução da captação de água para irrigação e redução do uso de fertilizantes químicos sintéticos. Oliveira *et al.* (2014) avaliaram os efeitos da aplicação da vinhaça (conjuntamente ou não com adubação mineral) no cultivo da cana-de-açúcar, indicando melhor produção agrícola ao utilizar apenas a fertirrigação com vinhaça, tanto na produtividade da cana (49,98 t ha⁻¹) quanto na produtividade de açúcar (7,01 t ha⁻¹) e assim reduzindo o uso da adubação mineral.

No entanto, a aplicação inadequada de vinhaça no solo pode levar ao risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais pela presença da amônia e de metais potencialmente tóxicos (principalmente Al, Fe, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn) além de causar alterações no oxigênio dissolvido em corpos hídricos (SOTO; BASSO; KIANG, 2017).

Segundo Fuess, Rodrigues e Garcia (2017) os elevados níveis de sólidos totais dissolvidos (TDS > 4000 mg L⁻¹) e matéria orgânica biodegradável da vinhaça (>14 g L⁻¹) podem favorecer a salinização e aumento da acidez do solo. Estas alterações químicas consequentemente podem acarretar também em alterações físicas como densidade do solo, porosidade total e armazenamento e disponibilidade de água implicando em variações decrescentes ou crescentes no comportamento da condutividade hidráulica do solo (SOTO; BASSO; KIANG, 2017; UYEDA *et al.*, 2013).

Assim, diante de cenários que podem ser benéficos ou prejudiciais, as características físico-químicas da vinhaça e o manejo do solo com a aplicação adequada

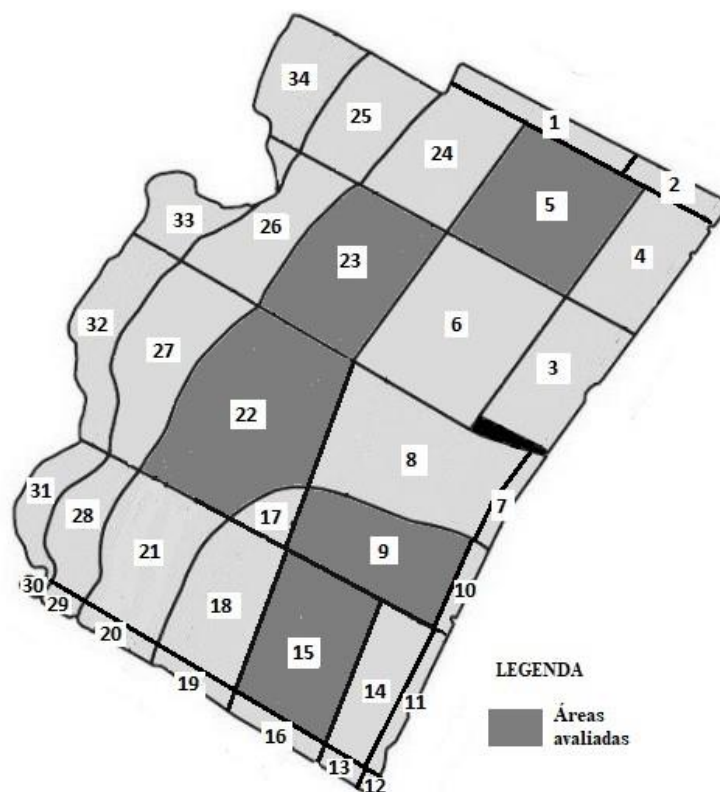
e direcionada de fertilizantes e/ou corretivos, de acordo com normas e legislações nacionais e estaduais vigentes, tornam-se fatores importantes no manejo sustentável do efluente (CAVALETT *et al.*, 2012). Cabe destacar também, a importância do conhecimento prévio sobre as propriedades químicas e mineralógicas do solo estudado, uma vez que, os tipos de argilominerais presentes no solo também são fatores que podem influenciar mudanças físico-químicas, promover alterações no processo de lixiviação de macro e micronutrientes e facilitar a percolação da vinhaça nos perfis de profundidade do solo (BUENO *et al.*, 2009).

Neste trabalho, as propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo sob aplicação da vinhaça para a produção de cana-de-açúcar foram avaliadas, a fim de identificar possíveis influências da dosagem da vinhaça na fertilidade do solo, buscando a integração sustentável entre o manejo do efluente e o agrícola.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Pirassununga-SP, apresenta 726,9 km² de extensão e elevação de 627m ao nível do mar, estando situada na latitude 21°59'46" Sul e longitude 47°25'33" Oeste. A área de cultivo da cana-de-açúcar com aproximadamente 553 ha é subdividida em glebas, apresentadas na Figura 1 como numerações de 1 a 34. As avaliações dos dados para o presente estudo foram efetuadas nas glebas 5, 9, 15, 22 e 23 e o período de aplicação das vinhaças nessas glebas abrangeu os anos de 2012 a 2017.

Figura 1. Área de estudo e suas subdivisões em glebas

Na área de estudo, ocorre a presença de três unidades de relevo: o Planalto Central da Bacia do Paraná, o Patamar Oriental da Bacia do Paraná e a Depressão Periférica Paulista (IBGE, 2013), caracterizando-a com declives que variam de suaves a colinosos (FERREIRA; CAETANO-CHANG, 2008). O tipo de solo mais predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), com textura média/argilosa (relevo suave ondulado), presença de indicativos de intensa intemperização de minerais primários, baixa capacidade de troca catiônica e relativa concentração de argilominerais resistentes e/ou óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Geralmente, LVAd são solos com boas propriedades físicas (elevada permeabilidade interna, profundidade e porosidade relativas) situados em sua maioria, em relevo favorável ao manejo agrícola. Sua principal limitação corresponde à baixa disponibilidade de nutrientes e à toxicidade

por alumínio trocável, exigindo o manejo adequado com corretivos e fertilizantes (SANTOS et al., 2018).

O clima da área de estudo, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, tropical de altitude com verão chuvoso e inverno seco (RORIZ, 2014). Dados de Lima (2016) indicam que o período de déficit hídrico ocorre durante a estação seca, nos meses de abril a setembro e os meses com maiores índices de precipitação ocorrem de dezembro a fevereiro. A distribuição irregular das chuvas salienta a necessidade do uso de algum tipo de sistema de irrigação após o plantio ou colheita, pois tais etapas de desenvolvimento são fortemente dependentes da água existente no solo. No presente estudo esta variável não será explorada, em vista do denso pacote de dados já apresentados nos Planos de Aplicação da Vinhaça (PAV's), entretanto, cabe reforçar a necessidade do

monitoramento do índice pluviométrico em trabalhos futuros.

4.2 Análise dos Planos de Aplicação de Vinhaça

Neste estudo, os parâmetros analisados para a caracterização físico-química do solo e sua fertilidade levaram em conta os parâmetros preconizados na Portaria P4.231 da CETESB (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros químicos conforme portaria P4.231 (Companhia Ambiental do estado de São Paulo, 2015)

Caracterização da fertilidade do solo	Caracterização ambiental do solo	
Alumínio trocável (Al)	Antimônio (Sb)	Selênio (Se)
Cálcio (Ca)	Arsênio (As)	Zinco (Zn)
Magnésio (Mg)	Bário (Ba)	Varredura de VOC
Sódio (Na)	Cádmio (Cd)	Varredura de SVOC
Sulfato (SO ₂)	Chumbo (Pb)	
Acidez potencial	Cobalto (Co)	
Potássio (K)	Cobre (Cu)	
Matéria orgânica (MO)	Cromo (Cr)	
CTC	Mercúrio (Hg)	
pH	Molibdênio (Mo)	

CTC capacidade de troca catiônica; V% percentagem de saturação de bases; VOC Compostos Orgânicos Voláteis; SVOC Compostos Orgânicos Semi-Voláteis.

A Portaria P4.231 estabelece normas e procedimentos para a disposição da vinhaça no solo e exige que as usinas sucroalcooleiras realizem e entreguem anualmente o Plano de Aplicação da

Vinhaça (PAV) que deve conter as áreas e as taxas de dosagem a serem aplicadas. A dosagem máxima de vinhaça definida pela referida portaria é representada abaixo (Equação 1) (CETESB, 2015):

$$m^3 \text{ de vinhaça. ha}^{-1} = [(0,05 \cdot CTC_{efetiva} - ks) \cdot 3744 + 185] / kvi \quad (1)$$

Em que 0,05 corresponde a 5% da CTC (capacidade de troca catiônica, $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); ks é a concentração de potássio no solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); 3744 é a constante para transformação dos resultados expressos em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, para kg de potássio em um volume de 1 ha por 0,8 metros de profundidade; 185 é a massa, em kg, de K₂O extraído pela cultura por ha, por corte; e kvi é a concentração de potássio na vinhaça em kg de K₂O m^{-3} .

Os dados constantes nos PAV's da área de estudo, decorrentes das análises de solo das glebas visando ao atendimento da portaria, foram compilados em planilhas que permitiram as análises da evolução

temporal das alterações químicas do solo através de gráficos, possibilitando a avaliação de uma possível correlação entre a utilização da vinhaça na fertirrigação e a fertilidade do solo. O levantamento de dados deste trabalho de pesquisa se referiu, portanto, aos resultados das análises laboratoriais constantes nos PAV's durante o período de 2012 a 2017 disponibilizados pela CETESB de Mogi-Guaçu SP.

4.3 Amostragem de solo e análises químicas

Foram realizadas amostragens em campo em 2018 em três locais da área de

estudo. As áreas selecionadas e suas coordenadas são apresentadas a seguir: gleba 3, longitude -47,493684 e latitude -21,944610; gleba 23, longitude -47,498589 e latitude -21,937313 e gleba 26, longitude -47,503523 e latitude -21,937238. Cabe salientar que as amostras da gleba 3 (controle) foram coletadas em um limite da fazenda onde não houve aplicação de vinhaça, permitindo avaliações comparativas dos resultados analíticos relativos à mineralogia e à concentração de metais. Contudo, os resultados referentes aos parâmetros de fertilidade da gleba 3 não foram reportados nos PAV's.

Em cada ponto foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 30 e 100 cm para verificar a distribuição dos minerais e metais pesados ao longo do perfil do solo. A profundidade do solo de 30 cm foi escolhida devido à tendência de concentração de nutrientes e matéria orgânica nas camadas mais rasas do solo, nas quais há uma maior mobilidade dos íons e revolvimento do solo (VIEIRA, 1996). De acordo com Oliveira e Prado (1987), em solos tipo latossolos, como os solos do presente estudo, a profundidade de 80 a 100 cm é ideal para a avaliação da lixiviação de metais presentes no solo.

As amostragens de solo foram caracterizadas em relação à mineralogia e à concentração de metais com o intuito de avaliar se os possíveis argilominerais presentes nos solos amostrados também apresentariam eventuais efeitos com a aplicação de vinhaça. As análises foram realizadas após pesagem e peneiramento das amostras através da técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), realizadas no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) da Universidade Estadual Paulista "Júlio de

Mesquita Filho" (Unesp), campus de Rio Claro. O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X da Philips modelo PW-2400 e os procedimentos analíticos foram utilizados conforme a metodologia proposta por Nardy et al. (1997).

A partir das análises mineralógicas da área de estudo foram obtidas a relação Sílica-Alumina ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), representada pela expressão a seguir (Equação 2), considerada como um índice de intemperismo do solo:

$$K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,7 \quad (2)$$

Onde, K_i é uma medida das proporções da caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ e da gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$ (BAPTISTA; MADEIRA NETO; MENESES, 1998).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos e discutidos de acordo com a caracterização do solo em termos de sua fertilidade química (a partir dos dados contidos nos PAV's) e em termos da qualidade ambiental do solo, levando em conta suas propriedades mineralógicas e concentrações de metais.

5.1 Avaliações dos parâmetros químicos para a caracterização da fertilidade dos solos

Os dados compilados dos PAV's entre os anos de 2012 a 2017 referentes aos parâmetros químicos para caracterização da fertilidade dos solos das glebas 5, 9, 15, 22 e 23 são apresentados nas Tabela 2 e 3.

Tabela 2. Análises químicas das amostras de solo das glebas estudadas

Ano	Gleba	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H+ Al	SB	CTC
(mmolc dm ⁻³)								
2017	15	21,31	9,86	1,12	0,14	26	32,38	58,38
2017	22	12,51	5,54	1,58	0,84	36	19,69	55,69
2017	5	10,89	4,97	0,98	0,5	32	16,9	48,9
2016	5	5,82	2,09	0,72	0,59	17	8,64	25,64
2016	9	12,65	2,68	0,66	0,58	22	16,07	38,07
2015	9	14,3	6,21	2,39	0,16	17	22,92	39,92
2015	23	6,34	2,89	0,57	1,13	20	9,82	29,82
2015	5	8,76	4,56	0,35	0,5	18	13,68	31,68
2014	23	18,42	9,71	1,28	0,28	16	29,45	45,45
2014	5	12,26	7,39	1,26	0,59	16	20,92	36,92
2014	15	10,79	4,72	1,97	0,27	22	17,51	39,51
2013	22	14,36	5,8	0,52	0,04	17	20,71	37,7
2013	23	15,83	6,78	1,18	0,17	13	23,8	36,8
2013	5	17,21	6,76	0,95	0,21	10	24,94	34,94
2012	23	12,56	6	1,4	<0,02	13	19,97	32,97
2012	22	59,07	17,94	2,32	0,04	18	79,34	97,34
2012	15	12,54	4,9	1,9	0,12	17	19,36	36,36

Tabela 3. Análises químicas das amostras de solo das glebas estudadas

Ano	Gleba	pH	K:Mg:Ca	V (%)	m (%)	MO (%)
2017	15	5,5	1:9:19	55,5	0,43	17
2017	22	4,9	1:3:8	35,4	4,09	18
2017	5	5,0	1:5:11	34,6	2,87	13
2016	5	4,8	1:3:8	33,7	6,39	8
2016	9	4,7	1:4:19	42,2	3,48	13
2015	9	5,3	1:3:6	57,4	0,69	13
2015	23	4,6	1:5:11	32,9	10,3	14
2015	5	5,0	1:13:26	43,2	3,53	12
2014	23	5,6	1:8:14	64,8	0,94	12
2014	5	5,4	1:6:10	56,7	2,74	10
2014	15	5,0	1:2:5	44,3	1,52	10
2013	22	5,2	1:11:28	54,9	0,2	11
2013	23	5,8	1:6:13	64,7	0,69	12
2013	5	5,5	1:7:18	71,4	0,82	12
2012	23	5,3	1:4:9	60,6	0	12
2012	22	5,7	1:8:25	81,5	0,05	33
2012	15	5,1	1:3:7	53,3	0,6	12

V% percentagem de saturação de bases; m% percentagem de saturação por alumínio.

Tabela 4. Dosagem de vinhaça aplicada nos solos estudados

Ano	Gleba	Ks (cmol dm^{-3})	CTC (cmol dm^{-3})	Dosagem ⁽¹⁾ ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	%ks/CTC	K ⁺ (kg ha^{-1})
2017	5	0,10	4,89	242,00	2,04	76,62
2017	15	0,11	5,84	288,80	1,88	87,56
2017	22	0,16	5,57	209,55	2,87	123,52
2016	5	0,07	2,56	131,80	2,81	56,29
2016	9	0,07	3,81	216,86	1,73	51,60
2015	5	0,04	3,17	215,67	1,10	27,36
2015	9	0,24	3,99	12,50	5,99 ⁽²⁾	186,85
2015	23	0,06	2,98	176,61	1,91	44,56
2014	5	0,13	3,69	131,06	3,49	98,51
2014	15	0,20	3,95	62,35	4,99	154,02
2014	23	0,13	4,55	185,53	2,82	100,07
2013	5	0,10	3,49	161,13	2,72	74,27
2013	22	0,05	3,77	232,02	1,38	40,65
2013	23	0,12	3,68	144,03	3,21	92,25
2012	15	0,19	3,64	51,43	5,23 ⁽²⁾	148,54
2012	22	0,23	9,73	379,53	2,38	181,38
2012	23	0,14	3,30	92,68	4,25	109,45

Ks: concentração de potássio no solo; CTC capacidade de troca catiônica; K⁺ concentração de potássio na vinhaça;

(1) Cálculo utilizando o valor de $k_{vi} = 3,00$ ($\text{kg K}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-3}$);

(2) Valor da concentração de potássio no solo > 5% da CTC.

A respeito dos macronutrientes no solo, Vitti e Mazza (1998) informam que a relação K:Mg:Ca ideal para a melhoria na produtividade da cana-de-açúcar, é de aproximadamente 1:3:9 a 1:5:25. Esta relação otimizada apresentada na Tabela 3 é satisfeita para todas as áreas analisadas, exceto para a glebas 22 e 5 nos anos de 2013 e 2015, onde as concentrações de magnésio apresentaram valores bem acima do recomendado pelos autores. Uma vez que o potássio apresenta alto potencial de lixiviação, é importante considerar a capacidade de retenção dos demais cátions (Mg e Ca) no solo, ao planejar as dosagens de vinhaça a serem aplicadas a fim de minimizar os prováveis impactos ambientais resultantes desta técnica de manejo agrícola (SILVA; GRIEBELER; BORGES, 2006).

Na Tabela 4 são apresentados os valores das concentrações de potássio e da capacidade de troca catiônica (CTC) e a relação entre estas duas variáveis,

computando-se as dosagens previstas de vinhaça de acordo com a Equação 1. Dois resultados excedentes àqueles regulamentados pela Portaria P4.231 foram obtidos para a relação %ks/CTC, indicando uma concentração de potássio no solo (ks) maior que 5% da CTC. A norma estabelece que ao atingir esse limite, a aplicação de vinhaça deve ficar restrita à reposição desse nutriente em função da extração média pela cultura (185 kg de K₂O por hectare por corte).

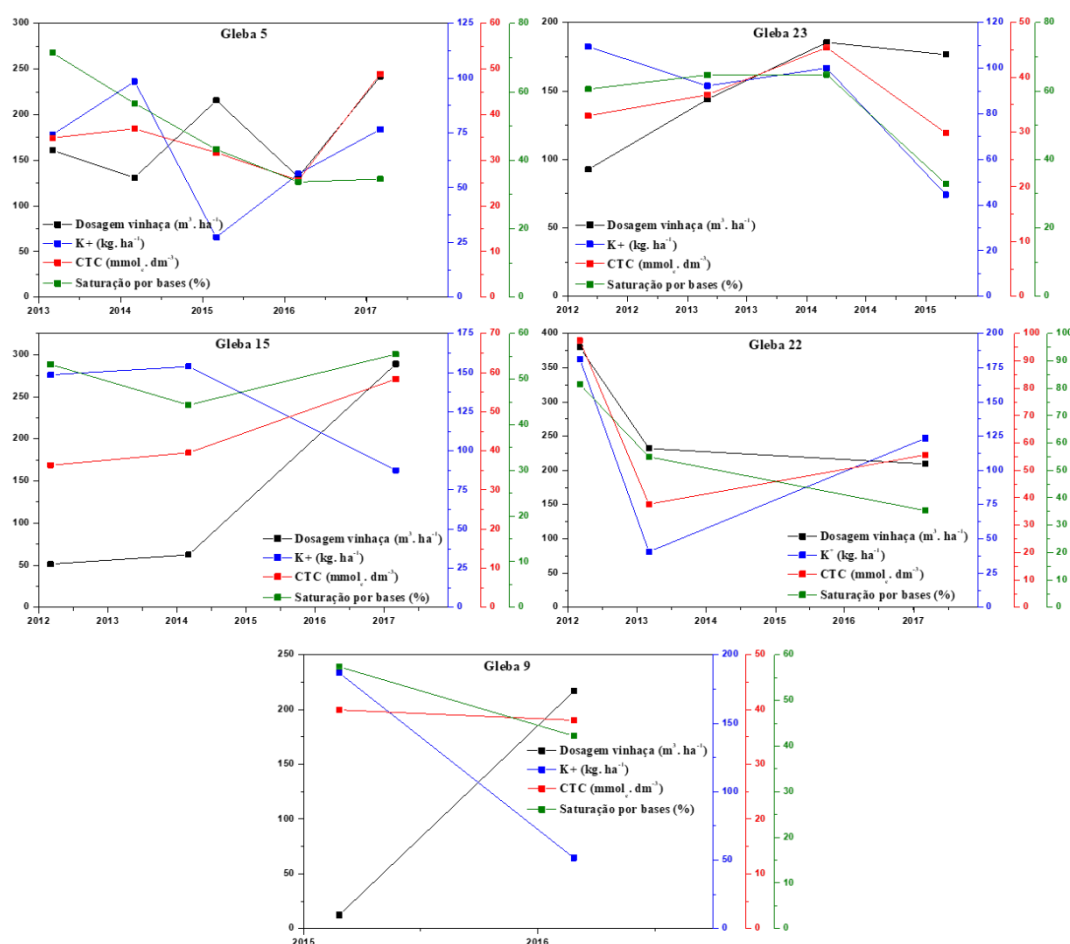
A partir dos volumes de vinhaça aplicados nas glebas da fazenda (Tabela 4), a gleba 5 apresentou dosagens em cinco anos seguidos (2013 a 2017), a gleba 23 exibiu resultados das dosagens em quatro anos seguidos (2012 a 2015), a gleba 15 e 22 apresentou valores para as dosagens em três anos (2012, 2014 e 2017; 2012, 2013 e 2017, respectivamente) e a gleba 9 apresentou resultados das dosagens em dois anos (2015 e 2016) permitindo a análise temporal nessas glebas dos seguintes

parâmetros químicos: dosagem de vinhaça, concentração de potássio (K^+), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), acidez potencial (H+Al) e pH. É importante destacar que a caracterização do solo obtida em um ano é resultado do manejo realizado no ano anterior.

A Figura 2 ilustra as variações das dosagens de vinhaça aplicadas aos solos das cinco áreas analisadas ao longo do tempo, das correspondentes concentrações de potássio na vinhaça, da capacidade de troca

catiônica no solo e da saturação por bases no solo. Verificou-se que a adição de vinhaça promoveu alterações em todas os parâmetros analisados. As maiores oscilações de volumes de vinhaça aplicados ao solo ocorreram na gleba 5 para os anos de 2013 a 2017. Por exemplo, as dosagens entre os anos de 2014 e 2015 variaram de 125 a 225 $m^3 ha^{-1}$, respectivamente. As menores dosagens de vinhaça ocorreram na gleba 15 entre os anos de 2012 a 2014 com valores acima de 50 $m^3 ha^{-1}$ e na gleba 9 no ano de 2015 (12,5 $m^3 ha^{-1}$).

Figura 2. Efeito da dosagem de vinhaça ($m^3 ha^{-1}$) na capacidade de troca catiônica (CTC, $mmol_c dm^{-3}$) e saturação por bases (%) ao longo dos anos nas áreas estudadas.



É antecipado que a aplicação de vinhaça promova o aumento das concentrações de potássio no solo, mas outros fatores como lixiviação e absorção

de nutrientes pela cultura podem alterar o seu balanço final. As quantidades de potássio na vinhaça foram 27,4 $kg ha^{-1}$ na gleba 5 e 186,9 $kg ha^{-1}$ na gleba 9 em 2015.

As concentrações de potássio no solo da gleba 5 variaram de 0,35 a 0,72 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ entre 2015 e 2016, respectivamente, e de 2,39 a 0,66 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ na gleba 9 no mesmo período. Os valores encontrados para as concentrações de K^+ no solo são similares aos resultados de Rossetto *et al.* (2004) ao avaliar solos coletados na usina São José (estado de São Paulo) na profundidade 0 - 25 cm. As concentrações de K^+ encontradas pelos autores nos solos coletados variaram de 1,0 a 2,20 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de acordo com o tratamento realizado (adição de 50 a 200 $\text{kgK}_2\text{O ha}^{-1}$, ou de 42 a 167 $\text{kg K}^+ \text{ha}^{-1}$). Dados desse trabalho indicam que houve resposta significativa da produtividade da cana-de-açúcar em função da aplicação de potássio para a maioria das áreas estudadas com respostas lineares para relação citada. Por outro lado, o potássio tem potencial alto de lixiviação, dependendo da sua presença em concentrações elevadas, sua biodisponibilidade no solo, da quantidade de chuva, da textura do solo, dentre outros fatores (OTTO; VITTI; LUZ, 2010; ROSOLEM *et al.*, 2006; TEJADA; GONZALEZ, 2006).

A CTC tem sido apontada como um bom parâmetro para a avaliação da disponibilidade de K^+ em solos muito intemperizados (VAN RAIJ, 2011). É observada uma variação nos valores de CTC das áreas (Figura 2). Entre os anos 2012 a 2014, a gleba 23 teve um aumento nas aplicações de vinhaça de 90 a 175 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ e a CTC aumentou de 30 a 50 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. O mesmo efeito do aumento da CTC em decorrência das aplicações de vinhaça em um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico foi relatado por Barros *et al.* (2010). A relação dosagem de vinhaça e CTC pode estar relacionada à forma coloidal da matéria orgânica presente na vinhaça que disponibiliza ao solo uma quantidade maior de cargas negativas, atenuando o potencial de lixiviação de cátions e regulando a disponibilidade dos

nutrientes no solo (GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983). É importante destacar também que nada pode ser afirmado sobre a melhora na fertilidade do solo devido ao aumento da CTC. Este parâmetro é dependente dos efeitos do pH no solo pois leva em conta os íons H^+ e Al^{+3} (RONQUIM, 2010), indicando que alumínio em nível tóxico às plantas e íons hidrogênio adsorvidos que tornam um solo ácido podem compor a fração predominante da CTC.

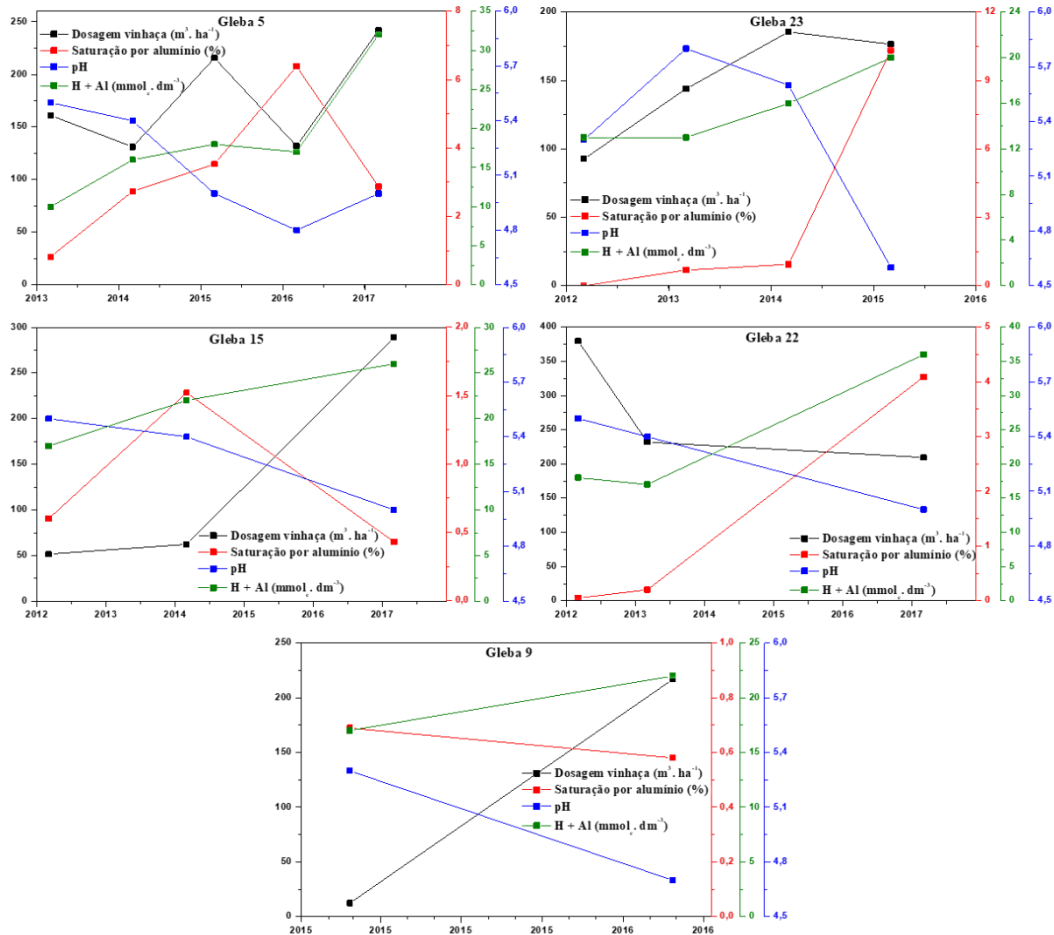
Segundo Van Raij e Cantarella (1996), um percentual ideal para a saturação por bases (V%), parâmetro indicativo da fertilidade do solo, é de 60%, a fim de promover um equilíbrio ótimo para a cultura da cana-de-açúcar. Em termos médios anuais, a saturação por bases (V%) decresceu de 64 para 40% entre os anos 2012 e 2017 e as dosagens de vinhaça mantiveram-se em um patamar relativamente constante entre 2012 e 2016 (Tabela 3), resultando em uma média geral de $176 \pm 13 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ (ou $188 \pm 31 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, incluindo o ano de 2017). Alguns autores também relataram o decréscimo da saturação por bases na camada superficial de solos cultivados com cana-de-açúcar posterior à aplicação de vinhaça e calcário (WATANABE; FIORETTO; HERMANN, 2004; VAN RAIJ *et al.*, 1982)

O efeito das dosagens de vinhaça sobre as variações de pH, acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio nos solos das cinco áreas avaliadas no período de 2012 a 2017 é representado na Figura 3. As dosagens de vinhaça podem ter promovido alterações significantes na acidez potencial, saturação por alumínio e no pH. Entre os anos de 2012 a 2017, houve uma variação nos valores de pH entre 4,6 a 5,8 (Tabela 3). Segundo a classificação de Tomé Júnior (1997) quanto à acidez do solo, os solos das áreas analisadas apresentam acidez alta (pH 4,4 a 5) a baixa (pH 5,6 a 6). A redução nos valores de pH ocorreu de forma mais acentuada nas glebas 5 e 23, atingindo

valores de 4,6 (gleba 23 em 2016) e 4,8 (para gleba 5 em 2015). Alguns trabalhos relataram a não observância de alterações significativas do pH em áreas fertirrigadas com vinhaça ao longo dos anos e que a elevação do pH devido às dosagens de

vinhaça nos solos dessas áreas ocorreu principalmente nas áreas em que o cultivo da cana-de-açúcar é realizado há pelo menos 30 anos (BEBÉ et al., 2009; SILVA; RIBEIRO, 1998).

Figura 3. Efeito da dosagem de vinhaça ($m^3 ha^{-1}$) na variação da saturação por alumínio (m%), pH e acidez potencial (H+Al, $mmol_c dm^{-3}$) ao longo dos anos nas áreas estudadas.



É possível observar o decréscimo do pH e o aumento da saturação por alumínio (Figura 3). Na gleba 23, houve o aumento evidente da saturação por alumínio entre os anos 2014 e 2015 (de 0,94 para 10,32) e a redução de pH de 5,6 para 4,6. Esse cenário pode estar relacionado ao aumento sucessivo das dosagens de vinhaça aplicadas nesta área desde 2012, onde a vinhaça ácida contribuiu para a liberação

acelerada de Al no solo, visto que a solubilidade dos nutrientes é dependente do pH do solo e as concentrações de metais como Al^{3+} e Fe^{3+} podem aumentar 1000 vezes de acordo com a redução de 1 unidade do pH (LINDSAY, 1979). Ademais, o processo de intemperismo no solo e a liberação de teores tóxicos de Al pode ocorrer de forma mais acentuada se houver condições anaeróbicas devido ao

processo de compactação dos solos que contribui para a alta elevação ou decréscimo dos valores de pH (PRIMAVESI, 2006). Por isso, além do controle das dosagens de vinhaça aplicadas no solo, é essencial o manejo do solo para evitar a sua compactação no decorrer dos cultivos contínuos.

Orientações de Osaki (1991) indicam que valores de saturação por alumínio acima de 20% começam a afetar a qualidade do solo e ser prejudiciais às culturas agrícolas. De acordo com dados da literatura, a alta concentração de matéria orgânica presente na vinhaça tem a capacidade de elevar o pH do solo, caso haja a sua estabilização biológica equilibrada, porém em um solo saturado por alumínio, há uma perturbação na degradação e uma redução na complexação de Al^{3+} ao carbono orgânico dissolvido, resultando em uma maior disponibilidade desse íon que reage com água, liberando íons H^+ e acidificando o solo (CHRISTOFOLETTI et al., 2013).

Os dados resultantes da relação dosagem de vinhaça e matéria orgânica não foram plotados em forma de gráfico, pois é evidente a alta concentração de matéria orgânica presente na vinhaça e, portanto, ambas as variáveis se correlacionam de forma positiva. A elevação da matéria orgânica no solo pela dosagem de vinhaça aumenta a capacidade de retenção de cátions e consecutivamente as perdas por

lixiviação. Outro grande atrativo da fertirrigação com vinhaça advém das alterações nas condições físicas do solo, aumentando a taxa de infiltração e retenção de água de forma a contribuir com a formação de agregados e com a redução da suscetibilidade do solo à erosão, uma vez que aplicações de altas taxas de matéria orgânica aumentam a CTC do solo e favorecem a sobrevivência de bactérias e fungos, formadores de ácidos húmicos responsáveis pela formação de macroporos facilitadores da entrada de ar e água no solo (SOUZA et al., 2015; RONQUIM, 2010).

5.2 Avaliações dos parâmetros químicos para a caracterização ambiental dos solos

Os resultados em termos da qualidade ambiental do solo referentes às suas propriedades mineralógicas e teor de metais foram produzidos a partir das amostragens de solo realizadas nas glebas 3, 23 e 26, feitas através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) (Tabelas 5 e 6).

A concentração total de metais, elementos-traço e elementos terras-raras foi analisada em duas profundidades (30 e 100 cm) de solos em áreas sob tratamento de fertirrigação com vinhaça (glebas 23 e 26) e área sem aplicação de vinhaça (gleba 3) (Tabela 5).

Tabela 5. Concentração total de metais (mg kg^{-1}) e valores orientadores em solo cultivado com cana-de-açúcar, fertirrigado com vinhaça (glebas 23 e 26) e sem fertirrigação (gleba 3), em duas profundidades (30 e 100 cm).

	P1	P1	P2	P2	P3	P3	Valores orientadores		
	30cm	100cm	30cm	100cm	30cm	100cm	VP ⁽²⁾	VRQ ⁽²⁾	VI ⁽²⁾
	Gleba 3		Gleba 23		Gleba 26				
Bário ⁽¹⁾	28,0	44,5	53,9	38,0	305	65,8	120	75	500
Cobalto ⁽¹⁾	1,0	1,0	2,0	0,5	53,7	3,2	25	13	35
Cobre ⁽¹⁾	7,1	6,8	8,9	8,3	123	28,5	60	35	760
Cromo ⁽¹⁾	80,7	92,0	83,9	172,3	176	91,1	75	40	150
Níquel ⁽¹⁾	3,5	5,4	1,2	7,0	69,6	23,2	30	13	190
Zinco ⁽¹⁾	14,7	15,1	9,0	3,8	106	36,8	86	60	1900
Cério	0,7	1,0	1,0	1,2	28,9	66,6			
Estrôncio	3,4	1,0	2,0	6,9	43,7	2,0			
Gálio	16,5	18,9	17,7	15,8	17,7	19,4			
Ítrio	6,4	8,3	6,7	7,7	59,3	14,7			
Lantânio	5,3	6,5	1,0	10,5	53,9	26,5			
Nióbio	2,1	2,4	1,0	5,2	44,6	5,4			
Rubídio	7,0	6,0	5,6	6,1	15,6	10,9			
Vanádio	164	169	138	148	913	179			
Zircônio	201	189	186	198	306	213			

(1) Elementos que constam na relação da portaria P4.231 CETESB;

(2) Valores Orientadores para solo no estado de São Paulo de 22/11/2016 - CETESB: VP, valor de prevenção; VRQ, valor de referência de qualidade; VI, valor de intervenção para solo agrícola.

Tabela 6. Análise mineralógica em solo cultivado com cana-de-açúcar, fertirrigado com vinhaça (glebas 23 e 26) e sem fertirrigação (gleba 3), em duas profundidades (30 e 100 cm).

Composição química	Fórmula química	Gleba 3		Gleba 23		Gleba 26	
		P1	P1	P2	P2	P3	P3
		30cm	100cm	30cm	100cm	30cm	100cm
Alumina	Al_2O_3	7,41	7,00	5,51	5,79	19,64	10,12
Cal	CaO	0,03	0,05	0,04	0,04	0,34	0,09
Hematita	Fe_2O_3	3,64	3,39	3,27	3,32	22,54	4,04
Pentóxido de fósforo	P_2O_5	0,06	0,05	0,05	0,05	0,26	0,06
Pirolusita	MnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,12	0,04
Óxido de magnésio	MgO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,22	0,05
Óxido de sódio	Na_2O	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Óxido de potássio	K_2O	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,07
Rutilo	TiO_2	0,99	0,95	0,82	0,85	6,00	1,02
Sílica	SiO_2	83,44	84,60	87,00	86,68	31,12	79,33
Alumina	Al_2O_3	7,41	7,00	5,51	5,79	19,64	10,12
Cal	CaO	0,03	0,05	0,04	0,04	0,34	0,09

Os metais bário (Ba), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) e zinco (Zn) apresentam valores orientadores conforme a Portaria P4.231 definidos como: valor de referência de qualidade

(VRQ), que por sua vez é definido como a concentração de determinada substância no solo que o define como limpo; valor de prevenção (VP) é a concentração de determinada substância, acima da qual

podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo e o valor de intervenção (VI) é a concentração de determinada substância no solo acima da qual existem riscos potenciais à saúde humana (CETESB, 2020).

A área controle (gleba 3) apresenta concentrações elevadas de cromo (acima dos valores de prevenção) que devem ser consideradas no estudo das áreas do entorno (como das glebas 23 e 26 analisadas que também apresentaram concentrações acima do VP) pois podem ser características do solo em questão ou indícios de contaminação anterior ao estudo. A vinhaça comumente gerada em altas temperaturas e pH baixo pode contribuir com a corrosão dos tanques de armazenamento e tubulações e ocasionar o vazamento do efluente, resultando em contaminações no solo (WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2000).

Metais como Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn em concentrações 2,4; 3,0; 15,7; 2,2; 8,8 e 14,1 mg L⁻¹ (Tabela 5), foram reportados em amostras de vinhaça providas do processamento de melaço de cana-de-açúcar (CHANDRA *et al.*, 2008). Cabe ressaltar também a escassez de estudos que avaliem a ocorrência e destino dos metais em áreas fertirrigadas com vinhaça (FUESS; RODRIGUES; GARCIA, 2017).

Os valores das concentrações de Ba, Cu, Cr, Ni e Zn encontram-se acima dos valores de prevenção para a gleba 26. A concentração de cobalto estaria acima do valor de intervenção, porém deve-se tomar cuidado ao enfatizar tal afirmação pois o mesmo pode ter advindo de contaminações na coleta, preparo ou análise das amostras. As concentrações de Cu analisadas no presente estudo foram similares às concentrações encontradas por Canellas *et al.* (2003), em que os autores reportaram aumento significativo nos teores de Cu, Mn e Zn no perfil de um cambissolo osílico-argiloso entre as profundidades de 20 e 40 cm. Já Ramalho e Amaral Sobrinho (2001)

reportaram significativo acréscimo nas concentrações de P, Mn e Co na profundidade de 0 a 10 cm de dois tipos de solos estudados cambissolo e Gley pouco húmico.

A gleba 26 também apresentou concentrações elevadas para os demais elementos. Vanádio e zircônio apresentam as maiores concentrações e podem ter ocorrência natural, visto que no estudo de Neves, Horn e Fraga (2008) os autores reportaram teores de Ba, Cr, Cu, Pb, V e Zn (226, 147, 175, 57, 403, 140 mg Kg⁻¹, respectivamente) e presença de lantânio, cobalto e berílio em um Latossolo Amarelo Vermelho típico - LAVw.

A Tabela 6 apresenta os resultados da caracterização mineralógica e composição química dos óxidos presentes nas amostras do solo em estudo. Altos percentuais de sílica (SiO₂), na faixa de 79,3 a 87%, foram encontrados para todas as áreas e perfis do solo pesquisadas, exceto para gleba 26 na profundidade de 30 cm (31,1%). As concentrações de alumina (Al₂O₃) e hematita (Fe₂O₃) apresentaram percentuais máximos de 19,6 e 22,5 %, respectivamente, além da presença relevante de rutilo (TiO₂) com variação entre 0,82 a 6,00 %.

A grande quantidade de sílica e de óxidos de ferro e alumínio é indicativo da presença de altas quantidades de silicatos, possivelmente quartzo, argilominerais e minerais secundários, derivados do processo de intemperismo (WU, 1981). Tais minerais, como esses observados na área de estudo, são característicos de Latossolos Vermelho-Amarelo como os observados na área de estudo (NEVES; HORN; FRAGA, 2008). O mineral pesado rutilo também é característico da região da área de estudo (ZANARDO *et al.*, 2016).

Nas três glebas analisadas da área de estudo foram obtidas a relação Sílica-Alumina (Tabela 7), de acordo com a Equação 2, indicando que quanto menor o valor de *Ki* mais intemperizado é o solo, ou

seja, já houve a remoção da sílica com posterior aumento da concentração da alumina. Para esses solos intensamente intemperizados, K_i é essencialmente uma

medida das proporções da caulinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ e da gibbsita $Al(OH)_3$ (BAPTISTA; MADEIRA NETO; MENESES, 1998).

Tabela 6. Relação Sílica-Alumina em solo cultivado com cana-de-açúcar, fertirrigado com vinhaça (glebas 23 e 26) e sem fertirrigação (gleba 3), em duas profundidades (30 e 100 cm).

Composição química	Fórmula	P1	P1	P2	P2	P3	P3
		30cm	100cm	30cm	100cm	30cm	100cm
		Gleba 3		Gleba 23		Gleba 26	
Alumina	Al_2O_3	7,41	7,00	5,51	5,79	19,64	10,12
Sílica	SiO_2	83,44	84,60	87,00	86,68	31,12	79,33
K_i	$SiO_2/Al_2O_3 \cdot 1,7$	19,15	20,53	26,83	25,47	2,69	13,33

De acordo com os resultados da relação sílica-alumina, a amostra da gleba 26 na profundidade 30 cm teve o índice K_i mais baixo (2,69) indicando que o solo desse local pode ter sofrido intemperismo químico por hidrólise com eliminação parcial da sílica e aumento da alumina com possíveis escoamentos para as águas superficiais. Na profundidade 100 cm, o índice já se apresentou mais elevado (13,33) indicando a presença de maior concentração da sílica e menor intemperismo dada à essa maior profundidade. Para as demais amostras, os índices indicaram a presença de maior concentração da sílica e menor intemperismo.

A instabilidade e decomposição de minerais, como gibbsita e caulinita, pode provocar a liberação do íon Al^{3+} no solo, consequentemente aumentando a saturação por alumínio e, possivelmente, a acidez do solo, que pode ser ainda mais agravada através da fertirrigação do solo com vinhaça (BAHIA et al., 2014). Portanto, a determinação dos teores de minerais também pode contribuir como uma importante ferramenta para o aprimoramento do uso e manejo do solo.

Em relação aos outros compostos químicos, os menores valores de concentração obtidos foram, da ordem de menor para o maior percentual, Na_2O (0,01

a 0,02 %), K_2O (0,01 a 0,07 %), MnO (0,01 a 0,12 %), MgO (0,01 a 0,22 %) e CaO (0,03 a 0,34 %). A similaridade dos dados da análise química corrobora com os parâmetros de fertilidade do solo retirados dos PAV's (Tabela 2) indicando um percentual crescente dos cátions: $CaO > MgO > K_2O$ encontrados no solo da área de estudo.

As amostras da gleba 3, consideradas como área controle, apresentaram os menores teores de K_2O (0,01 %), mostrando que o Latossolo Vermelho-Amarelo da área de estudo tem insuficiência de potássio e a aplicação da vinhaça pela fertirrigação repõe este macronutriente desde que adequadamente realizada. Nos locais com aplicação de vinhaças (glebas 23 e 26) os teores de K_2O foram maiores, 0,02% para a gleba 23 e 0,06 e 0,07 % para a gleba 26.

6 CONCLUSÕES

O monitoramento técnico de áreas fertirrigadas com vinhaça é crucial para prevenir a degradação do solo. Esta pesquisa apresentou uma análise temporal de algumas áreas de uma fazenda do interior de São Paulo, onde foram aplicadas vinhaça proveniente de uma usina produtora de álcool no período de 2012 a

2017. Foram evidenciados a elevação da acidez e o aumento da concentração do alumínio do solo, bem como a queda dos valores da saturação por bases (V%), ou seja, é possível concluir que houve uma redução na fertilidade do solo ao longo de um período determinado de pelo menos quatro anos. Foi identificada a presença de óxidos de ferro e alumínio no solo, que fazem parte da fração coloidal do mesmo e conjuntamente com a matéria orgânica estabilizada são elementos capazes de adsorver cátions, contribuindo para o aumento da CTC. Foram obtidos valores de concentração dos elementos cobalto e cromo maiores que os valores de intervenção, cujas causas de ocorrência natural ou pela ação antrópica são desconhecidas, indicando a necessidade da realização de estudos adicionais para a compreensão desse fenômeno ambiental. É possível que a aplicação da vinhaça nos

volumes apresentados neste trabalho por unidade de área seja a causa da relativa degradação do solo, contudo outros fatores como precipitação, lixiviação, manejo agrícola e absorção de nutrientes pela cultura possuem uma interdependência e devem ser levados em consideração em futuros estudos a fim de avaliar com maior assertividade os aspectos relacionados à qualidade do solo.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processos FAPESP: 2015/06246-7; 2016/24526-0 e 2017/18075-8) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo CNPq: 303469/2017-0) pelo suporte financeiro.

8 REFERÊNCIAS

- BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; SIQUEIRA, D. S.; LA SCALA, N. Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO₂ emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 192, n. 1, p. 152-162, 2014.
- BAPTISTA, G. M. M.; MADEIRA NETTO, J. S.; MENESES, P. R. Determinação da Relação Sílica - Alumina a partir dos Dados do Sensor AVIRIS(JPL/NASA) para Discretização Espacial do Grau de Intemperismo de Solos Tropicais. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998, Santos. **Anais [...]**. Santos: INPE, 1998. p. 1345-1355.
- BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C. V.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.
- BEBÉ, F. V.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, G. B.; OLIVEIRA, V. S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 781-787, 2009.

BRASIL. Ministério do Interior. Portaria nº 323, de 29 de novembro de 1978. Proíbe o lançamento de vinhoto em coleções de água. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 19456-19456, 4 dez. 1978.

BUENO, P. C.; RUBÍ, J. A. M.; GIMÉNEZ, R. G.; BALLESTA, R. J. Impacts caused by the addition of wine vinasse on some chemical and mineralogical properties of a Luvisol and a Vertisol in La Mancha (Central Spain). **Journal of Soil and Sediments**, Heidelberg, v. 9, n. 2, p. 121-128, 2009.

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento da safra brasileira**: cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 7, n. 4, p. 1-62, maio 2021. Safra 2020/21, Quarto levantamento. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/37136_b3e7df44d7d5e801238498af6b39d254. Acesso 10 jun. 2021.

CAVALETT, O.; JUNQUEIRA, T. L.; DIAS, M. O. S.; JESUS, C. D. F.; MANTELATTO, P. E.; CUNHA, M. P.; FRANCO, H. C. J.; CARDOSO, T. F.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C. E. V.; BONOMI, A. Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Heidelberg, v. 14, n. 1, p. 399-410, 2012.

CETESB. **Norma Técnica**: P4.231: Vinhaça - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. 3. ed. 2. versão. São Paulo: Cetesb, fev. 2015.

CETESB. **Qualidade do solo**. Valores orientadores para solo e água subterrânea. São Paulo: Cetesb, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/solo/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea>. Acesso em: 20 fev. 2020.

CHANDRA, R.; YADAV, S.; BHARGAVA, R. N.; MURTHY, R. C. Bacterial pretreatment enhances removal of heavy metals during treatment of post-methanated distillery effluent by *Typha angustata* L. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 88, n. 4, p. 1016-1024, 2008.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, Oxford, v. 33, n. 12, p. 2752-2761, 2013.

FERREIRA, S. R.; CAETANO-CHANG, M. R. Datação das formações Rio Claro e Piraçununga por termoluminescência. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 61, n. 2, p. 129-134, 2008.

FUESS, L. T. **Potencial Contaminante e energético da vinhaça**: Riscos de contaminação ao solo e recursos hídricos e recuperação de energia a partir da digestão anaeróbica. 2013.

Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 145, n. 1, p. 210-229, 2014.

FUESS, L. T.; RODRIGUES, I. J.; GARCIA, M. L. Fertirrigation with sugarcane vinasse: Foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. **Journal of Environmental Science and Health**, New York, v. 52, n. 11, p. 1063-1072, 2017.

GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. **Aplicação de vinhaça como fertilizante**. São Paulo: Copersucar, 1983. (Boletim Técnico, 5).

IBGE. **Brasil** - Mapas físicos e ambientais. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: <http://mapasinterativos.ibge.gov.br/sigibge>. Acesso em: 30 jan. 2021.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010.

LIMA, M. M. **Estudo do meio físico e caracterização da capacidade de suporte natural da região de Pirassununga/SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: Wiley-Interscience, 1979.

NARDY, A. J. R.; ENZWEILER, J.; BAHIA FILHO, O.; OLIVEIRA, M. A. F.; PENEIRO, M. A. V. Determinação de elementos maiores e menores em rochas silicáticas por espectrometria de fluorescência de Raios-X: resultados preliminares. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 6., 1997, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geoquímica, 1997. p. 346-348.

NEVES, S. C.; HORN, A. H.; FRAGA, L. M. S. Geoquímica ambiental da sub-bacia hidrográfica do Ribeirão das Pedras, Diamantina, MG. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 16, n. 2, p. 63-68, 2008.

OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo**: quadrícula de Ribeirão Preto; II. Memorial Descritivo. Campinas: Instituto Agrônomo, 1987. (Boletim, 7).

OLIVEIRA, W. S.; BRITO, M. E. B.; ALVES, R. A. B.; SOUZA, A. S.; SILVA, E. G. Cultivo da cana-de-açúcar sob fertirrigação com vinhaça e adubação mineral Sugarcane crop under vinasse fertirrigation and mineral fertilization. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 9, n. 1, p. 1-5, jan./mar. 2014. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/2587/1993>. Acesso em: 13 jun. 2021.

- OSAKI, F. **Calagem e adubação**. Campinas: Instituto Brasileiro de Ensino Agrícola, 1991.
- OTTO, R.; VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 4, p. 1137-1145, 2010.
- PRADO, R. M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. **Applied and Environmental Soil Science**, London, v. 2013, p. 1-8, 2013.
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 18. ed. São Paulo: Nobel, 2006.
- RAMALHO, J. F. G. P.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. 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, 2001.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).
- RORIZ, M. Classificação de Climas Do Brasil – Versão 3.0. Grupo de Trabalho sobre Conforto Ambiental e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC). 2014. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf. Acesso em: 10 nov. 2021.
- ROSOLEM, C. A.; SANTOS, F. P.; FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 1, p. 1033-1040, 2006.
- ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO J. A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 1, p. 105-119, 2004.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018.
- SIVALOGANATHAN, P.; MURUGAIYAN, B.; APPAVOU, S.; DHARMARAJ, L. Effect of Dilution of Treated Distillery Effluent (TDE) on Soil Properties and Yield of Sugarcane. **American Journal of Plant Sciences**, Irvine, v. 4, n. 1, p. 1811-1814, 2013.
- SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: propriedades químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 2, p. 291-299, 1998.
- SILVA, M. A.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2006.

SOTO, M. A.; BASSO, J. B.; KIANG, C. H. Impacto da fertirrigação da cana-de-açúcar por vinhaça nas propriedades físicas, químicas e hidráulicas do solo. *In*: FONTANETTI, C. S.; BUENO, O. C. (org.). **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Bauru: Canal 6, 2017. p. 103-124.

SOUZA, J. K. C.; MESQUITA, F. O.; DANTAS NETO, J.; SOUZA, M. M. A.; FARIAS, C. H. A.; MENDES, H. C.; NUNES, R. M. A. Fertirrigação com vinhaça na produção de cana-de-açúcar. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 7-12, abr./jun. 2015. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/download/532/pdf>. Acesso em: 01 mar. 2021.

TEJADA, M.; GONZALEZ, J. L. Effects of two beet vinasse forms on soil physical properties and soil loss. **Catena**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 41-50, 2006.

TOMÉ JÚNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997.

UYEDA, C. A.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; MEDEIROS, P. R. F.; DIAS, C. T. S. Avaliação dos efeitos da aplicação de vinhaça em características físico químicas de diferentes solos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 1, p. 1-10, 2013.

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; CAMARGO, A. P.; SOARES, E. Perdas de cálcio e magnésio durante cinco anos em ensaio de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 6, n. 1, p. 33-37, 1982.

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. *In*: VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (org.). **Boletim Técnico 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo: Fundação IAC, 1996. p. 237-239.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

VIEIRA, M. J. Plantio direto. *In*: IAPAR. **Amostragem de solo para análise química - plantio direto e convencional, culturas perenes, várzeas, pastagens e capineiras**. Londrina: IAPAR, 1996. p. 11-14. (Circular 90).

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A. **Aspectos importantes no manejo da cana-de-açúcar**. Piracicaba: FERTIZA: CEA, 1998.

WATANABE, R. T; FIORETTO, R. A; HERMANN, E. R. Propriedades químicas do solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da adição da palhada de colheita, calcário e vinhaça em superfície (sem mobilização). **Semina**, Londrina, v. 25, n. 2, p. 93-99, 2004.

WILKIE, A.; RIEDESEL, K.; OWENS, J. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 63-102, 2000.

WU, F.T. **Minerais pesados das sequências arenosas paleozóica e mesozóica no centro-leste do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Geociências, Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C.; NAVARRO, G.; MORENO, M.; ROCHA, R.; ROVERI, C.; AZZI, A. Formação Corumbataí na região de Rio Claro/SP: Petrografia e implicações genéticas. **Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 322-345, 2016.