

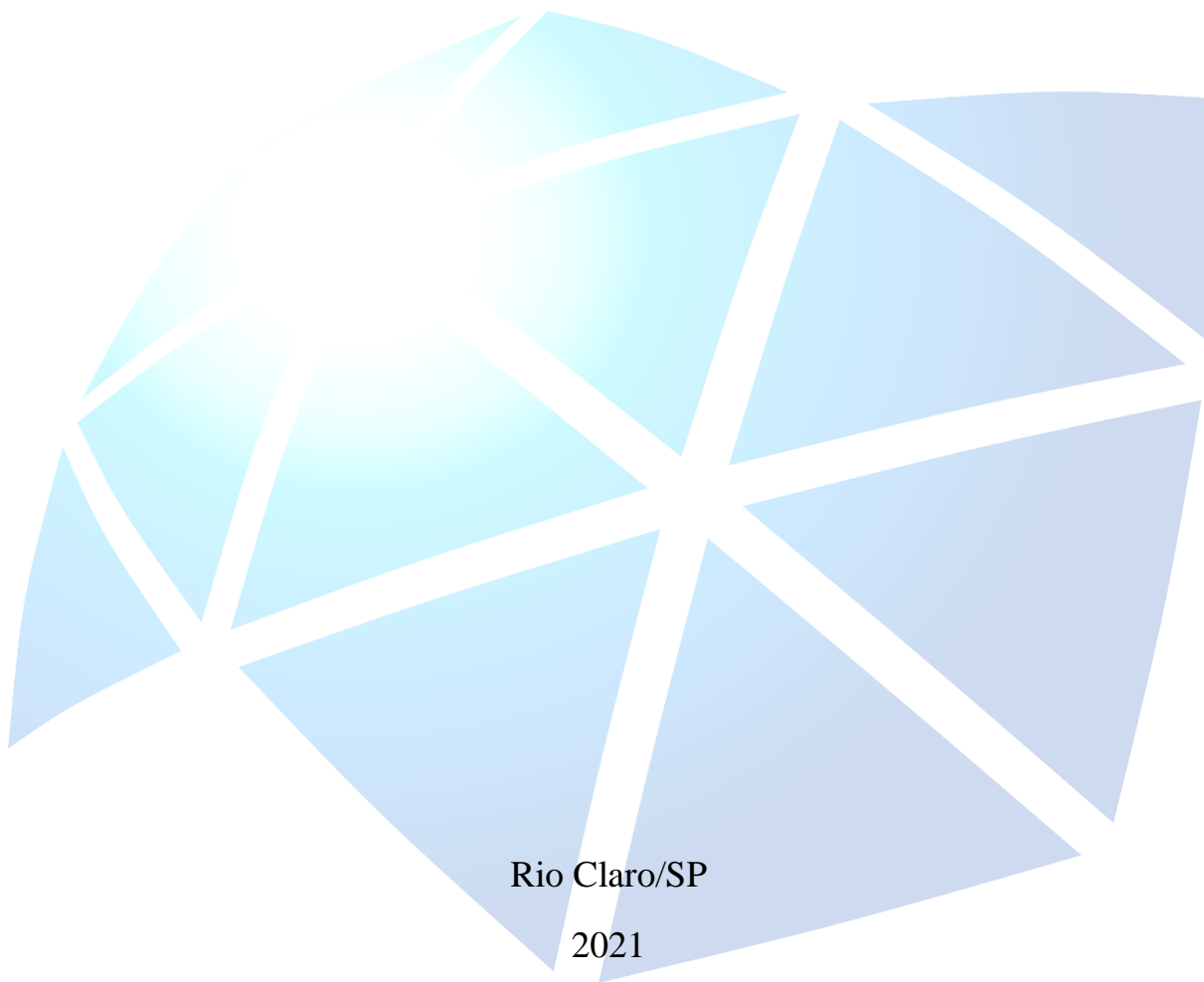


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus Rio Claro



MARCOS EDUARDO ALTOÉ

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE E EFEITO DA APLICAÇÃO DE
VINHAÇA NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO CULTIVADO
COM CANA-DE-AÇÚCAR**



Rio Claro/SP

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO – UNESP

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

MARCOS EDUARDO ALTOÉ

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE E EFEITO DA APLICAÇÃO DE
VINHAÇA NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO CULTIVADO
COM CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro/SP, 2021

A469a Altoé, Marcos Eduardo
Avaliação da fertilidade e efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas do solo cultivado com cana-de-açúcar / Marcos Eduardo Altoé. -- Rio Claro, 2021
63 p. : tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

1. Fertirrigação. 2. Saturação por base. 3. Análise temporal. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

MARCOS EDUARDO ALTOÉ

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE E EFEITO DA APLICAÇÃO DE
VINHAÇA NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO CULTIVADO
COM CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Dr. Marcelo Loureiro Garcia (Orientador)

Dra. Mayara Caroline Felipe

Dr. Lucas Tadeu Fuess

Conceito: Aprovado

Rio Claro/SP, 15 de janeiro de 2021

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus criador e dono de nossas vidas.

Minha esposa e companheira Carolina P. C. de Freitas Altoé pelo amor, carinho e dedicação que tem demonstrado a mim e aos nossos filhos.

Aos meus filhos Guilherme, Ana Paula e Arthur que muito têm ensinado sobre o valor verdadeiro do amor e a passar de forma gloriosa os obstáculos que a vida nos coloca, valorizando cada instante.

À minha Mãe, que tem nos auxiliado e demonstrado seu amor e dedicação em relação a toda minha família.

À amiga que inspirou a busca por minha epígrafe neste trabalho, Larissa Galdeano, responsável pela primeira dissertação e coletora dos dados que me ajudou na montagem desta dissertação.

Aos meus amigos de profissão que me apoiaram durante esta caminhada.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia, que com sua sabedoria e suas palavras foi me direcionando nesta jornada.

RESUMO

O uso da vinhaça da cana-de-açúcar na fertirrigação tem sido uma alternativa para destinação deste subproduto da produção do álcool, que com o aumento da produção nos últimos anos, tem gerado um grande volume de vinhaça. A vinhaça, além de ser uma fonte de água para o solo, é também uma fonte importante de potássio e outros nutrientes. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise temporal do solo de cinco diferentes glebas: 28, 52, 65, 83 e 96 no período de 2012 a 2017 em uma fazenda no interior do Estado de São Paulo, que fez uso da técnica de fertirrigação. Foram analisadas características de fertilidade dos solos relacionadas a análise química dos mesmos (pH, Saturação por base, Saturação por alumínio, Capacidade de troca catiônica (CTC), dentre outras) e das vinhaças (pH, DQO, DBO). Os valores encontrados de potássio e demais cátions de base após aplicação da vinhaça se encontraram dentro dos valores para a cultura de cana-de-açúcar. A saturação por base (V%) apresentou valores altos em todas as dezesseis avaliações realizadas, com apenas cinco valores abaixo de 60% (valor considerado ideal para a cultura), sendo os valores: 55,12% na gleba 28 em 2012, 53,37% na gleba 83 em 2014, 54,46% na gleba 52 em 2014, 56% na gleba 65 em 2014 e 51,97% na gleba 28 em 2016. Além destas avaliações de fertilidade, foram feitos estudos comparativos com duas amostras de solo coletadas pela usina responsável pela fertirrigação na área de estudo em 2016 para análises e avaliações ambientais, apresentando resultados mineralógicos importantes que sinalizaram a permanência das características ambientais do solo, mesmo nas áreas com fertirrigação por vinhaça em todo o período do estudo. O presente estudo apontou que a vinhaça utilizada em dosagens adequadas, muitas vezes significando valores menores que os sinalizados pela equação do cálculo da vinhaça, causam benefícios ao solo e à cultura de cana-de-açúcar.

Palavras-Chave: Fertirrigação. Saturação por base. Análise Temporal.

ABSTRACT

The use of sugarcane vinasse in fertigation has been an alternative for the destination of this by-product of alcohol production, which, with the increase in production in recent years, has generated a large volume of vinasse. Vinasse, in addition to being a source of water for the soil, is also an important source of potassium and other nutrients. The objective of this work was to carry out a temporal analysis of the soil of five different plots: 28, 52, 65, 83 and 96 in the period from 2012 to 2017 on a farm in the interior of the State of São Paulo, which used the fertigation technique. Soil fertility characteristics related to their chemical analysis (pH, Base saturation, Aluminum saturation, Cation exchange capacity (CTC), among others) and vinasse (pH, DQO, DBO) were analyzed. The values found for potassium and other base cations after application of vinasse were found within the values for the cultivation of sugarcane. Base saturation (V%) showed high values in all sixteen evaluations performed, with only five values below 60% (value considered ideal for the crop), with the following values: 55.12% in plot 28 in 2012, 53, 37% on plot 83 in 2014, 54.46% on plot 52 in 2014, 56% on plot 65 in 2014 and 51.97% on plot 28 in 2016. In addition to these fertility assessments, comparative studies were carried out with two samples of soil collected by the plant responsible for fertigation in the study area in 2016 for environmental analysis and assessments, presenting important mineralogical results that signaled the permanence of the environmental characteristics of the soil, even in areas with fertigation by vinasse throughout the study period. The present study pointed out that the vinasse used in adequate dosages, often meaning lower values than those indicated by the equation of the vinasse calculation, cause benefits to the soil and to the culture of sugarcane.

Keywords: Fertigation. Base saturation. Temporal Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma da produção álcool e açúcar com geração vinhaça	18
Figura 2. Localização do município de Santa Cruz das Palmeiras, SP	25
Figura 3. Localização da Fazenda no município de Santa Cruz das Palmeiras	26
Figura 4. Glebas da área avaliada com destaque para a gleba 28	26
Figura 5. Glebas da área avaliada com destaque para a gleba 52	27
Figura 6. Glebas da área avaliada com destaque para as glebas 65 e 83	27
Figura 7. Glebas da área avaliada com destaque para a gleba 96	28
Figura 8. Glebas da área avaliada (sem destaque)	28
Figura 9. Pedologia no entorno da fazenda estudada	29
Figura 10. Áreas de coleta de amostras do solo em 2016 pela usina nas glebas 11, 27 e 21	31
Figura 11. Área das glebas coletadas das amostras de 2018 (P1 e P2)	31
Figura 12. Valores de pH das vinhaças aplicadas por ano	34
Figura 13. Valores de K^+ das vinhaças aplicadas por ano	35
Figura 14. Valores de Ca^{2+} das vinhaças aplicadas por ano	36
Figura 15. Valores de Mg^{2+} das vinhaças aplicadas por ano	36
Figura 16. Valores de Na^+ das vinhaças aplicadas por ano	37
Figura 17. Valores de Relação (DQO/DBO) das vinhaças aplicadas por ano	38
Figura 18. Valores de Dureza das vinhaças aplicadas por ano	39
Figura 19. Gráfico comparativo dos valores de %Ks/CTC, 5%CTC e volume de vinhaça	41
Figura 20. Valores da vinhaça aplicada na gleba 28, comparando com os valores K^+	43
Figura 21. Dosagem de vinhaça aplicada na gleba 28, com parâmetros para cálculo de volume	43
Figura 22. Valores da vinhaça aplicada na gleba 52, comparando com os valores K^+	45
Figura 23. Dosagem da vinhaça aplicada na gleba 52, com parâmetros utilizados para cálculo	45
Figura 24. Valores da vinhaça aplicada na gleba 65, comparando com os valores K^+	47
Figura 25. Dosagem da vinhaça aplicada a gleba 65, com parâmetros utilizados para cálculo	47
Figura 26. Valores da vinhaça aplicada na gleba 83, comparando com os valores K^+	49
Figura 27. Dosagem da vinhaça aplicada na gleba 83, com parâmetros utilizados para cálculo	49
Figura 28. Valores da vinhaça aplicada na gleba 96, comparando com os valores K^+	51
Figura 29. Dosagem de vinhaça aplicada gleba 96, com parâmetros utilizados para cálculo	51
Figura 30. Comparação dos valores de Saturação de base (V%) e por alumínio (m%)	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Glebas utilizadas para avaliação temporal dos dados fertilidade	30
Tabela 2. Parâmetros para análise da vinhaça, fertilidade e caracterização ambiental do solo	32
Tabela 3. Resultados Analíticos da Vinhaça utilizada na fertirrigação da área estudada	33
Tabela 4. Relação DQO/DBO	38
Tabela 5. Cálculos da dosagem de vinhaça utilizando a Equação 1	40
Tabela 6. Análise de fertilidade do solo após fertirrigação de vinhaça da gleba 28	42
Tabela 7. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5% CTC para a gleba 28	42
Tabela 8. Análise de fertilidade do solo após fertirrigação da vinhaça da gleba 52	44
Tabela 9. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5% CTC para gleba 52	44
Tabela 10. Análise de fertilidade solo, após fertirrigação da vinhaça da gleba 65	46
Tabela 11. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5% CTC para gleba 65	46
Tabela 12. Análise de fertilidade do solo, após fertirrigação da vinhaça da gleba 83	48
Tabela 13. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5% CTC para gleba 83	49
Tabela 14. Análise de fertilidade solo, após fertirrigação da vinhaça da gleba 96	50
Tabela 15. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5% CTC para a gleba 96...	50
Tabela 16. Comparação das médias dos valores de fertilidade do solo em fazendas distintas, utilizando a mesma vinhaça no mesmo período de aplicação	53
Tabela 17. Amostras coletadas em 3 pontos da fazenda pela usina geradora de vinhaça fertirrigada ...	54
Tabela 18. Valores dos óxidos das amostras coletadas em 2018 para análises ambientais	55
Tabela 19. Valores dos metais das amostras coletadas em 2018 para análises ambientais	55
Tabela 20. Faixa aceitável de macro e micronutrientes de cana-de-açúcar	56
Tabela 21. Valores analisados por glebas no período de 2012 a 2017	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Al³⁺	Alumínio
Al₂O₃	Óxido de alumínio
ALT	Alteração da umidade do solo
Ba	Bário
Ca²⁺	Cálcio
CaCO₃	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CASS	Câmara Ambiental do Setor Sucroenergético
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Ce	Cério
CH₄	Gás metano
CO₂	Gás carbônico
Co	Cobalto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Crômio
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
Cu	Cobre
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEF	Deficiência Hídrica
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Eq.	Equação
Fe²⁺	Ferro
FeCO₃	Siderita
Fe₂O₃	Óxido de ferro (hematita)
Ga	Gálio
H⁺	Íon hidrogênio
H + Al	Hidrogênio e alumínio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K⁺	Potássio

K₂O	Óxido de potássio
ks	Concentração de potássio no solo
kvi	Concentração de potássio na vinhaça
La	Lantânio
m%	Saturação por alumínio
Mg²⁺	Magnésio
MgCO₃	Magnesita
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês
MnO	Óxido de manganês
MO	Matéria Orgânica
N	Nitrogênio
Na⁺	Sódio
Na₂O	Óxido de sódio
Nb	Nióbio
NC	Necessidade de calagem
NH₃	Nitrogênio Amoniacal
Ni	Níquel
NO³⁻	Nitrato
NO²⁻	Nitrito
O	Folha octaédrica
P	Fósforo
P1, P2, P3	Pontos de amostragens
PAV	Planos de Aplicação de Vinhaça
P₂O₅	Pentóxido de fósforo
PLANALSUCAR	Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar
ppm	Partes por milhão
PRNT	Poder relativo de neutralização total do corretivo
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Alcool
RAS	Relação de adsorção de sódio
Rb	Rubídio
R_{DQO/DBO}	Razão DQO e DBO
SB	Soma de Bases

SiO₂	Sílica
SiO₃	Quartzo
SO₄²⁻	Sulfato
Sr	Estrôncio
SVOC	Composto Orgânico semivolátil
SSRH	Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos
Ti	Titânio
TiO₂	Óxido de titânio
TiO₃	Anatásio
V	Vanádio
V%	Saturação por bases
VI	Valores de Intervenção
VRQ	Valores relacionados a Qualidade
VOC	Composto orgânico volátil
VP	Valores de Prevenção
Y	Ítrio
Zn	Zinco
Zr	Zircônio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 Vinhaça na agricultura	17
3.2 Critérios para aplicação da vinhaça	19
3.3 Parâmetros e caracterização da fertilidade do solo	20
3.3.1 Fertilidade do solo para a produção de cana-de-açúcar	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 Área de estudo	25
4.2 Caracterização de solo da região da fazenda estudada	29
4.3 Planos de Aplicação de Vinhaça	29
4.4 Dados da fertilidade do solo	30
4.5 Dados ambientais do solo	30
4.6 Parâmetros da qualidade ambiental e análises	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1 Parâmetros químicos de avaliação da vinhaça aplicada	33
5.2 Parâmetros químicos para caracterização da fertilidade do solo	39
5.3 Caracterização ambiental do solo	54
6. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXO	63

1. INTRODUÇÃO

O cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo é extremamente importante para o agronegócio brasileiro. Manter o solo fértil e com as melhores características físico-químicas implica um aumento de produção e qualidade da cana-de-açúcar, já que este é um recurso natural fundamental para a produção agrícola desta e de outras culturas.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2018), o Brasil apresentou um significativo crescimento na produção de álcool entre 2002 e 2012, com um incremento de mais de 52% em hectares de cana-de-açúcar colhida, enquanto a produção em toneladas aumentou mais de 55%. Essa expansão teve aumentos tão significativos que impactou até mesmo estados novos, fora do Sudeste e Nordeste, que são os maiores produtores de cana do Brasil, atingindo novas áreas de produção, como a região Centro-Oeste, com destaque para o estado de Goiás, que nesse período teve um aumento de mais de 25% em área colhida e produção.

Esta expansão da produção de álcool, gera também aumento da produção de resíduos e efluentes como o subproduto vinhaça, conhecido também como vinhoto ou restilo. Na produção do álcool, o processo de fermentação gera de 10 a 18 litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido, volume este que depende das condições tecnológicas da destilaria (OLIVEIRA, 2015). Na safra de 2018/2019 foram gerados aproximadamente 425 bilhões de litros de vinhaça, resultantes de uma produção de cerca de 34 bilhões de litros de álcool (ROSSETTO, 2018). Estes valores crescentes a cada safra mostram a necessidade constante de cuidados e destino correto para este resíduo, que causa uma série de impactos ambientais, como comprometimento da qualidade das águas subterrâneas e danos físicos e químicos ao solo quando utilizados em excesso (MORTATTI, 2010).

Na produção do álcool, este subproduto é gerado após a fermentação do mosto e a destilação do vinho. Trata-se de um material com aproximadamente 6% de constituintes sólidos, onde a matéria orgânica (MO) se encontra em maior quantidade (ROSSETTO, 1987). Em termos de quantidades de macro e micronutrientes, destacam-se as concentrações de Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) com menores quantidades de Nitrogênio (N) e Fósforo (P) (FUESS, 2013).

A vinhaça, além de ser uma mistura complexa, apresenta uma composição que pode variar de acordo com a destilaria que a gera, com o processo de destilação empregado em até mesmo de uma safra para outra (CORREIA, 2015). Esses fatores dificultam ainda mais o

tratamento desse resíduo, fazendo da fertirrigação um destino rápido, econômico e seguro para a vinhaça.

Os primeiros despejos da vinhaça no solo aconteciam nas áreas de sacrifício (áreas não utilizadas para o plantio de cana-de-açúcar onde eram feitos despejos constantes do efluente gerado), que eram muito próximas às usinas. Essas áreas recebiam, ano após ano, doses elevadas do efluente, ficando, posteriormente, grandes períodos de tempo inutilizadas devido à alta salinidade e infertilidade (OLIVEIRA et al., 2009). Posteriormente, a vinhaça passou a ser aplicada na fertirrigação das lavouras de cana. Por alguns anos a fertirrigação era feita em áreas próximas da usina geradora deste resíduo, visando a economia com o transporte em locais mais distantes. Esta prática também causou problemas ambientais como contaminação do solo por excesso de salinidade, acidez e aumento das moscas *Stomoxys calcitrans*, também conhecida como mosca-dos-estábulo nos bolsões formados pelo excesso de vinhaça, muitas vezes misturados a palha acumulada no solo nas áreas fertirrigadas (EMBRAPA, 2015). A distância de aplicação da vinhaça foi ampliada observando-se os custos de transportes comparados aos custos da adubação, e a fertirrigação passou a ser feita em áreas com distâncias de até 15 km da usina geradora. Estas distâncias da área aplicada da usina geradora da vinhaça, conhecida como Raio Econômico de aplicação, a partir de 2009, com incremento dos preços dos adubos minerais em comparação com os custos de transporte da vinhaça para aplicação, foi ampliado para aproximadamente 38 km de distância da usina (POVEDA, 2014).

Observando-se a necessidade de evitar possíveis riscos ambientais proveniente da aplicação em excesso de vinhaça no solo, foram instituídas normas e legislação que regulamentam o uso de maneira adequada da Vinhaça, como a Norma Técnica P4.231 da CETESB, 2015. Essa norma apresenta e define critérios e procedimentos quanto ao armazenamento, transporte e volume de aplicação da vinhaça. Outro critério estabelecido pela Norma Técnica P4.231 pontua que sejam feitos anualmente os “Planos de Aplicação de Vinhaça” (PAV) para acompanhamento e fiscalização do processo de fertirrigação através da amostragem de solos e de vinhaça em cada safra. Este acompanhamento permite analisar se os valores de concentrações químicas não ultrapassam os respectivos valores de prevenção (VP) (CETESB, 2015).

A vinhaça há muito tempo vem sendo utilizada como um repositor de minerais no solo, porém, esta reposição deve ser feita em doses adequadas e permitidas, com um acompanhamento analítico desta fertirrigação, mantendo o solo fértil. Esta análise é o objetivo deste estudo em uma área de uma fazenda em Santa Cruz das Palmeiras.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivos:

- 1 - Analisar as variações das propriedades químicas do solo de uma área em uma fazenda, exposta à fertirrigação com vinhaça;
- 2 – Analisar os volumes de vinhaça aplicados no solo, observando se estas quantidades, mesmo dentro do limite permitido por lei foram excessivas ou não, causando prejuízos ao solo e ambiente.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Vinhaça na agricultura

A vinhaça, subproduto gerado da produção de álcool (etanol), é constituída principalmente pela matéria orgânica (MO) parte considerada sólida deste produto. Esta matéria orgânica se apresenta basicamente sob a forma de ácidos orgânicos. Outros constituintes da vinhaça, porém em menores quantidades, são cátions como K, Ca e Mg (CAIXETA et al., 2010), nitrogênio, enxofre, alumínio, fósforo, sulfatos e micronutrientes como os metais. Na sua composição também encontram-se praticamente todas as substâncias utilizadas na transformação da cana-de-açúcar em açúcar e etanol como água, glicerina, álcoois superiores, aldeídos, ácido succínico, acético entre outros (CASTRO, 2007).

A vinhaça, por muitos anos vista como um poluente, hoje representa um produto de grande valor econômico para as usinas, que utilizam grandes quantidades deste produto na fertirrigação. O Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar (PLANALSUCAR) de Alagoas verificou, através de estudos da composição química da vinhaça, que o potássio (K^+) é o elemento de maior destaque na sua composição, sendo utilizado na determinação do volume a ser aplicado por hectare na fertirrigação. Esta característica faz da vinhaça um importante fertilizante a ser utilizado na própria lavoura da cana-de-açúcar (NASCIMENTO, 2003), visto que esta cultura exige pesadas adubações potássicas, com volumes médios de cerca de 120 a 130 kg.ha⁻¹ (CTC, 1988). A fertirrigação é o processo de irrigação da cultura de cana-de-açúcar, utilizando-se da vinhaça diluída em água de irrigação, suprimindo assim parte da necessidade da lavoura de fertilizantes e água.

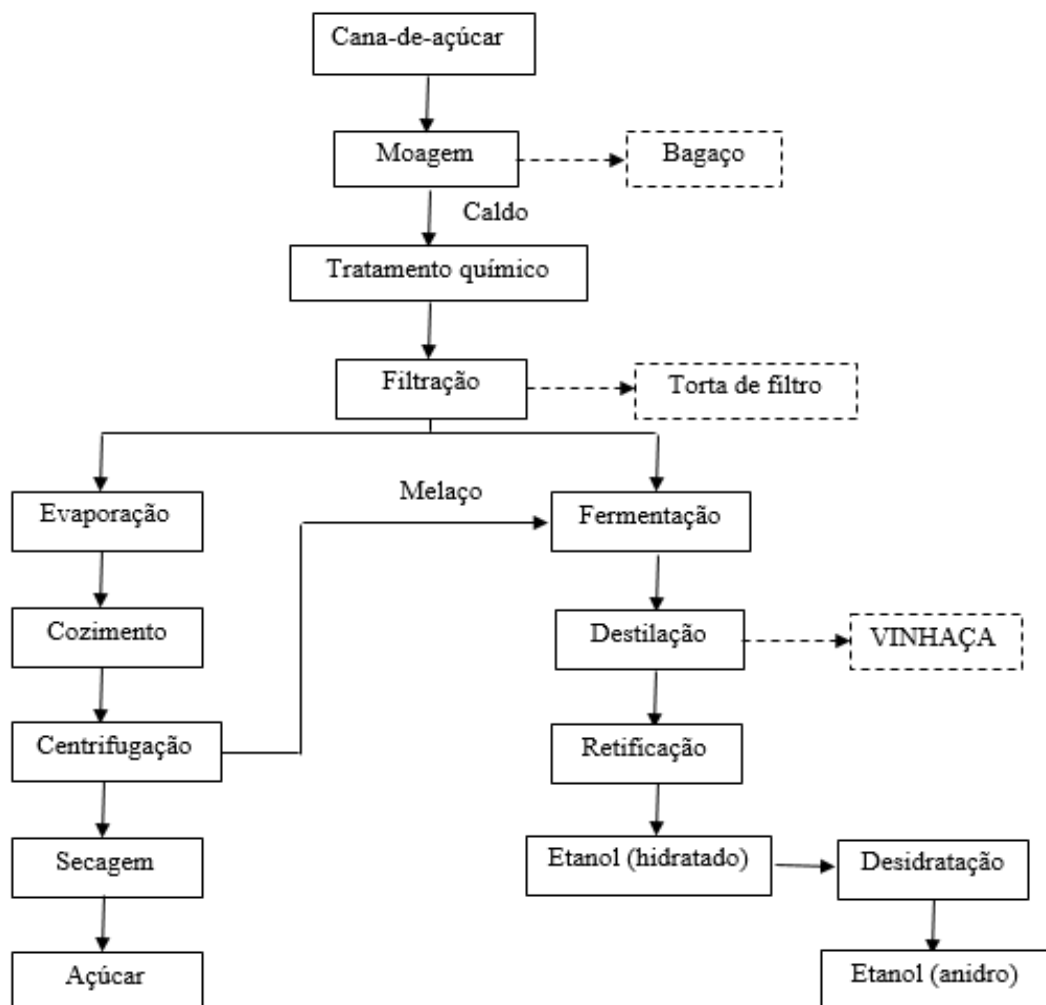
A fertirrigação com uso da vinhaça nos canais foi intensificada com a proibição do despejo deste subproduto nos cursos d'água. A prática de aplicação de vinhaça se tornou importante e bem aceita, uma vez que requer pouco investimento, pouco custo de manutenção, não envolve processos que exijam tecnologia complexa e possibilita uma rápida eliminação de grandes quantidades desse material (ELIA NETO, 2008). A partir de então, alguns estudos indicaram sua ação benéfica em relação à recomposição de alguns nutrientes e produtos químicos do solo. Também ajuda no aumento da infiltração e retenção de água ocasionado pela MO, contribuindo na formação de agregados e reduzindo a suscetibilidade à erosão. Ao longo do tempo a sua incorporação constante proporciona considerável ganho de produtividade. Por se tratar de um método barato e de melhor eficiência na eliminação de grandes volumes desses

resíduos, ocorreu a necessidade de se controlar este uso, criando-se normas para evitar que se tornasse prejudicial ao solo (CETESB, 2005).

Apesar dos benefícios indicados acima do uso da fertirrigação com vinhaça nas plantações de cana-de-açúcar, quando lançado ao solo sem tratamento apresenta como consequência a contaminação de lençóis freáticos, afeta todo o bioma, destrói lavouras e leva à morte a vida aquática. Propicia a rápida decomposição microbiana da matéria orgânica tornando o ambiente insalubre e causando desequilíbrio ambiental (BROUYÈRE et al., 2004; CASTRO, 2007).

O processo pelo qual a vinhaça é gerada pode ser observado no fluxograma da produção do etanol e do açúcar, sendo este subproduto gerado em volumes que variam de 12 a 18 vezes mais que o volume de etanol produzido (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma da produção álcool e açúcar com geração vinhaça



Fonte: Adaptado (FUESS 2013)

3.2 Critérios para aplicação da vinhaça

Antes da criação da CASS (Câmara Ambiental do Setor Sucroenergético) em 2002, não existiam padrões para uso da vinhaça no solo, com cada regional da CETESB adotando diferentes critérios. Em 2005 foi publicada a primeira edição da portaria P4.231 denominada “Vinhaça – Critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça no solo agrícola” no Estado de São Paulo. No ano de 2015 após várias alterações, foi introduzida a norma do monitoramento da qualidade ambiental do solo (CETESB, 2015).

A Norma Técnica P 4.231/2005 estabelece critérios e procedimentos quanto ao armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar. Segundo a norma, a vinhaça deverá ser caracterizada quanto aos seguintes parâmetros (CETESB, 2005):

- pH;
- Nitrogênio nitrato (mg N L^{-1});
- Nitrogênio nitrito (mg N L^{-1});
- Nitrogênio amoniacal (mg N L^{-1});
- Nitrogênio Kjeldahl (mg N L^{-1});
- Sódio (mg Na L^{-1});
- Cálcio (mg Ca L^{-1});
- Potássio (mg K L^{-1});
- Sulfato ($\text{mg SO}_4 \text{ L}^{-1}$);
- Fósforo total (mg P L^{-1});
- Cloreto (mg Cl L^{-1}).

A norma também estabelece que deverá ser realizado ou atualizado o Plano de Aplicação da Vinhaça (PAV) que deve conter as áreas e as taxas de dosagem a serem aplicadas. Além disso, a Norma determina que a dosagem da vinhaça no solo deve estar relacionada a necessidade da cultura. A dosagem é calculada de acordo com a análise de solo que deve ser realizada anualmente, fornecendo o valor para a colocação no PAV do ano seguinte. Esta dosagem é determinada em função do potássio disponível na vinhaça e no solo e da CTC (Capacidade de Troca Catiônica) do solo. A portaria prevê também que semanalmente deverá ser determinado o teor de K_2O da vinhaça a ser aplicada na lavoura, ou seja, se pura, concentrada ou incorporada em água residual. Essa determinação indica a dosagem máxima a ser aplicada (CETESB, 2005) (Equação 1):

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

Onde:

0,05 = 5% da CTC (CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc.dm^{-3} a pH 7,0 dada pela análise de fertilidade do solo);

ks = Concentração de potássio no solo, expressa em cmolc.dm^{-3} , à profundidade de 0,80 m, dada pela análise de fertilidade do solo;

3744 = Constante para transformar os resultados da análise de fertilidade (expressos em cmolc.dm^{-3} ou $\text{meq.}(100 \text{ cm}^{-3})$) para kg de potássio em um volume de um hectare por 0,80 m de profundidade;

kvi = Concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $\text{K}_2\text{O.m}^{-3}$, resultante da média anual obtida nas análises semanais ou da média obtida nas análises semestrais.

De acordo com CETESB (2015) esta equação define que a concentração máxima de potássio no solo não poderá exceder 5% da CTC, sendo necessária a reposição de 185 kg de K_2O por hectare por corte quando este limite for atingido. Considerar apenas o potássio como fator determinante do volume de vinhaça a ser despejado no solo pode ocasionar problemas ambientais e de infertilidade, conforme as análises comparativas feitas neste trabalho com os dados apresentados nos trabalhos de GALDEANO (2019) e SERAFIM (2020).

3.3 Parâmetros e caracterização da fertilidade do solo

As análises de solo são importantes para apresentação de dados físicos, químicos e mineralógicos que servirão para a orientação quanto ao tipo de agricultura melhor para a região daquele solo, para a avaliação da existência de elementos tóxicos ou em excesso. Estas análises também permitem aplicação direcionada de fertilizantes e de corretivos auxiliando no manejo do solo (RAIJ, 2001). Os principais parâmetros para a análise química da fertilidade do solo, são apresentados na Portaria P4.231 da CETESB: pH, SB (Soma de Bases), CTC (Capacidade de Troca Catiônica), V% (Saturação por Bases), m% (Saturação por Alumínio), MO (Matéria Orgânica) e as concentrações de cátions potássio (K^+), sódio (Na^+), magnésio (Mg^{2+}), cálcio (Ca^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) (CETESB, 2015).

A Soma de Bases (SB) é a soma dos teores das bases trocáveis presentes no solo, ou seja, os cátions que podem ser adsorvidos pelas plantas (TEIXEIRA, 2017) (Equação 2):

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ \quad (2)$$

A capacidade de troca de cátions (CTC) de um solo, de uma argila ou do húmus representa a quantidade total de cátions retidos à superfície desses materiais em condição permutável ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + H^+ + Al^{3+}$) ou seja, que possuem uma superfície de troca capaz de adsorver cátions. A CTC total é correspondente à somatória de todos os cátions permutáveis do solo (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , H^+ e Al^{3+}) (Equação 3) e a CTC efetiva é correspondente à soma de todos os cátions permutáveis, com exceção do íon H^+ (Equação 4). A CTC efetiva reflete a capacidade do solo em reter cátions próximo ao valor do pH natural do solo (TEIXEIRA, 2017):

$$CTC \text{ total} = SB + H^+ + Al^{3+} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + H^+ + Al^{3+} \quad (3)$$

$$CTC \text{ efetiva} = SB + Al^{3+} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + Al^{3+} \quad (4)$$

A Saturação por Bases (V%) é determinada pela razão da SB pela CTC total em porcentagem e indica a proporção da CTC que é preenchida pelas bases trocáveis (TEIXEIRA, 2017) (Equação 5):

$$V\% = \left(\frac{SB}{CTC \text{ total}} \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

Os solos que apresentam a porcentagem de saturação por bases (V%) maior que 50% são considerados solos férteis ou eutróficos. Os solos com (V%) menor que 50% são considerados solos distróficos ou inférteis. Os solos distróficos podem apresentar pobreza de bases trocáveis (Ca^{2+}) e um alto teor de Al^{3+} trocável ou uma porcentagem de saturação por Al^{3+} (m%) maior que 50%, o que os caracterizariam como solos álicos ou muito pobres.

A acidez é outra informação muito importante na hora de interpretar a análise de solo. A acidez é indicada pelo pH, que é uma unidade de medida (valores 0 a 14) utilizada para avaliar a atividade dos íons de hidrogênio (H^+). Os íons H^+ são elementos monovalentes que realizam ligações de alta energia. Essas ligações são de extrema importância para as reações que ocorrem no solo e acabam por influenciar significativamente a atividade das plantas. A acidez trocável representa o teor de Al^{3+} no solo. Este elemento atua como um ácido fraco, liberando H^+ na solução do solo e alterando o pH do mesmo. Saber o teor de Al^{3+} é importante, pois o mesmo age como elemento acidificante ativando o H^+ (LOPES, 1998).

O Al^{3+} possui propriedades tóxicas e afeta de maneira negativa o crescimento radicular. O aumento das concentrações destes cátions, que pode ocorrer através da utilização de soluções com pH ácido, possibilita a conseqüente acidificação do solo, seguida de uma transição do pH do ácido para índices mais alcalinos conforme o consumo de H^+ através da atividade microbiana (FUESS, 2013; MORTATTI, 2010). Para a cultura de cana-de-açúcar, o pH ideal é 6,5, mas esta cultura também se desenvolve bem na faixa de 5,5 a 6,0 (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

A avaliação da toxicidade por meio das concentrações de Al^{3+} pode ser calculada através do parâmetro m% (saturação por alumínio), que corresponde à relação em porcentagem dos teores de Al^{3+} com a CTC efetiva (BRAGA, 2013; RONQUIM, 2010) (Equação 6):

$$m\% = \left(\frac{Al^{3+}}{CTC\ efetiva} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

Quando os percentuais de m% forem maiores que 20%, estes podem representar um risco de toxicidade a algumas culturas que não são resistentes a essas condições (PEREIRA, 2015; LOPES, 2004).

A correção ideal para este elemento é a calagem, que age como um neutralizante de sua ação acidificante e o insolubiliza, tornando-o inofensivo às plantas. Nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, o método corretivo utilizado é o “Método da Saturação por Bases”, onde a necessidade da calagem nos solos argilosos é calculada através da equação (SOUSA; MIRANDA, OLIVEIRA., 2007) (Equação 7):

$$NC(t. ha^{-1}) = \frac{(V_2 - V_1)}{PRNT} \cdot CTC\ total \quad (7)$$

Onde:

NC = necessidade da calagem em tonelada por hectare para 0-20 cm de solo;

V_2 = valor da saturação por bases do tipo de cultura dada em % (para a cultura da cana-de-açúcar é utilizado o valor de 60%);

V_1 = valor da saturação por bases atual do solo dada em %;

CTC total = capacidade de troca catiônica dada em $cmolc.dm^{-3}$ a pH 7,0;

PRNT = poder relativo de neutralização total do corretivo (alguns valores de referência de PRNT de alguns corretivos: CaO_3 – 100, MgO – 248, CaO – 179, $Ca(OH)_2$ – 135 e $Mg(OH)_2$ – 172 (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007)).

A calagem do solo, além de elevar o pH fornece Ca^{2+} ou Mg^{2+} como nutrientes, diminuindo ou eliminando os efeitos tóxicos do Al^{3+} , Mn^{2+} e Fe^{2+} . Além disso, diminui a

fixação de P, aumenta a eficiência dos fertilizantes, aumenta a atividade microbiana e a liberação de nutrientes pela decomposição da MO, ou seja, melhora as propriedades físicas do solo: melhor aeração, circulação de água, favorecendo o desenvolvimento das raízes (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Outro parâmetro que influencia na fertilidade do solo é a quantidade de Matéria Orgânica (MO) disponível, pois sua degradação produz substâncias húmicas coloidais que aumentam a CTC ao fornecerem cargas negativas aumentando o potencial de retenção de cátions no solo, além de contribuir em menor quantidade na adição dos cátions de base de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (BARROS et al., 2010; RONQUIM, 2010; ZOLIN et al., 2011).

3.3.1 Fertilidade do solo para a produção de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar necessita de elevadas quantidades de nutrientes para produzir sua grande quantidade de massa vegetal. Desta maneira é de extrema importância conhecer a capacidade de fornecimento destes nutrientes pelo solo. A correção destes macronutrientes pode ser feita através de adubações quando em falta, e através de calagens e gessagens quando em excesso (OLIVEIRA et al., 2007).

Dentre estes macronutrientes de extrema importância na lavoura de cana-de-açúcar, destaca-se o potássio (K^+), elemento altamente extraído por esta cultura. O potássio participa da síntese de açúcares e proteínas, e sua deficiência está ligada a uma produção com baixos níveis de sacarose. Corrigir a acidez do solo melhora a disponibilidade deste nutriente à planta, mesmo que esta cultura esteja adaptada a acidez, esta correção através da calagem disponibiliza potássio quando existe esta deficiência (ROSSETTO et al., 2005).

Outro macronutriente importante na nutrição e fisiologia da cana é o nitrogênio (N), fornecido principalmente pela adubação nitrogenada, que deve ser feita em aplicações parceladas, evitando a perda e garantindo maior absorção do mesmo pela planta.

Os micronutrientes também têm importância considerável na cultura da cana-de-açúcar. Estas quantidades são relativamente baixas quando comparadas com os macronutrientes, mas fica evidenciada sua importância quando se observam as quantidades extraídas dos mesmos pela planta do solo. Reduções na produtividade e até morte de plantas são consequências naturais advindas de desarranjos nos processos metabólicos, ocasionados pela carência de micronutrientes (DAL BEM, 2013).

Levando em consideração a composição complexa da vinhaça e as análises do solo para verificação da fertilidade e preservação do meio ambiente, verificou-se que utilizar apenas o

potássio como principal fator determinante do volume de vinhaça utilizado na fertirrigação, o que ocorre quando a Equação de determinação volume vinhaça é a única fator utilizada desta determinação, ocorre um comprometimento significativamente da qualidade do solo, ocasionando prejuízos a área com longos períodos de exposição a este subproduto.

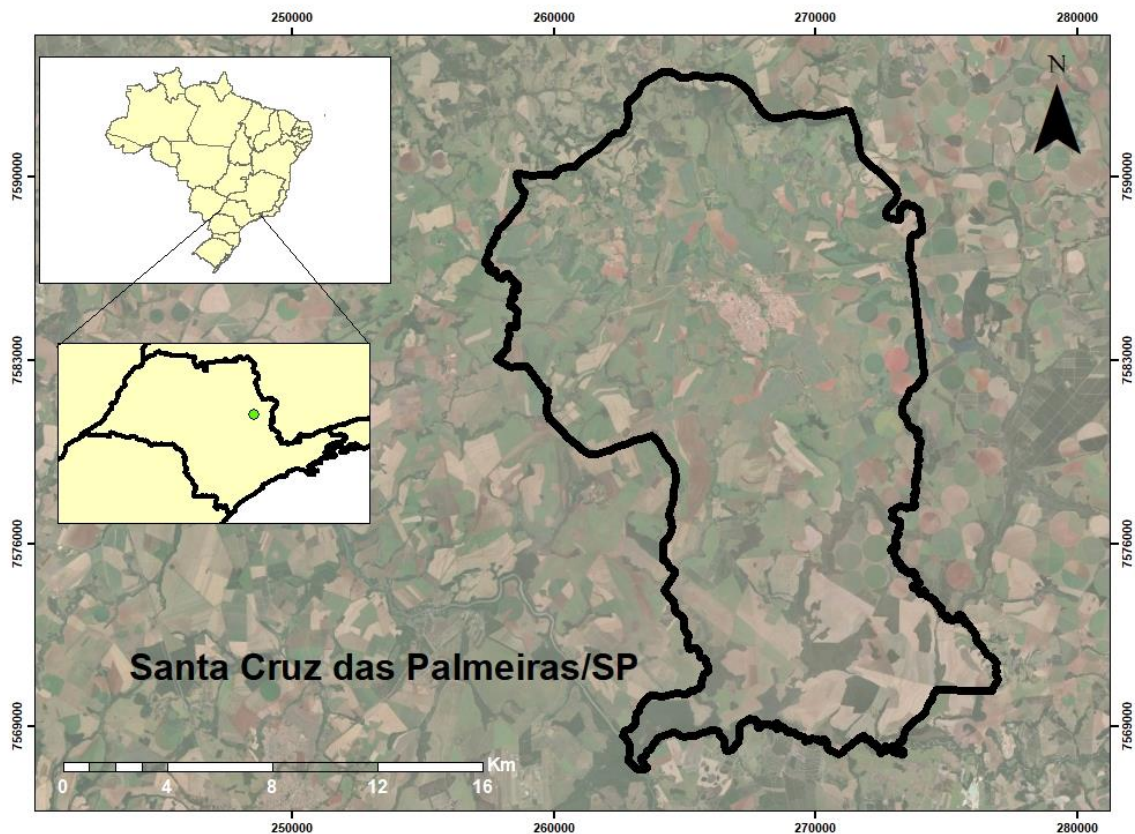
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

Este capítulo apresenta uma breve contextualização da área de estudo com relação a sua localização e aspectos pedológicos.

A fazenda estudada está localizada no município de Santa Cruz das Palmeiras, estado de São Paulo (Figura 2), na região Sudeste do Brasil (IBGE, 2008), nas coordenadas $21^{\circ}49'36''$ S e $47^{\circ}15'03''$ W com altitude de 644 m (SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS, 2018). As principais atividades econômicas do município são constituídas pela produção agrícola com destaque para lavouras de cana-de-açúcar, laranja e café.

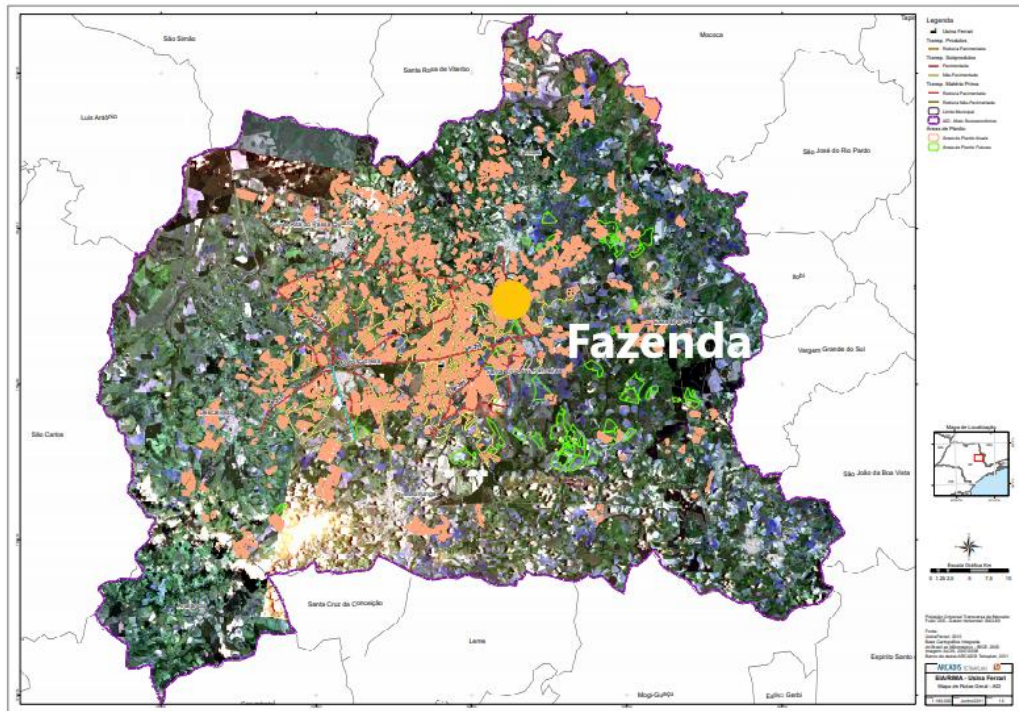
Figura 2. Localização do município de Santa Cruz das Palmeiras, SP



Fonte: (SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS, 2018)

A área estudada dentro da fazenda (Figura 3), é uma das áreas destinadas pela usina para aplicação da vinhaça. Esta área é dividida em glebas ou talhões.

Figura 3. Localização da Fazenda no município de Santa Cruz das Palmeiras



Fonte: adaptado (SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS, 2018)

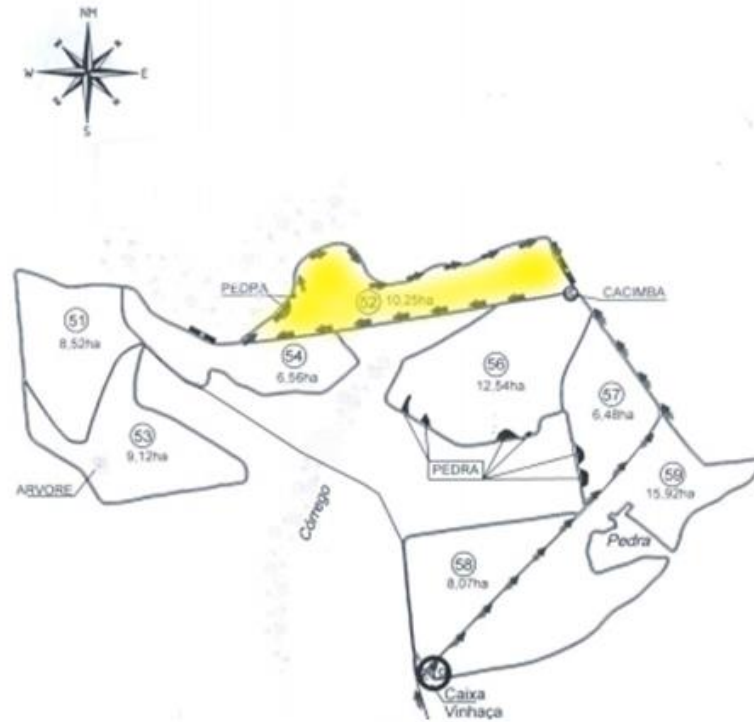
As glebas ou talhões de números 28, 52, 65, 83 e 96 (Figuras 4, 5, 6, 7 e 8) foram utilizadas para avaliação temporal dos dados, pois tiveram fertirrigação em pelo menos três anos do período entre 2012 e 2017, que foi o período de estudo dos PAVs apresentados.

Figura 4. Glebas da área avaliada com destaque para a gleba 28



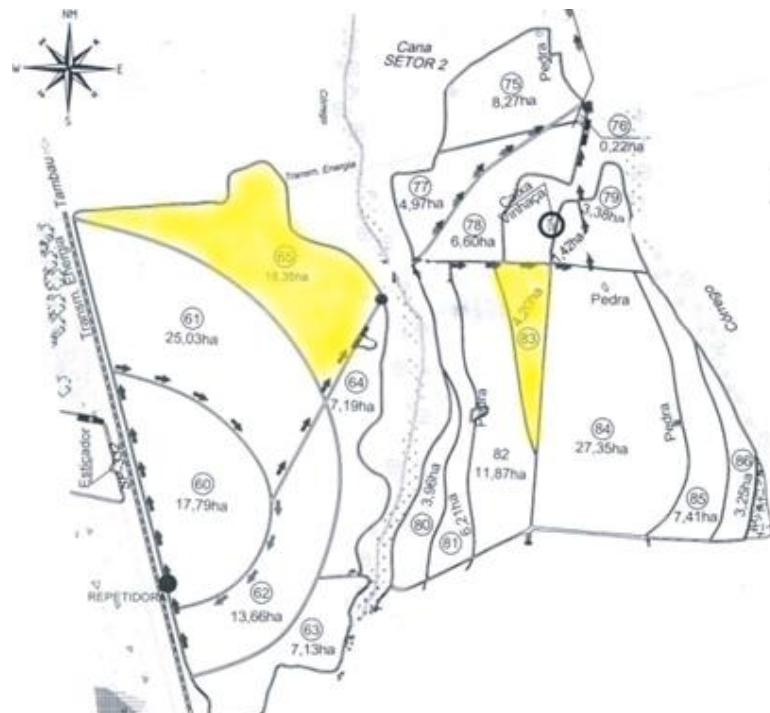
Fonte: adaptado (PAVs fornecida pela usina, 2016)

Figura 5. Glebas da área avaliada com destaque para a gleba 52



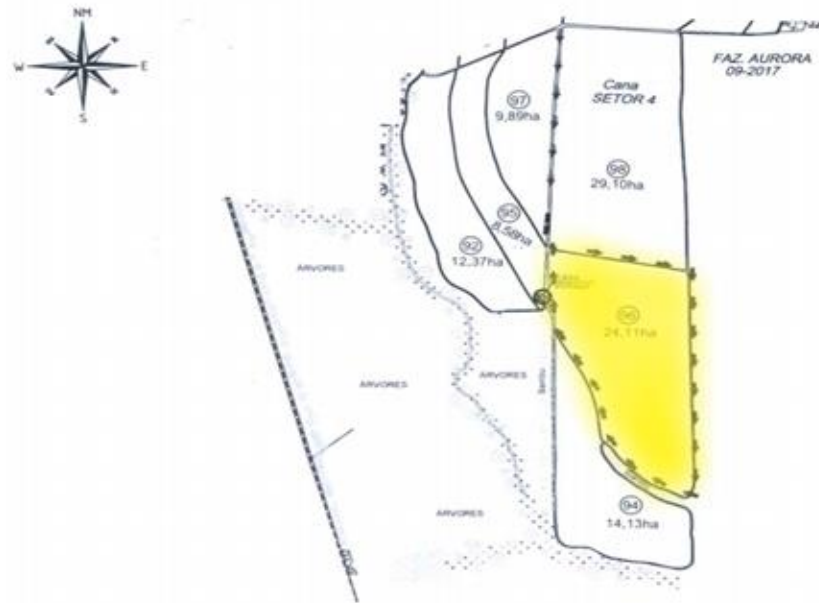
Fonte: adaptado (PAVs fornecida pela usina, 2016)

Figura 6. Glebas da área avaliada com destaque para as glebas 65 e 83



Fonte: adaptado (PAVs fornecida pela usina, 2016)

Figura 7. Glebas da área avaliada com destaque para a gleba 96



Fonte: adaptado (PAVs fornecida pela usina, 2016)

Figura 8. Glebas da área avaliada (sem destaque)

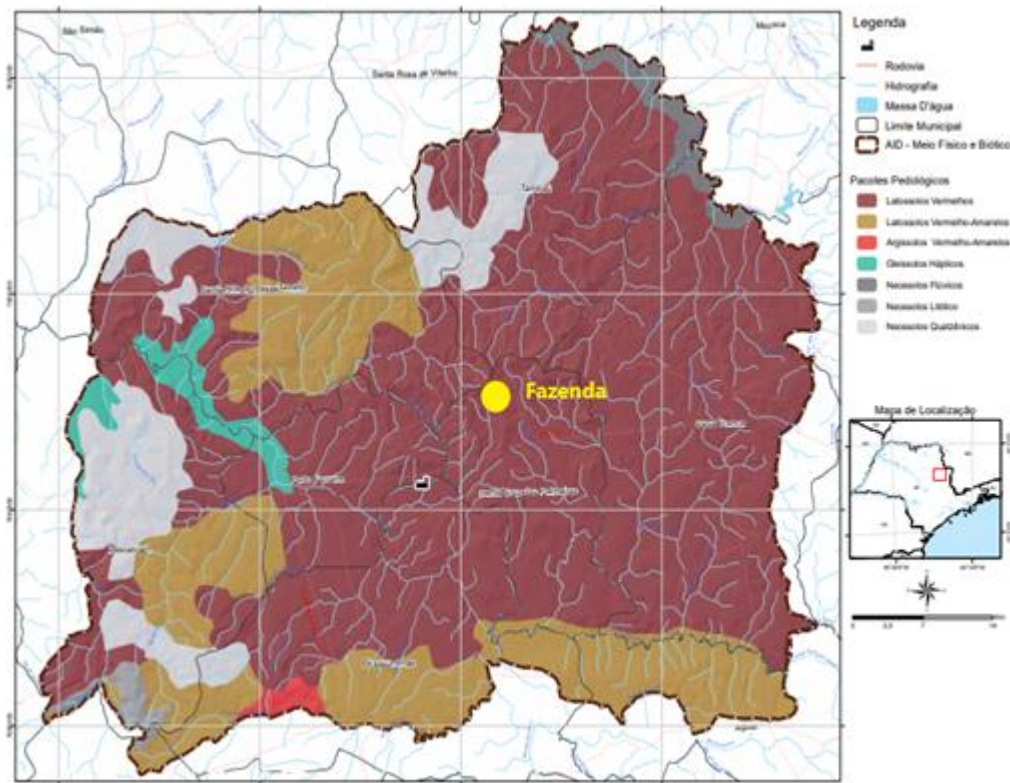


Fonte: adaptado (PAVs fornecida pela usina, 2016)

4.2 Caracterização de solo da região da fazenda estudada

O tipo de solo da área estudada (Figura 9) é o latossolo vermelho (ARCADIS TETRPLAN, 2011). Este tipo de solo apresenta elevada porosidade sendo bom para retenção de água. Suas características químicas, no entanto, exigem correções e adubação para melhor fertilidade (SOUZA; LOBATO, 2005).

Figura 9. Pedologia no entorno da fazenda estudada



Fonte: adaptado (ARCADIS TETRPLAN, 2011)

4.3 Planos de Aplicação de Vinhaça

Para o presente estudo, foram usados os Planos de Aplicação de Vinhaça referentes aos anos de 2012 a 2017 da usina geradora deste efluente, cedidos pela CETESB do município de Mogi Guaçu-SP. A partir destes PAVs foram realizadas análises temporais dos resultados químicos obtidos.

As vinhaças apresentadas nos PAVs e utilizadas na fertirrigação da área estudada, foram armazenadas em três tanques abertos, revestidos com geomembranas de PEAD

(polietileno de alta densidade) de 2 mm de espessura e misturadas com as águas residuárias. As capacidades dos tanques são 2200 m³, 2000 m³ e 1000 m³, o primeiro na área industrial e os outros dois na área agrícola da usina.

4.4 Dados da fertilidade do solo

Os PAVs apresentados da fazenda estudada têm dados de dezoito glebas diferentes, porém foram analisados dados de cinco glebas no intervalo de 2012 a 2017. As glebas analisadas neste estudo receberam fertirrigação em três anos ou mais, permitindo um comparativo temporal dos dados e avaliações dos mesmos. Foram estudadas as glebas: 28 (tamanho 6,91 ha) com dados em 2012, 2014 e 2016; gleba 52 (tamanho 10,25 ha) com dados em 2014, 2015 e 2016; gleba 65 (tamanho 18,35 ha) com dados em 2012, 2014, 2015 e 2016; gleba 83 (tamanho 4,20 ha) com dados em 2013, 2014 e 2015 e gleba 96 (tamanho 24,11 ha) com dados em 2012, 2013 e 2014 (Tabela 1).

Tabela 1. Glebas utilizadas para avaliação temporal dos dados fertilidade

Ano análise	Gleba 28	Gleba 52	Gleba 65	Gleba 83	Gleba 96
2012	X		X		X
2013				X	X
2014	X	X	X	X	X
2015		X	X	X	
2016	X	X	X		
2017*					

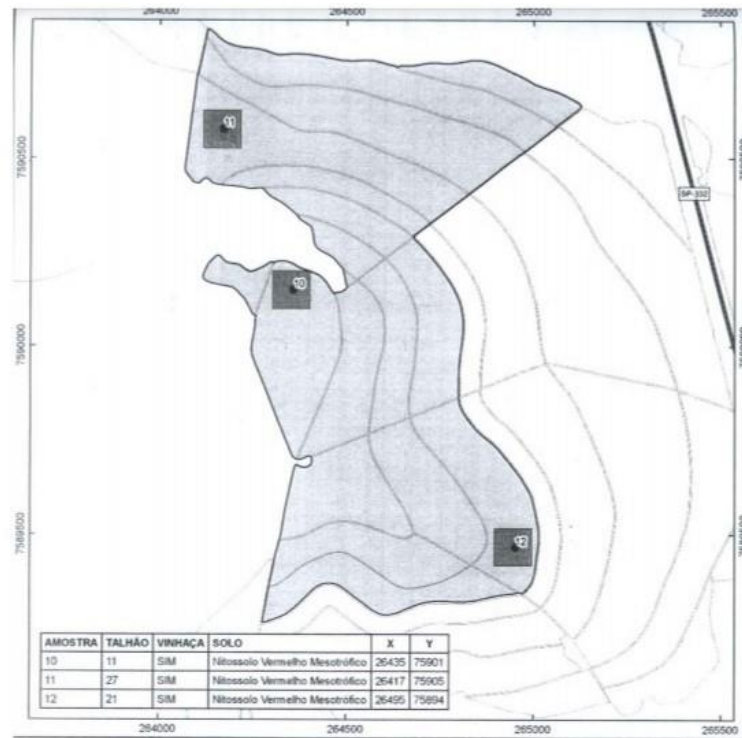
* O ano de 2017 apresenta 3 amostras, porém, sem identificação de gleba.

Fonte: (Autor, 2020)

4.5 Dados ambientais do solo

Outros dados utilizados nas análises deste trabalho foram as amostras de solo coletadas em 2016 apresentadas nos PAVs da usina, com dados utilizados nas análises ambientais. Na Figura 10 pode-se observar as áreas de coleta destas amostras do solo, sendo a amostra 10 coletada na gleba 11, a amostra 11 coletada na gleba 27 e a amostra 12 coletada na gleba 21.

Figura 10. Áreas de coleta de amostras do solo em 2016 pela usina nas glebas 11, 27 e 21



Fonte: adaptado (PAV, 2016)

Também foram analisados dados ambientais do solo de duas amostras de campo coletadas em 2018 na área de estudo (Figura 11), sendo amostras P1 na gleba 65 e P2 na gleba 75, como mostra a Figura 11, com coletas feitas em 30 cm e 100 cm de profundidade.

Figura 11. Área das glebas coletadas das amostras de 2018 (P1 e P2)



Fonte: (GALDEANO, 2019)

4.6 Parâmetros da qualidade ambiental e análises

Os parâmetros químicos que constam na portaria P4.231 da CETESB, fornecem os parâmetros para análise e caracterização ambiental do solo, da vinhaça e fertilidade solo conforme Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros para análise da vinhaça, fertilidade e caracterização ambiental do solo

Vinhaça - Norma Técnica P4.231	Solo - Parâmetros de Fertilidade	Caracterização ambiental solo
pH	Matéria Orgânica (g.dm ⁻³)	Antimônio (Sb)
Sólidos Suspensos Totais (SST)	pH	Arsênio (As)
Dureza ou alcalinidade total	Potássio K ⁺	Bário (Ba)
Nitrogênio nitrato NO ₃ ⁻	Sódio Na ⁺	Cádmio (Cd)
Nitrogênio nitrito NO ₂ ⁻	Cálcio Ca ²⁺	Chumbo (Pb)
Nitrogênio amoniacal NH ₃	Magnésio Mg ²⁺	Cobalto (Co)
Nitrogênio Kjeldhal	Alumínio Al ³⁺	Cobre (Cu)
Sódio Na ⁺	Hidrogênio e Alumínio H + Al	Cromo (Cr)
Cálcio Ca ²⁺	Hidrogênio H ⁺	Mercúrio (Hg)
Potássio K ⁺	Soma de bases (SB)	Molibdênio (Mo)
Sulfato SO ₄	CTC***	Níquel (Ni)
Fósforo P _{Total}	Saturação de Al - m%	Sêlenio (Se)
DBO *	Saturação de Bases - V%	Zinco (Zn)
DQO**		VOC****
		SVOC*****

* DBO - Demanda bioquímica de oxigênio

** DQO - Demanda química de oxigênio

*** CTC - Capacidade de troca catiônica

**** VOC - Composto orgânico volátil

***** SVOC - Composto orgânico semivolátil

Fonte: adaptado (CETESB, 2015)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Parâmetros químicos de avaliação da vinhaça aplicada

Os parâmetros para a caracterização química das vinhaças da usina utilizadas na fertirrigação das glebas avaliadas, compilados dos PAV's de 2012 a 2017, foram apresentados na Tabela 3. Os dados apresentados nos anos de 2013 e 2016 foram as médias dos valores das duas amostras de vinhaças apresentadas nos PAVs para estes anos. Também foram apresentados, para comparações, os valores dos dados de FUESS (2013), que utilizou vinhaça da mesma usina com análises realizadas em 2010.

Tabela 3. Resultados Analíticos da Vinhaça utilizada na fertirrigação da área estudada

Parâmetro	Unidade	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Fuess (2013)
pH	---	4,38	4,03	4,62	6,07	4,02	4,9	4,59
NO ³⁻	mg.L ⁻¹	3,429	17,1	<0,01	7,811	8,55	< 1,140	55,00 ± 5,00
NO ²⁻	mg.L ⁻¹	<0,012	4,5	3,63	<0,15	0,225	< 0,030	2,25 ± 0,05
NH ₃	mg NH ₃ - N.L ⁻¹	2,83	1,13	...	12,68	14,76	12,18	87,50 ± 7,50
N ^{Kjeldahl}	mg NH ₃ - N.L ⁻¹	153,44	136,64	9,52	117	215,35	144,5	1.130,50
Na ⁺	mg.L ⁻¹	10,652	37,5	36,3	<25	6,465	58	10,64
Ca ²⁺	mg.L ⁻¹	493,8	397,3	10,19	658,25	801,5	54,9	458,4
K ⁺	mg.L ⁻¹	200,6	1988,5	8,8	2267	4047,5	312	1.330,40 ± 0,10
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹	233,8	171,77	3,96	342,5	305,5	...	235,39
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	1087,12	1606,19	<25,0	1752,37	1744,5	438	3.701 ± 1.154,70
DBO	gDBO ₅ .L ⁻¹	3,07	3,13	2,32	8,18	9,22	...	14,40 ± 0,53
DQO	gO ₂ .L ⁻¹	7,37	11,39	5,68	19,97	28,27	...	24,63 ± 0,55
R _{DQO/DBO}	---	2,4	3,72	2,45	2,44	3,07	...	1,71
Dureza total	mgCaCO ₃ .L ⁻¹	2196	1699,37	41,75	3054,1	3259	...	137

--- Não se aplica

... Dado não disponível

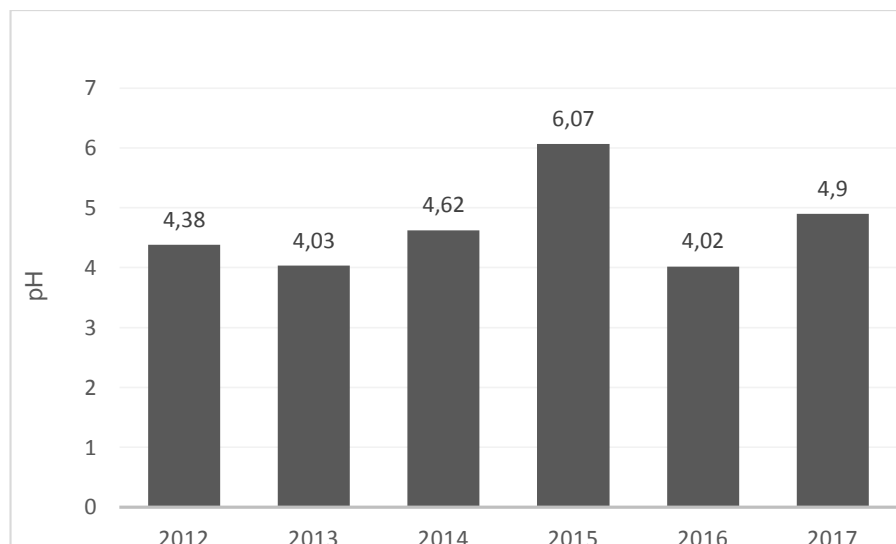
(1);(2);(3) Número de amostras

Fonte: (Autor, 2020)

Os resultados da caracterização físico-química da vinhaça nos PAVs de 2012 a 2017 fornecem dados de pH, cátions de base (K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), $R_{DQO/DBO}$, sódio (Na^+), dureza total e alguns ânions, e foram comparados com os valores referenciados por Fuess (2013) no ano de 2010 para a vinhaça da mesma usina utilizada na área de estudo. O estudo destes valores é importante, pois a fertirrigação com vinhaça ao longo dos anos pode acarretar alterações na fertilidade do solo.

Na análise do pH das vinhaças utilizadas, verificou-se que os valores encontrados foram ácidos, com média de 4,67, valor muito próximo do apresentado por FUESS (2013). Estes valores ácidos de pH são característicos deste efluente devido ao emprego de ácido sulfúrico nas dornas de fermentação como agente bactericida (RODRIGUES, 2016). O valor encontrado que mais se aproximou da neutralidade foi o de 6,07 no ano de 2015, valor mais adequado para solos agricultáveis (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007) (Figura 12).

Figura 12. Valores de pH das vinhaças aplicadas por ano

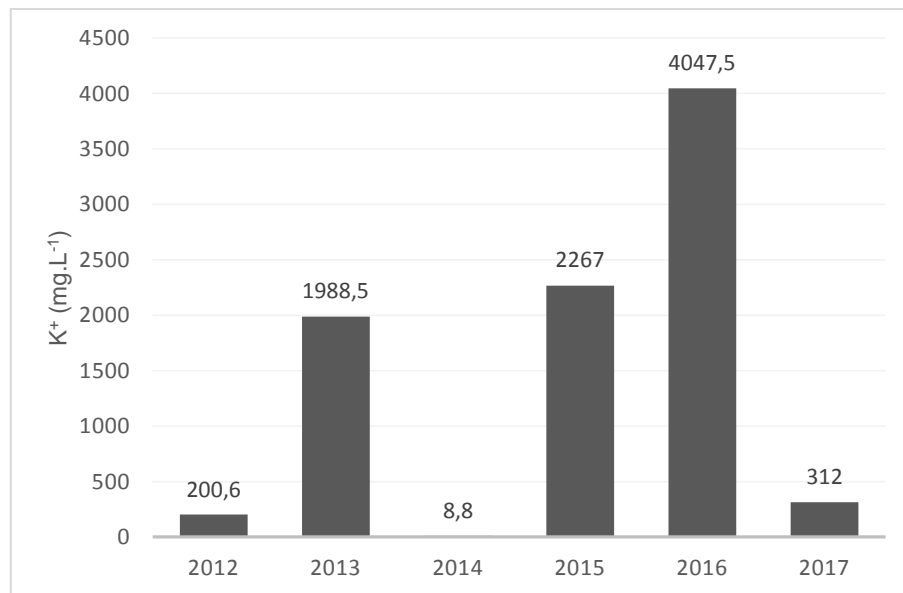


Fonte: (Autor, 2020)

A concentração de potássio (K^+) teve um valor médio de $1.470,73 \text{ mg.L}^{-1}$ nas amostras obtidas entre 2012 a 2017, valor próximo ao apresentado por Fuess (2013) e que comprovam que a vinhaça foi uma excelente fonte deste nutriente nas lavouras de cana-de-açúcar. Apesar da média de K^+ ter atingido um valor excelente para reposição deste nutriente, os valores anuais apresentaram muitas diferenças com valores baixos em 2012 ($200,60 \text{ mg.L}^{-1}$), em 2014 ($8,80 \text{ mg.L}^{-1}$) e em 2017 ($312,00 \text{ mg.L}^{-1}$) e elevados em 2013 ($1.988,50 \text{ mg.L}^{-1}$), em 2015 ($2.267,00 \text{ mg.L}^{-1}$) e em 2016 ($4.047,50 \text{ mg.L}^{-1}$).

A baixa concentração do potássio (K^+) na vinhaça de 2014 veio acompanhada da baixa concentração dos demais cátions de base cálcio (Ca^{2+}) valor $10,19 \text{ mg.L}^{-1}$ e magnésio (Mg^{2+}) valor $3,96 \text{ mg.L}^{-1}$ o que pode ter decorrido da diluição da vinhaça por outras águas residuais do processo da produção do álcool. O valor médio de K^+ encontrado nas vinhaças utilizadas no período do estudo, sinalizou o valor do *kvi* utilizado no cálculo do volume de vinhaça aplicada (Equação 1), com a conversão da unidade de medida de mg.L^{-1} para $\text{kgK}_2\text{O.m}^{-3}$ (Figura 13).

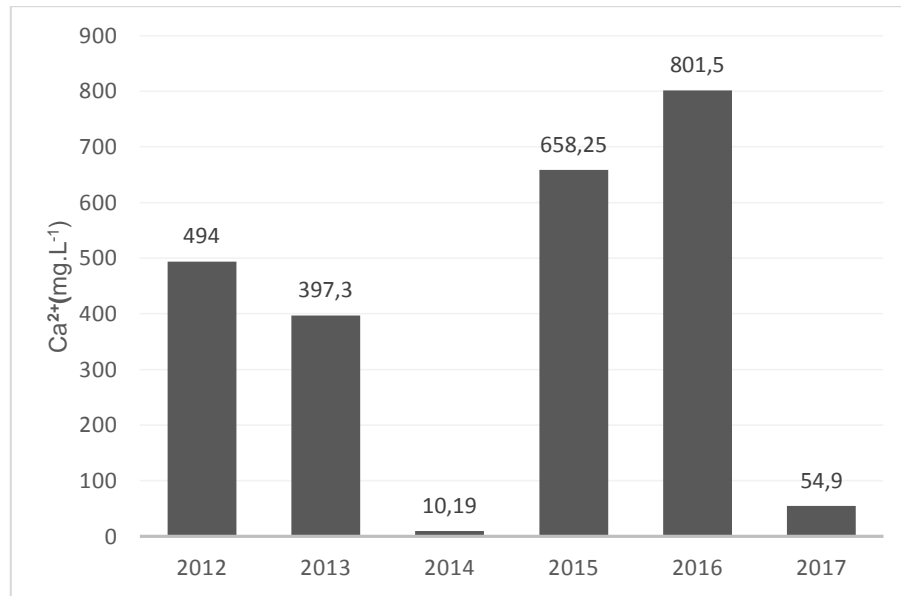
Figura 13. Valores de K^+ das vinhaças aplicadas por ano



Fonte: (Autor, 2020)

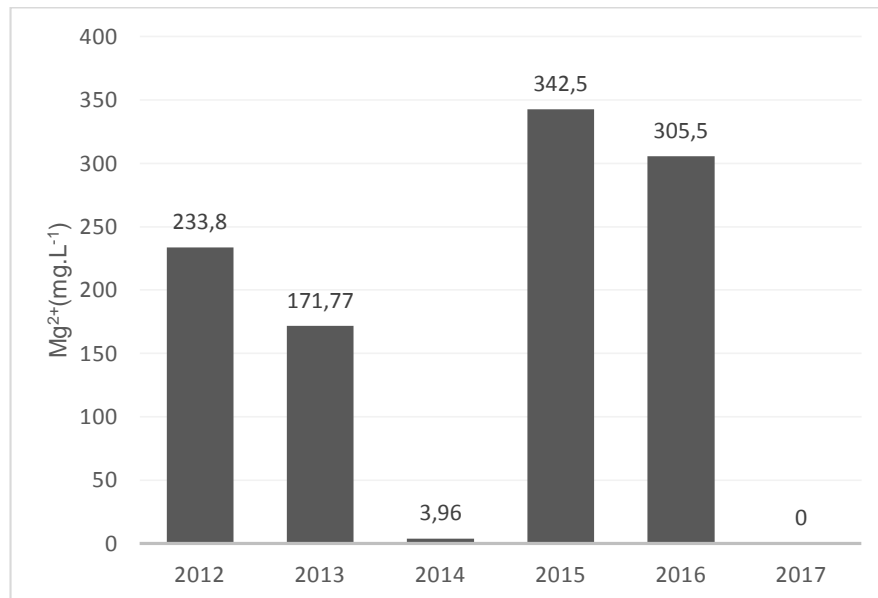
As concentrações de Ca^{2+} (Figura 14) e de Mg^{2+} (Figura 15) apresentaram um perfil de concentração muito parecido com o de K^+ , com altas e baixas concentrações nos mesmos anos, sendo em 2014 a menor concentração de Ca^{2+} ($10,19 \text{ mg.L}^{-1}$) e de Mg^{2+} ($3,96 \text{ mg.L}^{-1}$). A concentração média de Ca^{2+} foi de $402,69 \text{ mg.L}^{-1}$ e de Mg^{2+} foi de $176,255 \text{ mg.L}^{-1}$. A amostra de 2017 não apresentou valor da concentração de Mg^{2+} . Estes valores encontrados estão próximos dos apresentados por Fuess (2013). Verificou-se que a utilização de vinhaça na fertirrigação eleva as concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} , diminuindo necessidade de calagem e contribuindo para aumento pH do solo.

Figura 14. Valores de Ca^{2+} das vinhaças aplicadas por ano



Fonte: (Autor, 2020)

Figura 15. Valores de Mg^{2+} das vinhaças aplicadas por ano

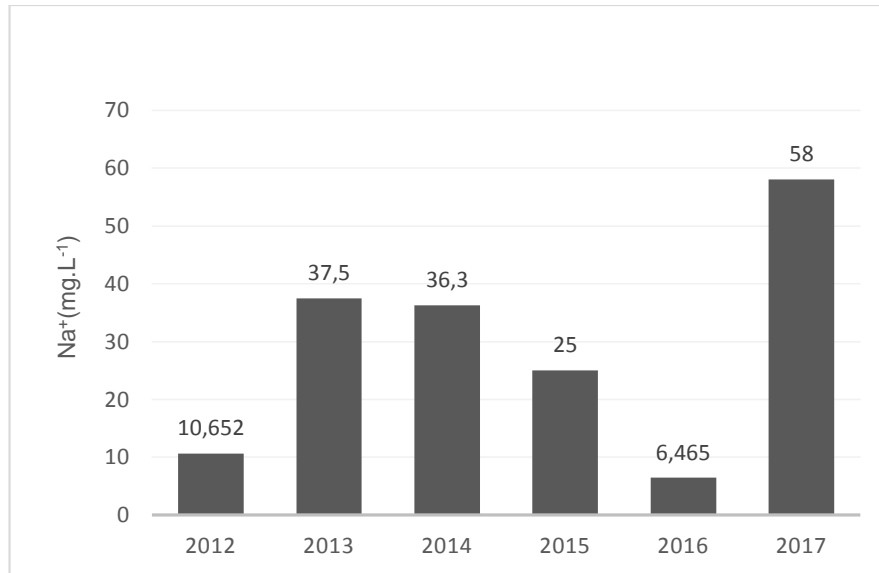


Fonte: (Autor, 2020)

Na avaliação da concentração de sódio (Na^+) da vinhaça, foram observados valores dentro dos recomendados para o solo (abaixo 25mg.L^{-1}) nos anos de 2012 ($10,652\text{ mg.L}^{-1}$), 2015 (25 mg.L^{-1}) e 2016 ($6,465\text{ mg.L}^{-1}$) e valores elevados nos anos de 2013 ($37,5\text{ mg.L}^{-1}$), 2014 ($36,3\text{ mg.L}^{-1}$) e 2017 (58 mg.L^{-1}). Estes valores elevados podem levar o solo a uma sodificação e aumento da condutividade elétrica na solução do solo. Os valores elevados de sódio são prejudiciais ao solo e diminuem a produtividade. O processo de calagem pode ser

usado nesta situação, permitindo a troca do Ca^+ pelo Na^+ trocável, tornando seus níveis mais baixos (BARROS et al. 2004) (Figura 16).

Figura 16. Valores de Na^+ das vinhaças aplicadas por ano



Fonte: (Autor, 2020)

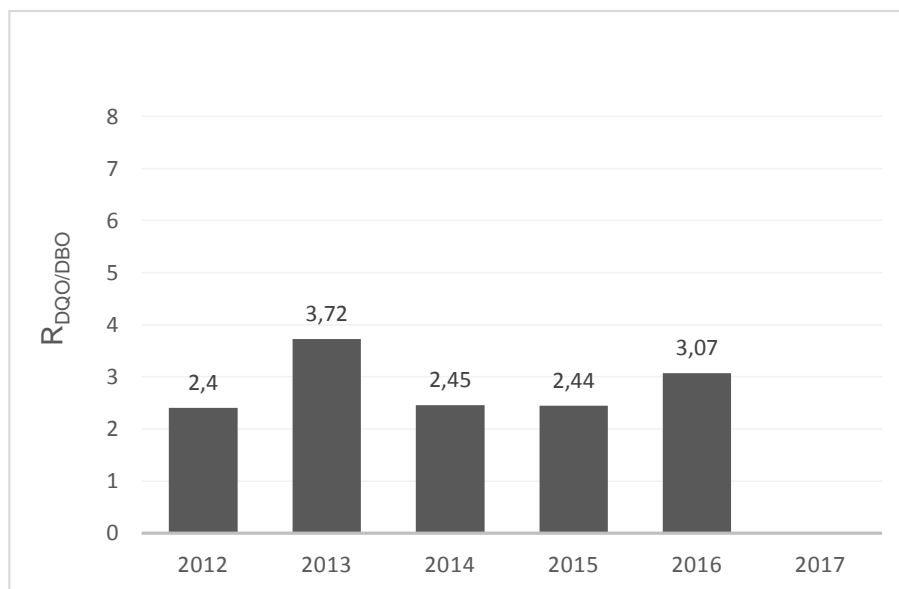
Quanto aos valores de $R_{DQO/DBO}$, Fuess (2013) explica que estes são indicadores da quantidade de MO encontrada nestes efluentes e que as faixas de valores indicam elevada ou baixa fração de MO biodegradável (Tabela 4). Foram encontrados valores na faixa Baixa nos anos de 2012 (2,40), 2014 (2,45) e 2015 (2,44), onde a fração biodegradável da MO foi elevada. O valor de 2016 (3,07) estava na faixa intermediária e apresentou concentração parcialmente biodegradável. Já o valor de 2016 (3,72) apresentou escassez de MO biodegradável, com maior fração inerte. A média dos valores no período analisado (2,81) foi maior que a encontrada por Fuess (2013) de 1,71, porém estava na faixa intermediária da relação DQO/DBO. Os valores disponibilizados pelos PAVs não forneceram dados para o ano 2017 (Figura 17). Os valores de Na^+ (média 28,986 mg.L⁻¹) encontrados mostraram que a vinhaça utilizada disponibilizou MO ao solo, melhorando as condições de retenção de Cátions de Base e proporcionando elevação da CTC (capacidade de troca catiônica) do solo.

Tabela 4. Relação DQO/DBO

Relação DQO/DBO (RDQO/DBO)	Características da água residuária
Baixa (RDQO/DBO < 2,5)	<ul style="list-style-type: none"> • Fração biodegradável é elevada; • Indicação tratamento biológico
Intermediária (2,5 < RDQO/DBO < 3,5)	<ul style="list-style-type: none"> • Fração biodegradável não é elevada; • Estudos de tratabilidade para verificar a viabilidade do tratamento biológico.
Elevada (RDQO/DBO > 3,5)	<ul style="list-style-type: none"> • Fração inerte é elevada; • Possível indicação de tratamento físico-químico.

Fonte: adaptado Fuess (2013)

Figura 17. Valores de Relação (DQO/DBO) das vinhaças aplicadas por ano

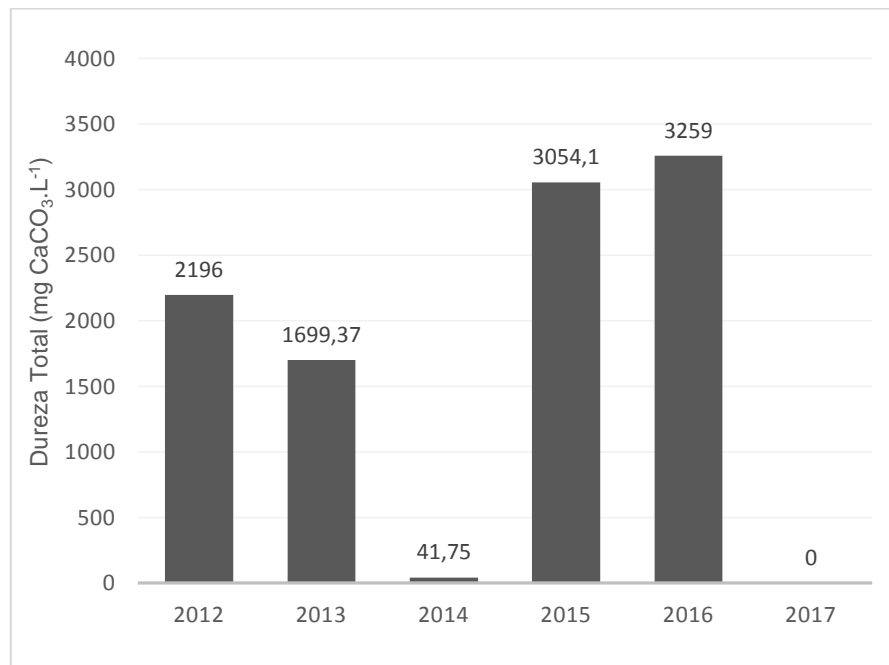


Fonte: (Autor, 2020)

Também foram analisados valores de dureza total das vinhaças. A dureza indica a concentração de cátions multivalentes em soluções aquosas. Os cátions mais frequentemente associados à dureza são os de cálcio e magnésio (BRASIL, 2014). A dureza é expressa em mg.L^{-1} de carbonato de cálcio (CaCO_3) e pode ser classificada em mole ou branda: $< 50 \text{ mg.L}^{-1}$ de CaCO_3 ; dureza moderada: entre 50 mg.L^{-1} e 150 mg.L^{-1} de CaCO_3 ; dura: entre 150 mg.L^{-1} e 300 mg.L^{-1} de CaCO_3 ; e muito dura: $>300 \text{ mg.L}^{-1}$ de CaCO_3 . Os valores apresentados pelos PAVs, com exceção de 2014, apresentaram valores acima de $300 \text{ mgCaCO}_3.\text{L}^{-1}$ considerados

de grande dureza (FUESS, 2013). A média encontrada foi de $1708,75 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, valor muito elevado em comparação com o apresentado por Fuess (2013). Estes valores sinalizam a precipitação de Ca^+ (Figura 18).

Figura 18. Valores de Dureza das vinhaças aplicadas por ano



Fonte: (Autor, 2020)

5.2 Parâmetros químicos para caracterização da fertilidade do solo

Os PAVs apresentados da fazenda estudada têm dados de dezoito glebas diferentes, porém, foram analisados dados de 5 glebas no intervalo de 2012 a 2017. As glebas analisadas neste estudo receberam fertirrigação em três anos ou mais, permitindo um comparativo temporal dos dados de fertilidade e avaliações relacionadas. Foram usadas as glebas: 28 (tamanho 6,91 ha) com dados em 2012, 2014 e 2016; gleba 52 (tamanho 10,25 ha) com dados em 2014, 2015 e 2016; gleba 65 (tamanho 18,35 ha) com dados em 2012, 2014, 2015 e 2016; gleba 83 (tamanho 4,20 ha) com dados em 2013, 2014 e 2015 e gleba 96 (tamanho 24,11 ha) com dados em 2012, 2013 e 2014 (Tabela 21 - Anexo).

Foram analisados os valores das concentrações de potássio e da CTC do solo de cada gleba, que forneceram os dados para a avaliação das quantidades de vinhaça a serem aplicadas na fertirrigação. Estes dados são utilizados para que as concentrações aplicadas estejam dentro dos valores previstos pela Norma P4.231 da CETESB. Esta concentração indicada pela norma, sinaliza valor de potássio do solo menor que 5% da CTC. Quando esse valor for atingido, a aplicação fica restrita à reposição de K^+ em função da extração média pela cultura, que é de 185 kg de K_2O por hectare por corte na cana-de-açúcar. As glebas analisadas tiveram um valor maior que 5% CTC na gleba 65 em 2015, que definiu a quantidade baixa da vinhaça aplicada posteriormente (Tabela 5).

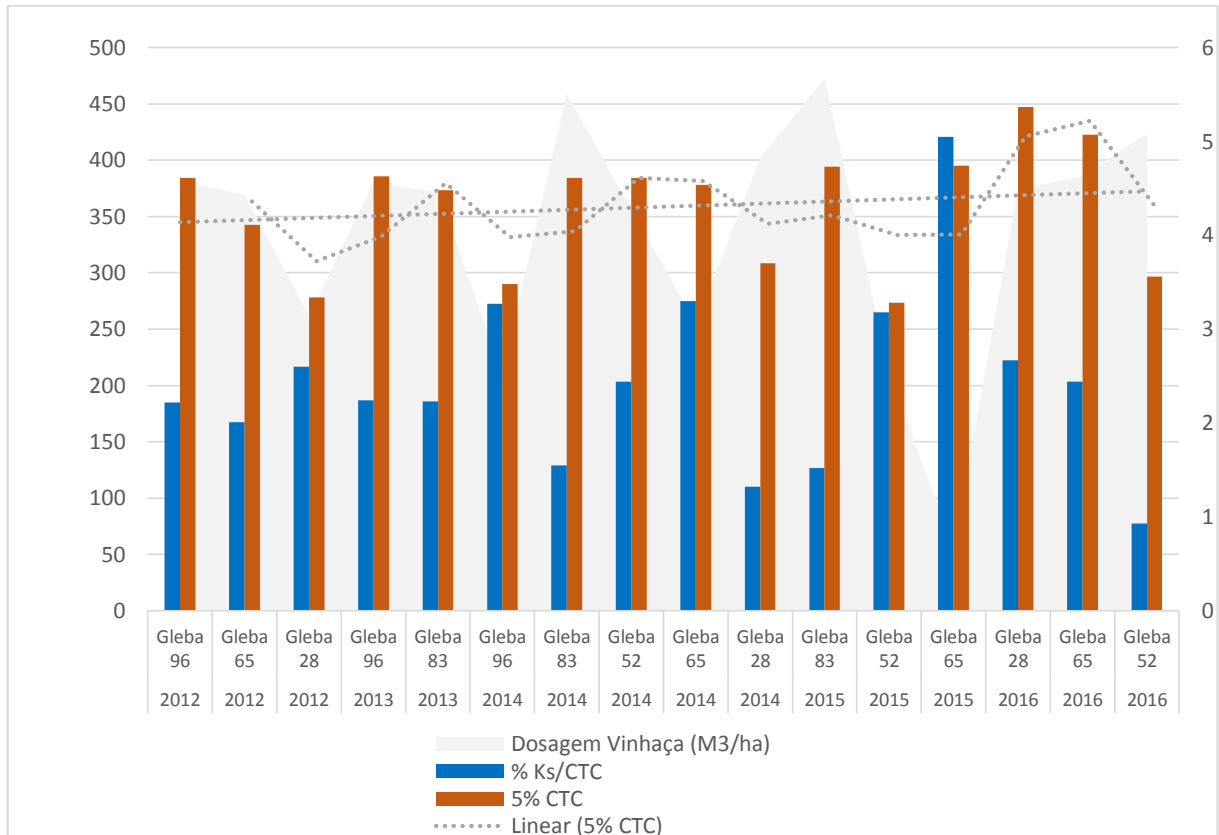
Tabela 5. Cálculos da dosagem de vinhaça utilizando a Equação 1

Ano	Talhão	Ks (cmol/dm ³)	CTC (cmol/dm ³)	Kvi (kg/m ³)	Dosagem Vinhaça (m ³ /ha)	% Ks/CTC	5% CTC
2012	Gleba 96	0,205	9,223	3	381,34	2,22	4,61
2012	Gleba 65	0,165	8,228	3	369,17	2,01	4,11
2012	Gleba 28	0,174	6,684	3	261,6	2,6	3,34
2013	Gleba 96	0,208	9,268	3	380,41	2,24	4,63
2013	Gleba 83	0,2	8,961	3	371,23	2,23	4,48
2014	Gleba 96	0,228	6,966	3	211,8	3,27	3,48
2014	Gleba 83	0,143	9,221	3	458,59	1,55	4,61
2014	Gleba 52	0,225	9,223	3	356,38	2,44	4,61
2014	Gleba 65	0,3	9,091	3	254,55	3,3	4,54
2014	Gleba 28	0,098	7,406	3	401,5	1,32	3,7
2015	Gleba 83	0,144	9,461	3	472,32	1,52	4,73
2015	Gleba 52	0,209	6,573	3	210,99	3,18	3,28
2015	Gleba 65	0,48	9,497	3	55,24	5,05	4,74
2016	Gleba 28	0,077	6,246	3	355,32	1,23	3,12
2016	Gleba 65	0,287	10,741	3	373,73	2,67	5,37
2016	Gleba 52	0,312	9,623	3	272,77	3,24	4,81

Fonte: (Autor, 2020)

A análise dos valores encontrados em cada gleba foi avaliada a seguir (Figura 19).

Figura 19. Gráfico comparativo dos valores de %Ks/CTC, 5% CTC e volume de vinhaça



Fonte: (Autor, 2020)

Na Figura 19 foi feito uma comparação temporal do volume de vinhaça aplicada com os valores de %Ks/CTC e o valor de 5% CTC para cada gleba em cada ano, mostrando que os valores aplicados, embora levem em consideração vários parâmetros e dados, são definidos pelos valores do potássio (K^+) da vinhaça, do solo e do valor da CTC. Os gráficos apresentados nas figuras 20, 22, 24, 26 e 28, mostram esta comparação: quanto mais distante estiver o valor de %Ks/CTC do valor de 5% CTC com o valor de 5% CTC sendo o maior, maior será o volume de vinhaça aplicada, e quanto mais os valores estiverem próximos com o valor de 5% CTC sendo o maior valor, menor será o volume de vinhaça aplicada. Quando estes valores se encontram ou invertem no gráfico, sendo então o valor de 5% CTC igual ou menor que o valor de %Ks/CTC, o valor aplicado de vinhaça será restrito a 185 kg de K_2O por hectare, ou seja, pelo tamanho da gleba em hectares (CETESB, 2015), como aconteceu com o volume aplicado na gleba 65 no ano de 2015.

A gleba 28 apresenta dados nos anos de 2012, 2014 e 2016 fornecidos pelos PAVs da usina. Os dados apresentados a seguir permitem a análise temporal desta gleba (Tabelas 6 e 7).

Tabela 6. Análise de fertilidade do solo após fertirrigação de vinhaça da gleba 28

Ano	Unidade	2012	2014	2016
Gleba			28	
Matéria Orgânica	g.dm ⁻³	24	22	19
pH	----	5,2	5,3	4,7
Potássio - K ⁺	mmolc.dm ⁻³	1,74	0,98	0,77
Sódio Na ⁺	mmolc.dm ⁻³	0,08	0,06	0,05
Cálcio Ca ²⁺	mmolc.dm ⁻³	28,01	32,94	22,76
Magnésio Mg ²⁺	mmolc.dm ⁻³	7,01	13,08	8,88
Alumínio Al ³⁺	mmolc.dm ⁻³	0,21	0,2	0,75
Hidrogênio + Alumínio- H+ Al	mmolc.dm ⁻³	30	27	30
Soma de Bases - SB	mmolc.dm ⁻³	36,84	47,06	32,46
Capacidade de Troca Catiônica - CTC	mmolc.dm ⁻³	66,84	74,06	62,46
Saturação de Bases - V%	%	55,12	63,54	51,97
Saturação de Alumínio - m%	%	0,57	0,42	2,26
Vinhaça aplicada	m ³ .ha ⁻¹	261,60	401,50	355,32

Fonte: (Autor, 2020)

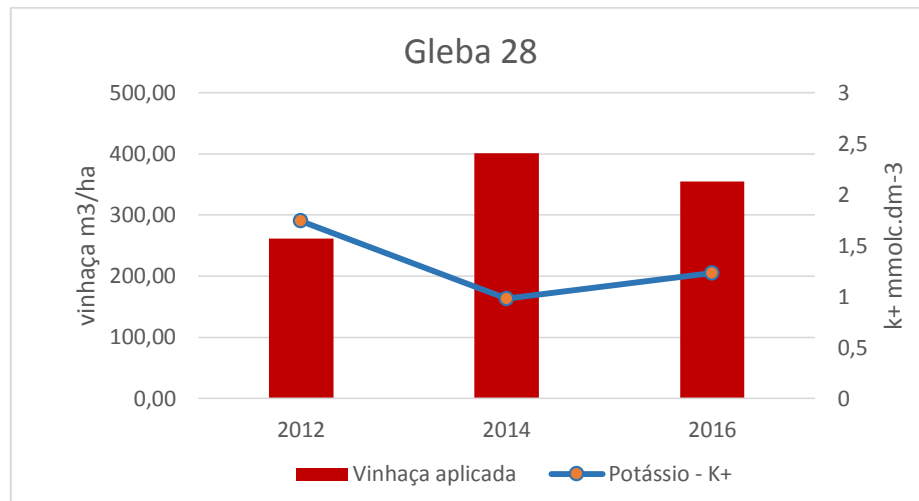
Tabela 7. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC para a gleba 28

Ano	Talhão	Dosagem Vinhaça (m³/ha)	% Ks/CTC	5% CTC
2012	Gleba 28	261,6	2,6	3,34
2014	Gleba 28	401,5	1,32	3,7
2016	Gleba 28	355,32	1,23	3,12

Fonte: (Autor, 2020)

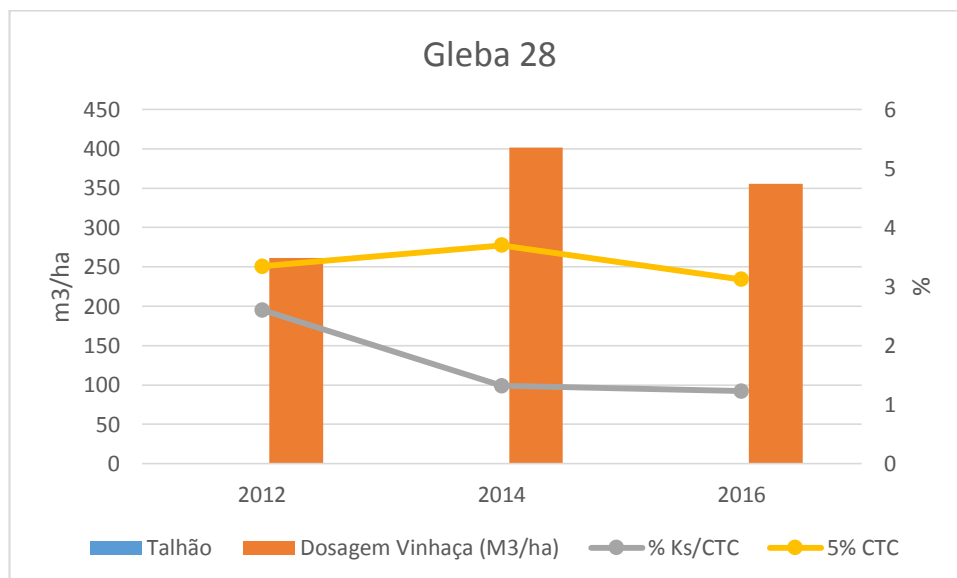
Foi possível analisar os valores da vinhaça aplicada na gleba 28 comparando com os valores K⁺ (Figura 20) e a dosagem de vinhaça aplicada na gleba 28 com parâmetros utilizados para cálculo deste volume (CETESB, 2015) (Figura 21).

Figura 20. Valores da vinhaça aplicada na gleba 28, comparando com os valores K^+



Fonte: (Autor, 2020)

Figura 21. Dosagem de vinhaça aplicada na gleba 28, com parâmetros para cálculo de volume



Fonte: (Autor, 2020)

Na dosagem da vinhaça aplicada na gleba 28, houve um aumento do volume entre os anos de 2012 para 2014 e uma diminuição do volume no ano de 2016. O valor da concentração de K^+ baixou de 2012 para 2014, justificando o aumento da aplicação da vinhaça em 2014, juntamente com dosagem baixa dos demais cátions de base, conforme análise da vinhaça da usina de 2014. Em 2016 a concentração de K^+ aumentou, diminuindo o volume aplicado neste ano. Os valores do pH na gleba 28 foram ácidos nos três anos analisados, sendo em 2016 o valor mais ácido para esta gleba 4,7. No valor de V% houve um aumento de 2012 (55,12%) para 2014 (63,54%), já que o m% diminuiu de 0,57% para 0,42%, e em 2016 uma queda de

V% (51,97%) e aumento de m% (2,26%) que aumentou juntamente com a acidez do solo neste ano, diminuindo a fertilidade (SERRANA, 2001), porém sem necessidade de correção de acidez do solo por apresentar valores $V > 50\%$ (BRITO, 2013). Verificou-se nas análises temporais para a gleba 28, que em 2016 este solo apresentou os dados com menores índices de fertilidade: maior m% e concentração de Al^{3+} , menores valores de V%, solo mais ácido e também uma menor quantidade de matéria orgânica (MO).

A gleba 52 apresenta dados nos anos de 2014, 2015 e 2016 fornecidos pelos PAVs da usina, para análise de fertilidade do solo após fertirrigação da vinhaça (Tabela 8) e valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC para a gleba 52 (Tabela 9).

Tabela 8. Análise de fertilidade do solo após fertirrigação da vinhaça da gleba 52

Ano	Unidade	2014	2015	2016
Gleba			52	
Matéria Orgânica	g.dm ⁻³	29	28	33
pH	----	5,1	5,3	5,3
Potássio - K ⁺	mmolc.dm ⁻³	2,25	2,09	3,12
Sódio Na ⁺	mmolc.dm ⁻³	0,06	0,07	0,06
Cálcio Ca ²⁺	mmolc.dm ⁻³	34,82	28,91	52,91
Magnésio Mg ²⁺	mmolc.dm ⁻³	13,1	9,66	18,14
Alumínio Al ³⁺	mmolc.dm ⁻³	0,42	0,63	0,17
Hidrogênio + Alumínio- H ⁺ Al	mmolc.dm ⁻³	42	25	22
Soma de Bases - SB	mmolc.dm ⁻³	50,23	40,73	74,23
Capacidade de Troca Catiônica - CTC	mmolc.dm ⁻³	92,23	65,73	96,23
Saturação de Bases - V%	%	54,46	61,97	77,14
Saturação de Alumínio - m%	%	0,83	1,52	0,23
Vinhaça aplicada	m ³ .ha ⁻¹	356,38	210,99	272,77

Fonte: (Autor, 2020)

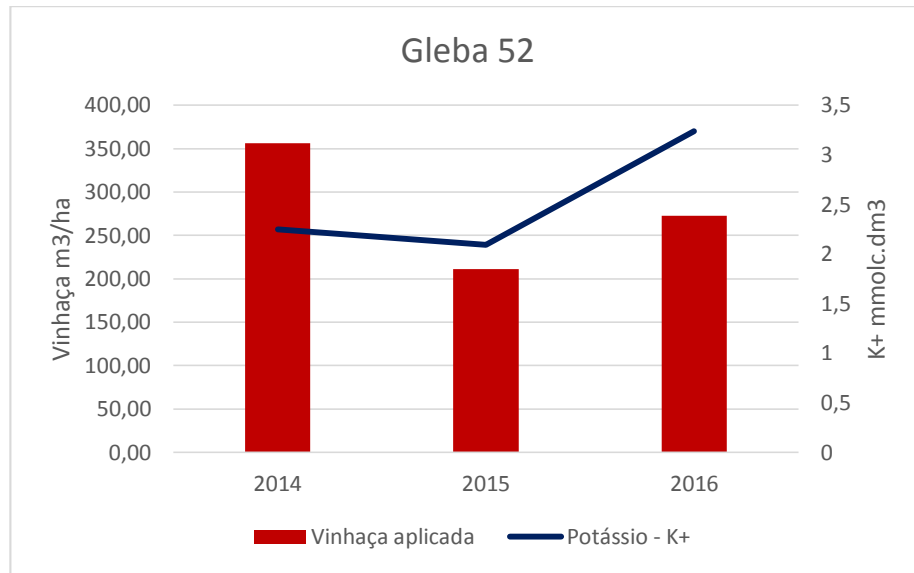
Tabela 9. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC para gleba 52

Ano	Talhão	Dosagem Vinhaça (m ³ /ha)	% Ks/CTC	5% CTC
2014	Gleba 52	356,38	2,44	4,61
2015	Gleba 52	210,99	3,18	3,28
2016	Gleba 52	272,77	3,24	4,81

Fonte: (Autor, 2020)

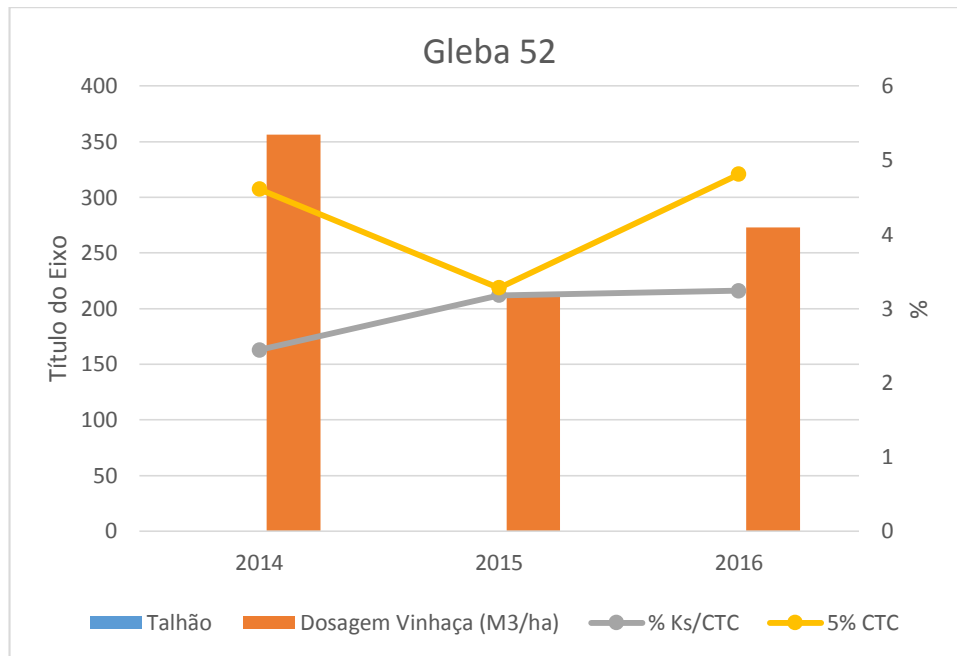
A Figura 22 mostrou os valores da vinhaça aplicada na gleba 52 comparando com os valores K⁺ e, na Figura 23, a dosagem da vinhaça aplicada também na gleba 52, com parâmetros utilizados para cálculo do volume aplicado (CETESB, 2015).

Figura 22. Valores da vinhaça aplicada na gleba 52, comparando com os valores K^+



Fonte: (Autor, 2020)

Figura 23. Dosagem da vinhaça aplicada na gleba 52, com parâmetros utilizados para cálculo



Fonte: (Autor, 2020)

Analisou-se os valores da vinhaça aplicada e o volume aplicado diminuiu de 2014 para 2015, ocasionado pelo valor do K^+ estar próximo de 5% CTC. Esta diminuição pode ter ocorrido também pelo aumento do Al^{3+} e de m%. De 2015 para 2016 o volume aplicado foi maior mesmo com os valores de K^+ elevados, pois o CTC também teve aumento. Ocorreu diminuição do Al^{3+} , bem como o pH se manteve em 5,3 como no ano anterior.

Avaliando os valores de V%, ocorreu um aumento anual com valores de 54,46% em 2014, 61,97% em 2015 e 77,14% em 2016, com diminuição de m%, aumentando assim a fertilidade do solo (BRITO, 2013; RONQUIM, 2010). Diferente da gleba 28, em 2016 o solo da gleba 52 apresentou aumento da fertilidade, com aumento da MO, da V% e dos cátions de base. Também ocorreu diminuição das concentrações de alumínio (Al^{3+}) e da m%.

A gleba 65 apresenta dados dos anos de 2012, 2014, 2015 e 2016 fornecidos pelos PAVs da usina, para análise da fertilidade do solo após fertirrigação da vinhaça da gleba 65 (Tabela 10) e os valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC também para a gleba 65 (Tabela 11).

Tabela 10. Análise de fertilidade solo, após fertirrigação da vinhaça da gleba 65

Ano	Unidade	2012	2014	2015	2016
Gleba		65			
Matéria Orgânica	g.dm ⁻³	31	27	33	35
pH	----	5,6	4,9	5,4	5,4
Potássio - K ⁺	mmolc.dm ⁻³	5,46	3	4,8	2,87
Sódio Na ⁺	mmolc.dm ⁻³	0,08	0,05	0,07	0,38
Cálcio Ca ²⁺	mmolc.dm ⁻³	41,91	33,22	40,78	60,76
Magnésio Mg ²⁺	mmolc.dm ⁻³	7,48	14,64	20,32	23,4
Alumínio Al ³⁺	mmolc.dm ⁻³	0,28	0,57	0,28	0,23
Hidrogênio + Alumínio- H+ Al	mmolc.dm ⁻³	28	40	29	20
Soma de Bases - SB	mmolc.dm ⁻³	54,93	50,91	65,97	87,41
Capacidade de Troca Catiônica - CTC	mmolc.dm ⁻³	82,93	90,91	94,97	107,41
Saturação de Bases - V%	%	66,24	56	69,46	81,38
Saturação de Alumínio - m%	%	0,5	1,11	0,42	0,26
Vinhaça aplicada	m ³ .ha ⁻¹	369,17	254,55	55,24	373,73

Fonte: (Autor, 2020)

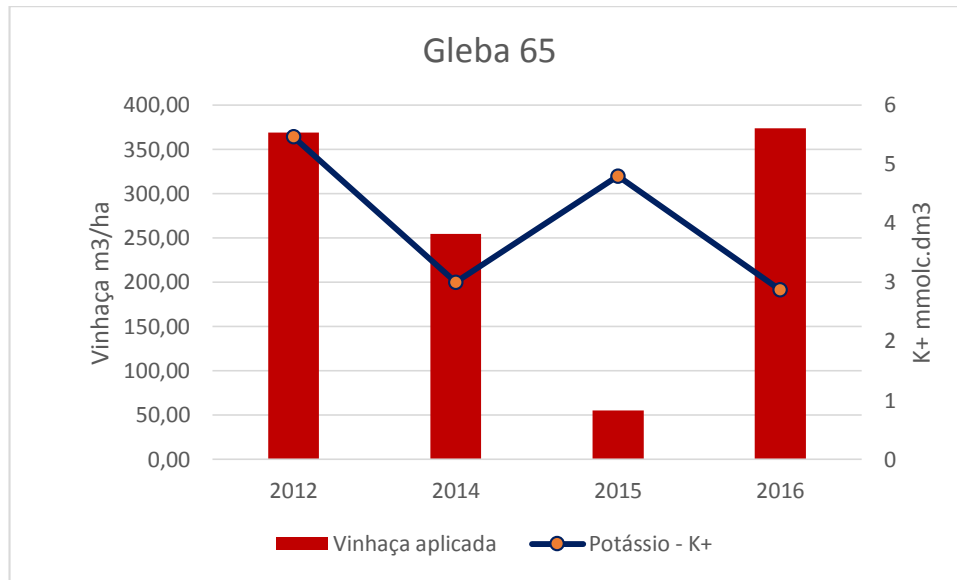
Tabela 11. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC para gleba 65

Ano	Talhão	Dosagem Vinhaça (m ³ /ha)	% Ks/CTC	5% CTC
2012	Gleba 65	369,17	2,01	4,11
2014	Gleba 65	254,55	3,3	4,54
2015	Gleba 65	55,24	5,05	4,74
2016	Gleba 65	373,73	2,67	5,37

Fonte: (Autor, 2020)

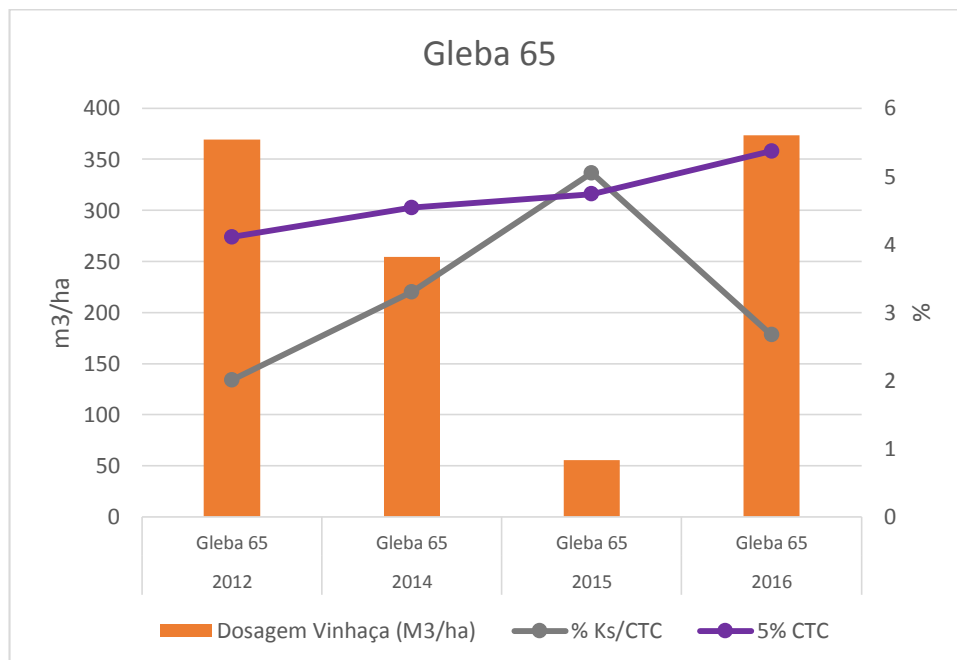
A Figura 24 mostrou os valores da vinhaça aplicada na gleba 65 comparando com os valores K⁺ e a Figura 25, a dosagem da vinhaça aplicada também na gleba 65, com parâmetros utilizados para cálculo do volume aplicado (CETESB, 2015).

Figura 24. Valores da vinhaça aplicada na gleba 65, comparando com os valores K^+



Fonte: (Autor, 2020)

Figura 25. Dosagem da vinhaça aplicada a gleba 65, com parâmetros utilizados para cálculo



Fonte: (Autor, 2020)

Analisando-se as quantidades aplicadas de vinhaça na gleba 65, de 2012 para 2014 a dosagem aplicada diminuiu de 369,71 m³/ha para 254,55 m³/ha com o aumento de K^+ do solo. O valor de V% também diminuiu de 66,24% para 56%, com diminuição do pH de 5,6 para 4,9 e aumento de m% de 0,5% para 1,11%, tornando o solo mais ácido, distrófico ou infértil. Em 2015 ocorreu uma diminuição importante na quantidade aplicada de vinhaça, apesar das concentrações de Al^{3+} baixas e de V% acima 60 %. Esta redução aconteceu por % Ks/CTC

ultrapassar o valor permitido pela norma P4.312 da CETESB, que permite aplicação com concentração abaixo de 5% CTC. O volume aplicado de 55,24 m³.ha⁻¹ manteve o volume dentro do permitido no cálculo, que restringe a 185 kg de K₂O por hectare, que daria máximo de 61,66 m³.ha⁻¹.

No ano seguinte, o valor %Ks/CTC diminuiu significativamente, aumentando a quantidade de vinhaça aplicada em 2016. O valor alto de V% (81,38%) e baixo de m% (0,26%), bem como o aumento da MO e diminuição concentração de Al³⁺ mostram que o solo se manteve fértil (BRITO, 2013; RONQUIM, 2010).

Em relação ao pH, ocorreu diminuição de 2012 para 2014 por aumento da concentração de Al³⁺, e nos dois anos seguintes o aumento do pH pela redução da concentração de Al³⁺.

A gleba 83 apresenta dados nos anos de 2013, 2014 e 2015 fornecidos pelos PAVs da usina, para análise da fertilidade do solo após fertirrigação da vinhaça da gleba 83 (Tabela 12) e os valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC, também para a gleba 83 (Tabela 13).

Tabela 12. Análise de fertilidade do solo, após fertirrigação da vinhaça da gleba 83

Ano	Unidade	2013	2014	2015
Gleba			83	
Matéria Orgânica	g.dm ⁻³	29	24	30
pH	----	5,7	4,9	5,8
Potássio - K ⁺	mmolc.dm ⁻³	2	1,43	1,44
Sódio Na ⁺	mmolc.dm ⁻³	<0,05	<0,05	0,09
Cálcio Ca ²⁺	mmolc.dm ⁻³	48,24	33,01	50,88
Magnésio Mg ²⁺	mmolc.dm ⁻³	15,37	14,74	22,2
Alumínio Al ³⁺	mmolc.dm ⁻³	0,17	0,63	0,62
Hidrogênio + Alumínio- H+ Al	mmolc.dm ⁻³	24	43	20
Soma de Bases - SB	mmolc.dm ⁻³	65,61	49,21	74,61
Capacidade de Troca Catiônica - CTC	mmolc.dm ⁻³	89,61	92,21	94,61
Saturação de Bases - V%	%	73,22	53,37	78,86
Saturação de Alumínio - m%	%	0,26	1,26	0,82
Vinhaça aplicada	m ³ .ha ⁻¹	371,23	458,59	472,32

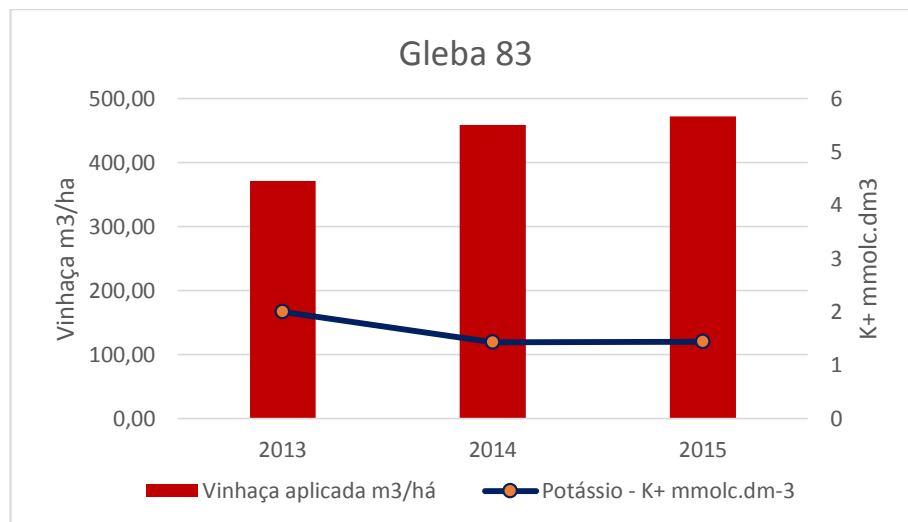
Fonte: (Autor, 2020)

Tabela 13. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC para gleba 83

Ano	Talhão	Dosagem Vinhaça (M3/ha)	% Ks/CTC	5% CTC
2013	Gleba 83	371,23	2,23	4,48
2014	Gleba 83	458,59	1,55	4,61
2015	Gleba 83	472,32	1,52	4,73

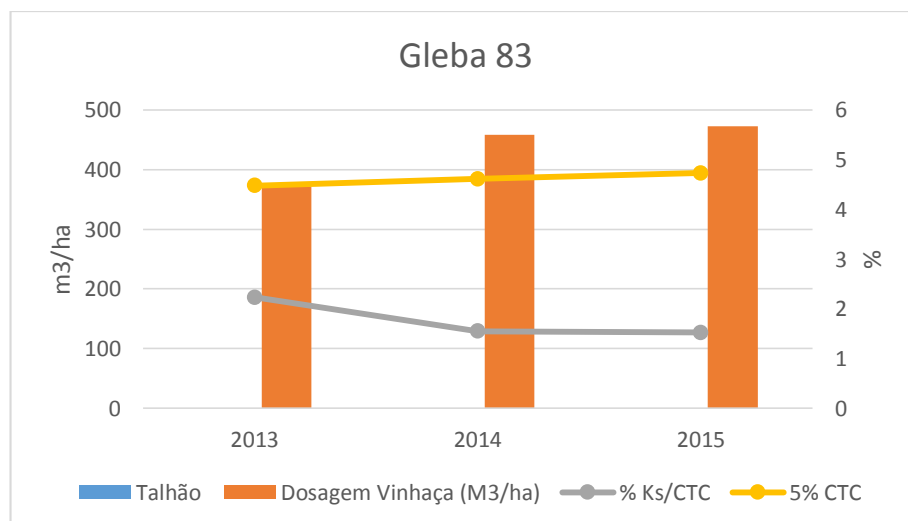
Fonte: (Autor, 2020)

A Figura 26 mostrou os valores da vinhaça aplicada na gleba 83 comparando com os valores K^+ e, na Figura 27, a dosagem da vinhaça aplicada também na gleba 83, com parâmetros utilizados para cálculo do volume aplicado (CETESB, 2015).

Figura 26. Valores da vinhaça aplicada na gleba 83, comparando com os valores K^+ 

Fonte: (Autor, 2020)

Figura 27. Dosagem da vinhaça aplicada na gleba 83, com parâmetros utilizados para cálculo



Fonte: (Autor, 2020)

Analisando a quantidade de vinhaça aplicada nesta gleba, tivemos um aumento entre os anos de 2013 para 2014, e de 2014 para 2015. Este aumento no volume aplicado ocorreu pela diminuição do K^+ e aumento de CTC de 2013 para 2014 e de 2014 para 2015. A V% diminuiu de 2013 para 2014 de 73,22% para 53,37% junto com o aumento de m% de 0,26% para 1,26% e diminuição quantidade de MO, e depois de 2014 para 2015 a V% subiu para 78,86% com a diminuição de m% para 0,82% e aumento da MO. O pH baixou de 5,7 para 4,9 e subiu em 2015 para 5,8. Este solo, mesmo com queda de V% em 2014, tem todos os valores acima de 60%, mostrando um solo eutrófico durante todo o período analisado (TAVARES, 2016).

A gleba 96 apresenta dados nos anos de 2012, 2013 e 2014 fornecidos pelos PAVs da usina, para análise da fertilidade do solo após fertirrigação da vinhaça da gleba 96 (Tabela 14) e os valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC, também para a gleba 96 (Tabela 15).

Tabela 14. Análise de fertilidade solo, após fertirrigação da vinhaça da gleba 96

Ano	Unidade	2012	2013	2014
Gleba		96		
Matéria Orgânica	g.dm ⁻³	34	31	26
pH	----	6	5,4	5
Potássio - K^+	mmolc.dm ⁻³	2,05	2,08	2,28
Sódio Na^+	mmolc.dm ⁻³	0,08	<0,05	0,08
Cálcio Ca^{2+}	mmolc.dm ⁻³	43,52	40,44	31,26
Magnésio Mg^{2+}	mmolc.dm ⁻³	25,58	17,16	18,04
Alumínio Al^{3+}	mmolc.dm ⁻³	0,16	0,21	0,47
Hidrogênio + Alumínio- H+ Al	mmolc.dm ⁻³	21	33	18
Soma de Bases - SB	mmolc.dm ⁻³	71,23	59,68	51,66
Capacidade de Troca Catiônica - CTC	mmolc.dm ⁻³	92,23	92,68	69,66
Saturação de Bases - V%	%	77,23	64,39	74,16
Saturação de Alumínio - m%	%	0,22	0,35	0,9
Vinhaça aplicada	m ³ .ha ⁻¹	381,34	380,41	211,80

Fonte: (Autor, 2020)

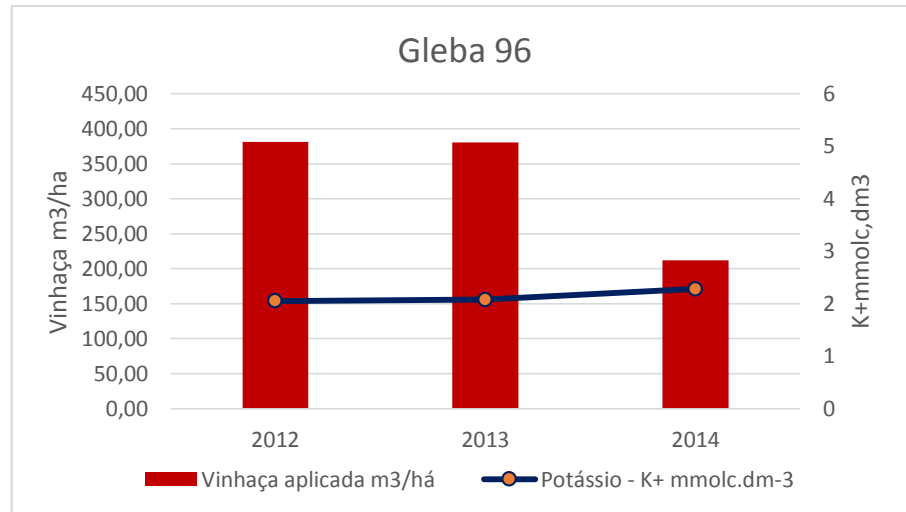
Tabela 15. Valores de aplicação da vinhaça comparados com %Ks/CTC e 5%CTC para a gleba 96

Ano	Talhão	Dosagem Vinhaça (m ³ /ha)	% Ks/CTC	5% CTC
2012	Gleba 96	381,34	2,22	4,61
2013	Gleba 96	380,41	2,24	4,63
2014	Gleba 96	211,8	3,27	3,48

Fonte: (Autor, 2020)

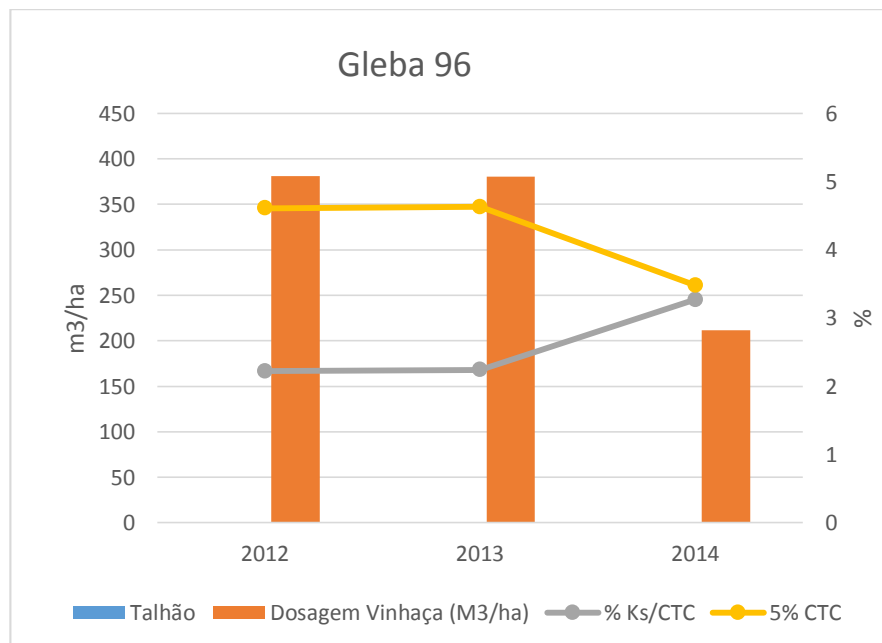
A Figura 28 mostrou os valores da vinhaça aplicada na gleba 96, comparando com os valores K^+ e, na Figura 29, a dosagem da vinhaça aplicada também na gleba 96, com parâmetros utilizados para cálculo do volume aplicado (CETESB, 2015).

Figura 28. Valores da vinhaça aplicada na gleba 96, comparando com os valores K^+



Fonte: (Autor, 2020)

Figura 29. Dosagem de vinhaça aplicada gleba 96, com parâmetros utilizados para cálculo



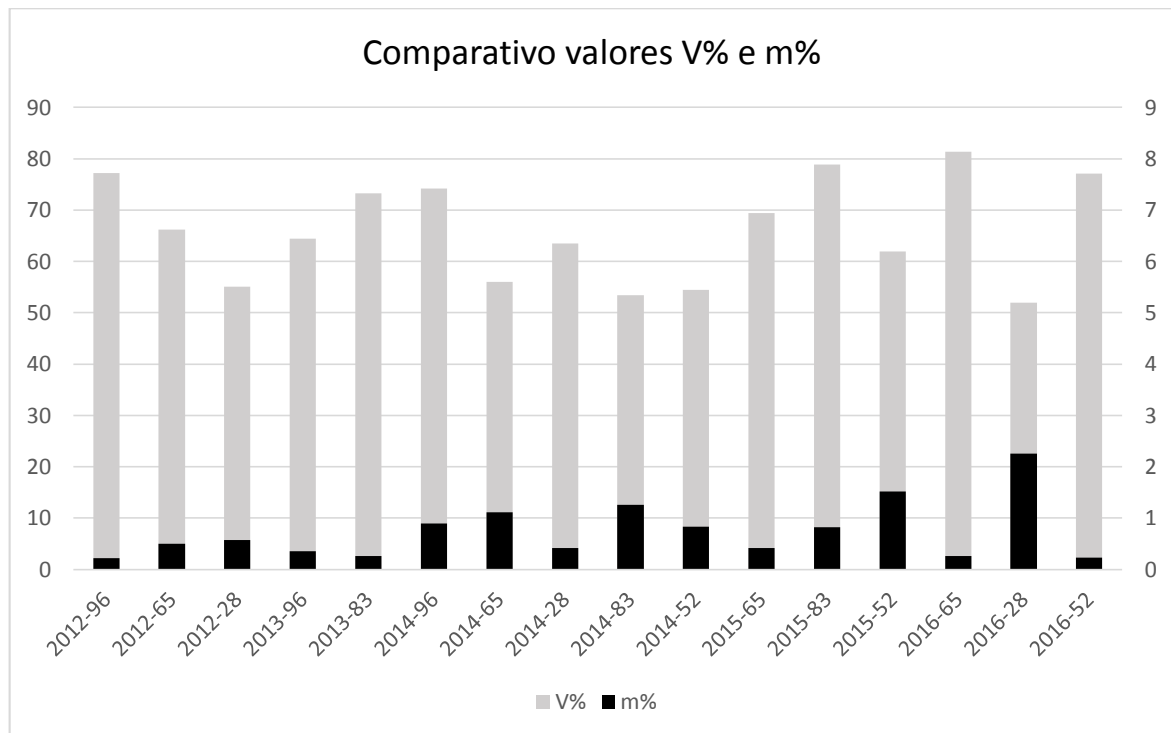
Fonte: (Autor, 2020)

Nos anos de 2012 e 2013 a gleba 96 foi fertirrigada com volumes praticamente iguais de vinhaça devido aos valores baixos de K^+ e muito próximos nos dois anos (2,05 mmolc.dm⁻³ em 2012 e 2,08 mmolc.dm⁻³ em 2013) e os valores elevados de CTC. Em 2014 a dosagem

aplicada foi praticamente a metade das 2 aplicações anteriores, mesmo com o valor de K^+ muito parecido com os valores anteriores ($2,28 \text{ mmolc.dm}^{-3}$), devido diminuição do valor de CTC. A V% se manteve alta em todos os anos analisados: 77,23%, 64,39% e 74,16%. O pH de 6,0 em 2012 com uma concentração de Al^{3+} baixa, caracterizou solo fértil e eutrófico.

A Figura 30 mostra um comparativo dos valores de saturação de base (V%) e saturação por alumínio (m%) em todas as glebas analisadas nos anos em que ocorreram fertirrigação.

Figura 30. Comparação dos valores de Saturação de base (V%) e por alumínio (m%)



Fonte: (Autor, 2020)

Comparando as análises das glebas, verificou-se na Figura 30 que os valores de Saturação por base (V%) estiveram acima de 50% em todos os anos e em todas as glebas fertirrigadas, e que em 69% das aplicações da vinhaça a V% esteve acima de 60%, valor considerado ideal para cana-de-açúcar (CETESB, 2015). Os valores de Saturação por alumínio foram baixos, inversamente proporcionais aos valores de V%, mostrando que os solos mantiveram a fertilidade durante os anos estudados (TAVARES, 2016).

Outra análise de fertilidade do solo realizada, comparou os dados encontrados por Galdeano (2019) e Serafim (2020), que fizeram análises do solo fertirrigado em glebas de fazendas distintas, porém utilizando as vinhaças da mesma usina e no mesmo período (2012 a

2016). A comparação das médias dos valores de fertilidade do solo encontrados nos estudos de Galdeano (2019) e Serafim (2020) e do presente estudo, podem ser analisadas na Tabela 16.

Tabela 16. Comparação das médias dos valores de fertilidade do solo em fazendas distintas, utilizando a mesma vinhaça no mesmo período de aplicação

Médias	Unidade	Galdeano	Serafim	Área
		2019	2020	estudo
Vinhaça	m ³ /ha	402,88	182,75	335,5
V%	%	58,19	50,8	66,16
Ks	kg/ha	354,87	93,07	165,11
CTC	mmol/dm ⁻³	126,32	43,23	86,06
Ca ²⁺	mmol/dm ⁻³	43,845	15,624	39,02
Mg ²⁺	mmol/dm ⁻³	18,679	6,4	15,55
K ⁺	mmol/dm ⁻³	4,538	1,244	2,397
Al ³⁺	mmol/dm ⁻³	9,265	0,363	0,375

Fonte: (Autor, 2020)

O volume médio da vinhaça aplicada nas três áreas apresentou valores bem diferentes, sendo o primeiro de 402,88 m³/ha, o segundo de 182,75 m³/ha e o terceiro de 335,50 m³/ha. As Ks nos três estudos também mostraram valores diferentes, seguindo a mesma ordem de grandeza. Já o valor V% foi de 66,16% nesta área de estudo, sendo o maior valor e acima do recomendado para a cultura de cana-de-açúcar (KOFFLER, 1996).

Quanto a CTC, os valores mais elevados encontrados na área de Galdeano (2019), mostram um solo com maior capacidade de retenção de nutrientes, enquanto a de Serafim (2020) com valor médio mais baixo, apresentou maior facilidade de lixiviação de nutrientes.

A média de Al³⁺ de Galdeano (2019) se mostrou elevada, podendo ser justificada pelos volumes mais altos de vinhaça aplicada. Já a relação dos cátions trocáveis, mostrou-se na ordem de grandeza indicada como ideal nos três estudos Ca>Mg>K. Esta ordem se apresentou nas proporções de 25:5:1 neste estudo, justificando a V% maior que 60% e uma alta fertilidade solo (RAIJ et al., 1983).

Os volumes de vinhaça aplicados na área de estudo de Galdeano (2019), apesar de estarem dentro do limite permitido pela Equação de Aplicação Vinhaça da Norma Técnica P 4.231/2005 da CETESB (Equação 1), se mostraram excessivos para as concentrações de Al³⁺, para

5.3 Caracterização ambiental do solo

Também foram analisadas as características ambientais do solo (Tabela 17), utilizando-se os dados apresentados no PAV de 2016, das amostras coletados pela usina, que contém as análises químicas do solo nas glebas avaliadas (11, 27 e 21) na fazenda estudada.

Estas amostras permitem avaliar os valores dos micronutrientes no solo, verificando assim, os valores de referência da Qualidade (VRQ), valores de Prevenção (VP) e valores de Intervenção (VI) e, se este solo apresentou no ano analisado, suas qualidades físicas e químicas dentro dos níveis recomendáveis.

Tabela 17. Amostras coletadas em 3 pontos da fazenda pela usina geradora de vinhaça fertirrigada

Parâmetros	VRQ* (mg.kg- 1)	VP** (mg.kg- 1)	VI*** (mg.kg- 1)	Resultados		
				gleba 11 Resultado	gleba 27 Resultado	gleba 21 Resultado
Antimônio (Sb)	<0,5	2	5	<0,241	<0,253	<0,256
Arsênio (As)	3,5	15	35	2,14	1,17	1,88
Bário (Ba)	75	120	500	52,81	75,28	61,89
Cádmio (Cd)	<0,5	1,3	3,6	<0,181	<0,190	<0,192
Chumbo (Pb)	17	72	150	16,5	24,96	25,44
Cobalto (Co)	13	25	35	7,95	22,88	7,02
Cobre (Cu)	35	60	760	24,51	90,85	57,89
Crômio (Cr)	40	75	150	17,66	38,24	23,2
Mercúrio (Hg)	0,05	0,5	1,2	<0,012	<0,013	<0,013
Molibdênio (Mo)	<4	5	11	<0,301	<0,316	<0,321
Níquel (Ni)	13	30	190	6,03	14,43	12,62
Sênio (Se)	0,25	1,2	24	<0,301	<0,316	<0,321
Zinco (Zn)	60	86	1900	23,62	74	30,6

* VRQ - Valores de referência da qualidade

** VP - Valores de prevenção

*** VI - Valores de intervenção

Fonte: (Autor, 2020)

Das três glebas analisadas, apenas a 21 recebeu vinhaça no ano de 2013 e apresentou todos os valores de micronutrientes abaixo dos valores de prevenção (VP) e apenas os valores de Chumbo e Cobre acima dos valores de referência da qualidade (VRQ). Já a gleba 27 que não recebeu fertirrigação por vinhaça no período analisado, apresentou o valor de Cobre (Cu) acima do VP e os elementos Chumbo (Pb), Cobalto (Co), Níquel (Ni) e Zinco (Zn) acima dos valores de referência da qualidade (VRQ). Na gleba 11 também sem fertirrigação no período estudado,

todos os valores apresentados estavam abaixo do valor de referência da qualidade (VRQ) (RAIJ et al., 1997).

Estas quantidades de minerais encontrados podem fazer parte da formação natural da região, com presença de rochas, pelo intemperismo e pelo escoamento destes metais das áreas mais altas para estas glebas, que se encontram em áreas próximas de mata e córregos. Estes valores encontrados, todos abaixo de VP, mostraram um solo com boas características físicas e químicas e capacidade de adsorver nutrientes. Os valores encontrados nesta análise não apresentam risco ao meio ambiente e não caracterizaram solos alterados pela ação da fertirrigação.

Nas análises de comparação da qualidade do solo em 2018 (Tabelas 18, 19 e 20), as amostras foram coletadas em dois pontos da área estudada: amostras P1 na gleba 65 e P2 na gleba 75, com coletas feitas em 30 cm e 100 cm de profundidade.

Tabela 18. Valores dos óxidos das amostras coletadas em 2018 para análises ambientais

Composição química	Unidade	AMOSTRA			
		P1 30cm	P1 100cm	P2 30cm	P2 100cm
		gleba 65	gleba 65	gleba 75	gleba 75
SiO ₂	ppm	72,96	74,03	39,46	44,77
TiO ₂	ppm	1,76	1,95	5,53	4,20
Al ₂ O ₃	ppm	10,69	10,82	20,81	17,29
Fe ₂ O ₃	ppm	6,70	6,26	22,67	23,35
MnO	ppm	0,02	0,02	0,12	0,09
MgO	ppm	0,26	0,24	0,21	0,17
CaO	ppm	0,12	0,08	0,13	0,14
Na ₂ O	ppm	0,01	0,01	0,01	0,01
K ₂ O	ppm	0,30	0,32	0,08	0,08
P ₂ O ₅	ppm	0,08	0,08	0,21	0,21
LOI	ppm	7,17	6,19	10,83	9,76
Soma	ppm	100,07	100,00	100,06	100,07

Fonte: (Autor, 2020)

Tabela 19. Valores dos metais das amostras coletadas em 2018 para análises ambientais

AMOSTRA	
---------	--

Composição química	Unidade	P1 30 cm gleba 65	P1 100cm gleba 65	P2 30cm gleba 75	P2 100cm gleba 75	Média ± desvio padrão
Cr	ppm	112	93	83	536	206,00 ±190,81
Ni	ppm	23	25	22	23	23,25 ±1,09
Ba	ppm	96	90	232	161	144,75 ±57,55
Rb	ppm	40	36	14	12	25,50 ±12,6
Sr	ppm	1	1	24	25	12,75 ±11,75
La	ppm	10	19	53	46	32,00 ±17,96
Ce	ppm	61	81	42	122	76,50 ±29,67
Zr	ppm	302	320	311	263	299,00 ±21,74
Y	ppm	16	17	23	22	19,50 ±3,04
Nb	ppm	21	21	42	32	29,00 ±8,75
Cu	ppm	36	16	76	68	49,00 ±24,23
Zn	ppm	50	40	83	72	61,25 ±17,08
Co	ppm	5	4	28	25	15,50 ±11,06
V	ppm	258	232	613	576	419,75 ±175,48
Ga	ppm	19	19	20	15	18,25 ±1,92

Fonte: (Autor, 2020)

Tabela 20. Faixa aceitável de macro e micronutrientes de cana-de-açúcar

	Elemento	Unidade	Faixa
Macronutriente	Nitrogênio (N)		18-25
	Fósforo (P)		1,5 - 3,0
	Potássio (K)	g.kg-1	10,0-16
	Cálcio (Ca)		2,0-8,0
	Magnésio (Mg)		1,0-3,0
	Enxofre (S)		1,5-3,0
Micronutrientes	Boro (B)		10,0-30
	Cobre (Cu)		6,0-15
	Ferro (Fe)	mg.kg-1	40-250
	Manganês (Mn)		25-250
	Molibdênio (Mo)		0,005-0,2
	Zinco (Zn)		10,0-50

Fonte: adaptado (RAIJ et al., 1997)

Os resultados obtidos mostraram a presença de muitos óxidos: SiO₂, Al₂O₂ e Fe₃O₂ caracterizando o latossolo vermelho da região das glebas (BRAIT, 2008). A amostra retirada da gleba 65 recebeu fertirrigação nos anos de 2012, 2014, 2015 e 2016, enquanto a amostra retirada da gleba 75 não recebeu vinhaça no período em que foram feitas as análises temporais da fertilidade solo.

Na primeira análise destas amostras, verificou-se um alto percentual dos óxidos encontrados na amostra, com SiO₂ na amostra P1 a 30 cm de 72,96 ppm, na P1 a 100 cm de

74,06 ppm e menores, porém, ainda elevados em P2 a 30 cm de 39,46 ppm e P2 a 100 cm de 44,77 ppm. Os valores de Al_2O_3 foram respectivamente 10,69 ppm, 10,82 ppm, 20,81 ppm e 17,29 ppm, também elevados. E os valores de Fe_2O_3 foram de 6,70 ppm, 6,26 ppm, 22,67 ppm e 23,35 ppm. As quantidades elevadas destes óxidos caracterizam solo argiloso e rico em minerais (RAIJ et al., 1997) como o solo da região estudada, o latossolo vermelho (ARCADIS TETRPLAN, 2011).

Na interpretação da relação sílica-alumina, foi utilizada a (Equação 9):

$$ki = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 \cdot 1,7} \quad (9)$$

O valor encontrado de Ki para a amostra P1 a 30 cm foi de 11,60% para a mesma amostra a 100 cm com valor de 11,63%, e para amostra P2 a 30 cm com valor de 3,22% e a mesma amostra a 100 cm com valor de 4,40%, mostrando que a área de P2 sofreu maior intemperismo, com lixiviação do SiO_2 e conseqüente aproximação das porcentagens com Al_2O_3 , que se encontra mais profundo no solo. Esta análise permite verificar que o solo com fertirrigação (P1, gleba 65) teve um aumento de matéria orgânica (MO), mantendo assim as maiores concentrações na superfície do solo de metais e minerais.

Quanto aos valores dos metais da análise das amostras P1 e P2, tivemos vários valores acima dos valores de referência da qualidade: de Cromo (Cr) nas amostras P1 a 30 cm, P1 a 100 cm e P2 a 30 cm, de níquel (Ni) em todas as 2 amostras P1 a 30 cm e 100 cm e P2 a 30 cm e 100 cm, de bário (Ba) na amostra P1 a 30 cm e 100 cm e de cobalto (Co) na P2 a 100 cm. Outros valores foram encontrados também acima dos valores de Prevenção (VP): de bário (Ba) na amostra P2 a 30 cm e a 100 cm, de cobre (Cu) na amostra P1 a 30 cm e na P2 a 30 cm e 100 cm e de cobalto (Co) na P2 a 30 cm. E foi encontrado um valor acima dos valores de intervenção (VI) de cromo (Cr) na amostra P2 a 100 cm (CAMILOTTI et al., 2007). A amostra que não recebeu fertirrigação durante o período estudado (P2), foi a que apresentou maior quantidade de valores excedentes, mostrando que a vinhaça não teve interferência significativa nas alterações encontradas no solo neste período, em relação às características naturais do solo.

6. CONCLUSÕES

Nos dados analisados referentes à vinhaça aplicada, ficou evidente que a quantidade utilizada no período manteve a fertilidade do solo e proporcionou macronutrientes e matéria orgânica (MO) em quantidades dentro dos padrões para o plantio de cana-de-açúcar. Os valores de saturação por base (V%) mantiveram-se altos, mesmo a vinhaça apresentando pH ácido, pois a saturação por alumínio apresentou valores baixos pelo equilíbrio com o H^+ , mantendo o solo eutrófico.

Quanto às características ambientais do solo, os valores elevados de alguns óxidos estavam presentes tanto nas áreas que receberam fertirrigação quanto nas áreas consideradas em branco, concluindo que o uso em volumes adequados da vinhaça proporcionou benefícios à cultura da cana-de-açúcar sem causar grandes danos ao solo e ao meio ambiente que o circunda. A necessidade de complementação com adubação e calagem foi relatada neste trabalho, porém, sem aprofundamento e quantificação desta necessidade, ficando este estudo centrado na análise do uso da vinhaça.

A comparação dos dados da fertirrigação em três áreas distintas com a mesma vinhaça no mesmo período deixou evidente que utilizar apenas o valor de potássio como parâmetro para o cálculo do volume de vinhaça a ser utilizada na fertirrigação pode ser prejudicial ao solo e ao meio ambiente, devendo ser analisados outros componentes do solo como acidez (pH), quantidade de matéria orgânica (MO), quantidade de alumínio e outros metais do solo na determinação deste volume. O volume de vinhaça aplicado por área encontrado utilizando-se a equação de aplicação da vinhaça, mostrou-se em algumas glebas excessivos, devendo ser analisado o uso de quantidades menores que o máximo apontado pelo cálculo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCADIS TETRAPLAN. **Estudo de Impacto Ambiental — EIA: Ampliação das Áreas de Plantio de cana-de-açúcar e da Produção de açúcar, álcool e energia elétrica.** São Paulo, p. 483, 2011.
- BARROS, M. de F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ, V. H.; RUIZ, H. A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 59-64, 2004.
- 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. 30, p. 341-346, 2010.
- BRAGA, G. N. M. **Cálculo e Interpretação das Saturações por bases e alumínio na fertilidade do solo.** 2013. Disponível em: <<https://agronomiacomgismonti.blogspot.com/2013/06/calculo-e-interpretacao-das-saturacoes.html>>. Acesso em: 22 ago. 2018.
- BRAIT, M.A.H. **Interação silício e fósforo na adsorção desses elementos em diferentes solos de Cerrado.** 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás Jataí, 2008.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS.** Brasília: Funasa, 2014. 112p.
- BRITO, A. P. F. **Avaliação da disposição de biossólido oriundo da ETE Araraquara (SP) em argilossolo Vermelho.** 95f. 2013. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2013.
- BROUYÈRE, S.; DASSARGUES, A.; HALLET, V. Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: A field investigation. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 72, n. 1-4, p.135-164, 2004.
- CAIXETA, Larissa de B. et al. Efeito da fertirrigação com vinhaça na distribuição espacial de fitonematóides em solo cultivado com cana-de-açúcar. In: **JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO**, UFRPE. Recife, PE: UFRPE, v. 10, 2010.
- CAMILOTTI, Fábio; MARQUES, Marcos O.; ANDRIOLI, Itamar; SILVA, Alysson R. da. Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, abr, 2007.
- CASARINI, D. C. P; MURGEL BRANCO, S. **Efeito da Fertirrigação com Vinhaça nas propriedades químicas e microbiológicas do solo em um sistema de disposição de efluente industrial.** 1989. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 1989.
- CASTRO, Selma Simões de et al. Estudo da expansão da cana-de-açúcar no estado de Goiás: subsídios para uma avaliação do potencial de impactos ambientais. IESA/UFG, **Anais SBPC**, 2007.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma P4.231: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola.** São Paulo, 2005.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma P4.231: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. 3ª Edição, 2ª Versão - São Paulo, 2015.

CORREIA, Jorge Evangelista. **Avaliação da toxicidade da vinhaça tratada quimicamente utilizando *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae) como organismo teste**. 2015, 104 f. Dissertação (Mestrado em Biociências) - Universidade Estadual Paulista - Rio Claro, 2015.

CTC – CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Recomendação de adubação para a cultura de cana-de-açúcar. **Cadernos Copersucar, Série Agrônômica**, n. 17. Piracicaba, 1988.

DAL BEM, Edjair Augusto. **Inter-relações da produtividade de cana-de-açúcar com atributos químicos de um argissolo vermelho eutrófico paulista**. 2013. 92f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UNESP - Ilha Solteira, 2013.

ELIA NETO; NAKAHONDO. **Vinhaça**. In: DINARDO-MIRANDA, Leila L. et al. Cana-de-açúcar. Ribeirão Preto, SP: IAC, p. 298-308, 2008.

EMBRAPA. **Surto da mosca-dos-estábulo próximos as usinas**. 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2649716/artigo-surtos-da-mosca-dos-estabulos-proximos-a-usinas-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 24 out. 2020.

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**. 161f. 2013. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Rio Claro/SP, 2013.

GALDEANO, L. R. **Fertilidade e mineralogia do solo sujeito à disposição de vinhaça de uma fazenda em Santa Cruz das Palmeiras**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro/SP, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Santa Cruz das Palmeiras**. 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/santa-cruz-das-palmeiras/panorama>>. Acesso em: 19 maio 2018.

KOFFLER, N. F. A profundidade do sistema radicular e o suprimento de água às plantas no Cerrado. Piracicaba, SP. **POTAFÓS - Informações Agrônômicas**, n. 33, p. 12, 1986.

LOPES, A. S. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. Tradução e Adaptação. 2ª. ed. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba SP, 1998.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. ANDA, São Paulo, 2004.

MORTATTI, B. C. **Caracterização físico-química dos solos e comportamento dos contaminantes da Vinhaça por processo de difusão**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas/SP, 2010.

NASCIMENTO, Cristine L. do. **Avaliação econômica do aproveitamento do vinhoto concentrado como fertilizante**. 87f. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, B. G. **Emissão de metano e microbiota funcional associadas a Vinhaça de cana-de-açúcar em sistemas de armazenamento e transporte**. 99f. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

- OLIVEIRA, E. L.; ANDRADE, L. A. B.; FARIA, M. A.; CUSTÓDIO, T. N. Vinhaça de alambique e nitrogênio na cana-de-açúcar em ambiente irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 694–699, 2009.
- OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; ZUFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná: taxas de crescimento. **Scientia Agrária**, v. 6, n. 1/2, p. 85-89, 2007.
- PEREIRA, A. C. A. **Efeitos da Disposição de Lodo de ETE de Indústria Alimentícia no solo: Estudo de caso**. 75f. 2015. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Rio Claro/SP, 2015.
- POVEDA, M. M. Ruiz. **Análise Econômica e Ambiental do Processamento da Vinhaça com Aproveitamento Energético**. 2014, 160f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- RAIJ, B. Van, CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A., FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Boletim Técnico**, n. 100, IAC, Campinas/SP, 1983.
- RAIJ, B. Van, CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A., FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Boletim Técnico**, n. 100, 2ª. ed., IAC, Campinas/SP, 1997.
- RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. IAC, Campinas/SP, p. 285, 2001.
- RODRIGUES, Isabella Junqueira. **Adequação da vinhaça de cana-de-açúcar para reuso agrícola: avaliação de diferentes tecnologias de tratamento e potenciais impactos ambientais**. 2016, 71f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista - Rio Claro, 2016.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Embrapa Monitoramento por Satélite**. Campinas/SP, 2010.
- ROSSETTO, A. J. **Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira**. In: PARANHOS, S. B. (ed.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, v.2, p.435-504, 1987.
- ROSSETTO, R. **Uso da vinhaça na adubação da cana**. IAC, Campinas SP, 2018.
- ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; JARDIM, J. J. Adubação e calagem em cana-de-açúcar. **O Agrônomo**, v. 57, n. 2, p. 22-23, 2005.
- SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS. Prefeitura Municipal. **Informações: A Cidade**. 2018. Disponível em: < <http://www.santacruzdaspalmeiras.sp.gov.br/>>. Acesso em: 25 out. 2019.
- SERAFIM, R. F. **Avaliação da fertilidade do solo de uma fazenda na região de Pirassununga SP sujeito à aplicação de vinhaça**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro/SP, 2020.
- SERRANA FERTILIZANTES. **Boletim Técnico – Calagem da Cana-de-açúcar**. 2001.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Latossolos**. Embrapa, 2005.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. **Acidez do solo e sua correção**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L., eds. *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa MG, 2007.

TAVARES, Valquíria do Nascimento. **Atributos físicos, químicos e estoque de carbono em argissolo sob diferentes manejos na zona da mata de Pernambuco**. 2016. 60f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife/PE, 2016.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solos**. 3^a. ed. revista e ampliada. Embrapa Solos, Brasília DF, 2017.

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 1, p. 22-28, 2011.

ANEXO

Tabela 21. Valores analisados por glebas no período de 2012 a 2017

Parâmetros	Unidade	2012 (1)	2012 (4)	2012 (6)	2013 (3)	2013 (4)	2014 (1)	2014 (2)	2014 (3)	2014 (4)	2014 (6)	2015 (1)	2015 (2)	2015 (3)	2016 (1)	2016 (2)	2016 (3)
Glebas		96	65	28	96	83	96	83	52	65	28	83	52	65	28	65	52
Matéria Orgânica	g.dm ⁻³	34	31	24	31	29	26	24	29	27	22	30	28	33	19	35	33
pH	----	6	5,6	5,2	5,4	5,7	5	4,9	5,1	4,9	5,3	5,8	5,3	5,4	4,7	5,4	5,3
Potássio - K ⁺	mmolc.dm ⁻³	2,05	5,46	1,74	2,08	2	2,28	1,43	2,25	3	0,98	1,44	2,09	4,8	0,77	2,87	3,12
Sódio Na ⁺	mmolc.dm ⁻³	0,08	0,08	0,08	<0,05	<0,05	0,08	<0,05	0,06	0,05	0,06	0,09	0,07	0,07	0,05	0,38	0,06
Cálcio Ca ²⁺	mmolc.dm ⁻³	43,52	41,91	28,01	40,44	48,24	31,26	33,01	34,82	33,22	32,94	50,88	28,91	40,78	22,76	60,76	52,91
Magnésio Mg ²⁺	mmolc.dm ⁻³	25,58	7,48	7,01	17,16	15,37	18,04	14,74	13,1	14,64	13,08	22,2	9,66	20,32	8,88	23,4	18,14
Alumínio Al ³⁺	mmolc.dm ⁻³	0,16	0,28	0,21	0,21	0,17	0,47	0,63	0,42	0,57	0,2	0,62	0,63	0,28	0,75	0,23	0,17
Hidrogênio + Alumínio- H+ Al	mmolc.dm ⁻³	21	28	30	33	24	18	43	42	40	27	20	25	29	30	20	22
Soma de Bases - SB	mmolc.dm ⁻³	71,23	54,93	36,84	59,68	65,61	51,66	49,21	50,23	50,91	47,06	74,61	40,73	65,97	32,46	87,41	74,23
Capacidade Troca Catiônica - CTC	mmolc.dm ⁻³	92,23	82,93	66,84	92,68	89,61	69,66	92,21	92,23	90,91	74,06	94,61	65,73	94,97	62,46	107,41	96,23
Saturação de Bases - V%	%	77,23	66,24	55,12	64,39	73,22	74,16	53,37	54,46	56	63,54	78,86	61,97	69,46	51,97	81,38	77,14
Saturação de Alumínio - m%	%	0,22	0,5	0,57	0,35	0,26	0,9	1,26	0,83	1,11	0,42	0,82	1,52	0,42	2,26	0,26	0,23
Vinhaça aplicada	m ³ .ha ⁻¹	381,34	369,17	261,60	380,41	371,23	211,80	458,59	356,38	254,55	401,50	472,32	210,99	55,24	355,32	373,73	272,77

---- Não se aplica

(1);(2);(3);(4);(5);(6)Número de amostras de cada ano

Fonte: (Autor, 2020)