

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL

DANIEL ALVES MUNDIM

**ALTERAÇÕES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO SOB APLICAÇÃO DE
VINHAÇA POR ANOS CONSECUTIVOS**

**SÃO MATEUS, ES
2016**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL

DANIEL ALVES MUNDIM

**ALTERAÇÕES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO SOB APLICAÇÃO DE
VINHAÇA POR ANOS CONSECUTIVOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Orientador: Prof. Dr. Robson Bonomo

**SÃO MATEUS, ES
2016**

ALTERAÇÕES QUÍMICAS E FÍSICAS DO SOLO SOB APLICAÇÃO DE VINHAÇA POR ANOS CONSECUTIVOS

DANIEL ALVES MUNDIM

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Aprovada em 31 de maio de 2016.

Prof. Dr. Robson Bonomo
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Fábio Ribeiro Pires
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientador

Prof. Dr. Fábio Oseias dos Reis Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Prof. Dr. Josil de Barros Carneiro Junior
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Examinador Externo

Aos meus pais, amigos e professores que sempre apoiaram com toda a atenção e paciência ao longo deste caminho.

DEDICO

Agradecimentos

Por ter chegado à conclusão deste trabalho, agradeço primeiramente a Deus que me permitiu chegar até aqui.

Agradeço a todos os amigos que nunca duvidaram que este dia pudesse chegar. Agradeço aos meus pais que foram os maiores incentivadores deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador e professor Dr. Robson Bonomo, pelos ensinamentos e paciência durante todo esse trabalho. Agradeço também ao professor Dr. Fabio Pires por sempre estar disponível para ensinar e mostrar caminhos a seguir. Agradeço ao meu amigo Luís Fabiano Palaretti que esteve sempre junto e contribuindo com seus conhecimentos.

Agradeço à empresa DISA, Destilaria Itaúnas, por ter cedido a área experimental e agradeço também ao gerente agrícola e amigo Juliano Beleboni por dar o incentivo e ter a compreensão nos momentos que tive que ficar ausente para dedicar aos estudos.

SUMARIO

1- INTRODUÇÃO	1
2- REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 –A cultura da cana-de-açúcar	4
2.2 – Aspectos econômicos	5
2.3 – Efeitos da vinhaça no solo	6
2.4.1 – Atributos químicos	8
2.4.1.1 – Macro e micronutrientes	8
2.4.1.2 – Condutividade elétrica (CE)	9
2.4.1.3 – Razão de adsorção de sódio (RAS)	9
2.4.1.4 – pH	10
2.4.2 – Atributos físico-hídricos	11
2.4.2.2 – Curva de retenção, Disponibilidade de água no solo e Água prontamente Disponível	11
2.4.2.3 - Condutividade hidráulica do solo (Kfs)	13
3- MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 – Caracterização da área experimental.....	16
3.2 – Atributos químicos do solo.....	19
3.2.1 - Razão de absorção de sódio (RAS)	20
3.2.2 – Condutividade elétrica do solo (CE)	20
3.3 – Análise físico-hídrico do solo.....	21
3.3.1 – Análise textural	22
3.3.2 - Curva de retenção, Disponibilidade de água no solo e Água prontamente Disponível .	23
3.3.3 - Condutividade hidráulica do solo (Kfs)	24
4- RESULTADOS	26
4.1 - Análise nutricional e atributos químicos do solo	26
4.1.1 - Razão de absorção de sódio (RAS)	30
4.1.2 – Condutividade elétrica do solo (CE)	31
4.1.3 – pH	33
4.2 - Atributos físico-hídricos do solo	34

4.2.1 - Curva de retenção, disponibilidade de água no solo, água prontamente Disponível e densidade do solo.....	34
4.2.2 - Condutividade hidráulica do solo (Kfs).....	39
5- CONCLUSÕES.....	41
6- REFERÊNCIAS	42

RESUMO

MUNDIM, Daniel Alves; M. Sc.; Universidade Federal do Espírito Santo; Maio de 2016; **Alterações químicas e físicas do solo sob manejo de vinhaça por longos períodos**. Orientador: Robson Bonomo; Co-orientador: Fábio Ribeiro Pires.

A utilização de vinhaça na fertirrigação é uma prática comum às indústrias produtoras de açúcar e álcool e a sua correta distribuição no solo é responsável por melhorias nos atributos físicos e químicos deste recurso natural, porém a aplicação desordenada pode influenciar negativamente e contribuir para uma inviabilização de práticas agrícolas. Deste modo este trabalho teve como objetivo identificar e analisar as alterações ocorridas em um solo Argissolo Vermelho-amarelo distrófico localizado na fazenda Cordanta J no município de Conceição da Barra - ES onde a prática de utilização de vinhaça já ocorre há mais 15 anos, tendo como comparação área de cana-de-açúcar sem fertirrigação, fazenda Cordanta P, área de eucalipto, fazenda Aliança e área de mata nativa. Os tratamentos foram analisados em um delineamento casualizado no esquema fatorial 4 (Ambiente) x 4 (Profundidade) com 04 repetições, onde foram retiradas amostras de solo deformadas e indeformadas nas profundidades de 0-20, 20-40 40-60 e 60-80 (cm). Foram avaliados os atributos físicos retenção de água no solo, densidade de partículas e condutividade hidráulica, a atributos químicos concentrações de macro e micronutrientes, pH e matéria orgânica, além da condutividade elétrica (CE) e a razão de absorção de sódio (RAS). Os resultados mostraram que o solo sob mata nativa apresentou maior capacidade de retenção de água enquanto a área fertirrigada apresentou menor capacidade e também menor quantidade de água disponível (AD) e água prontamente disponível (APD); houve também uma redução significativa na condutividade hidráulica do solo do ambiente fertirrigado nas camadas mais profundas indicando compactação. Houve aumento significativo dos nutrientes fósforo-Mehlich (mg dm^{-3}), potássio (mg dm^{-3}), enxofre (mg dm^{-3}), zinco (mg dm^{-3}) e sódio (mg dm^{-3}) na área fertirrigada; já o pH e a matéria orgânica não apresentaram diferenças significativas entre os ambientes. Os valores de sódio foram significativamente maiores na área de mata nativa, conseqüentemente, os valores de RAS e CE também foram superiores neste ambiente. De modo geral, na área fertirrigada, houve uma melhoria nos atributos químicos do solo em comparação às áreas onde não houve aplicação de vinhaça. Com relação aos atributos físicos do solo, a redução significativa da condutividade hidráulica (Kfs) parece estar associada ao acúmulo de sais de potássio (K) que apresentaram alto teor nesta área e também é o principal nutriente encontrado na composição da vinhaça.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, vinhaça, condutividade hidráulica do solo, atributos físico-químicos do solo.

ABSTRACT

Mundim, Daniel Alves; M. Sc .; Federal University of Espirito Santo; May 2016; **Chemical and physical changes in the soil under vinasse management for long periods**. Advisor: Robson Bonomo; Co-supervisor: Fabio Ribeiro Pires.

The use of vinasse in fertigation is common practice to industries producing sugar and alcohol and its proper distribution in the soil is responsible for improvements in the physical and chemical attributes of this natural resource, but the disorderly application can negatively influence and contribute to the impracticability of agricultural practices. Thus this study aimed to identify and analyze the changes in a red yellow podzolic soil dystrophic located in Cordanta J farm in the municipality of Conceição da Barra - ES where the practice of using vinasse has been going on for over 15 years, with the comparison to farm Cordanta P, area of sugarcane without fertigation, farm Aliança with eucalyptus area and native forest. Treatments were performed in a randomized design in a factorial 2 (Environment) x 4 (depth) with 04 repetitions where disturbed soil samples were taken and undisturbed in the depths of 0-20, 20-40 40-60 and 60-80 (cm). Soil samples were sent CEUNES soil physics laboratory where they were evaluated water retention curve characteristics on the ground, density, hydraulic conductivity. For Chemical analyzes deformed samples were sent to Fullin laboratory which analyzed the concentrations of macro and micro nutrients, organic matter and pH were also analyzed electrical conductivity (EC) and sodium absorption ratio (SAR). The results showed that the soil with native plants had higher water retention capacity while fertigated area showed lower capacity and also lower amount of water available (WA) and readily available water (RAW), there was a significant reduction in hydraulic conductivity in the fertirrigated environment in deeper layers indicating compression. The determination coefficient of adjustment of the water retention curves in soil is greater than 99% and adjustment parameters increased with depth. A significant increase in phosphorus-Mehlich nutrients (mg dm^{-3}), potassium (mg dm^{-3}), sulfur (mg dm^{-3}), Zinc (mg dm^{-3}) and sodium (mg dm^{-3}) in fertigated area, pH and organic matter showed no significant difference between the environments. Sodium levels were significantly higher in the area of native forest, hence the SAR and EC values were higher at this location. Overall, there was an improvement in soil chemical properties in comparison to areas where there was no application of vinasse. Regarding to the physical soil characteristics, the significant reduction in hydraulic conductivity (KFS) appears to be associated with the accumulation of salts of potassium (K) that showed high content in this area and is also the main nutrient found in the composition of vinasse.

Keywords: cane sugar, vinasse, hydraulic conductivity, physical and chemical soil characteristics.

1- INTRODUÇÃO

A vinhaça é um resíduo líquido proveniente da destilação do vinho para a obtenção do álcool. Caracteriza-se pela alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sendo uma relação de 10 – 15:1 entre vinhaça e álcool, porém este resíduo é rico em matéria orgânica sob forma de ácidos orgânicos em menor quantidade, por cátion como K, Ca e Mg.

Embora seja considerada uma forte agente poluidora quando utilizada sem critério, sua aplicação no solo, respeitando-se as leis de disposição de resíduos (Decreto-Lei nº 303, de 28 de fevereiro de 1967), bem como o volume adequado, apresenta-se como uma alternativa de adubação orgânica.

Este processo de aplicação da vinhaça no canavial é chamado de fertirrigação. Sendo prática comum de uso em empresas do ramo sucroalcooleiro.

O uso da vinhaça promove melhorias na produtividade agrícola da cana. Os benefícios ao solo que recebe este fertilizante também são relevantes, com melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas, condicionando o solo a uma maior capacidade de armazenamento (fase líquida) e maior agregação, conservando o mesmo, além de gerar economia com a aquisição de fertilizantes.

O grande efeito nocivo está nas alterações que esta aplicação causa quando realizada de forma errônea e sem critérios técnicos de planejamento, execução e acompanhamento e avaliação.

Este fertilizante orgânico quando aplicado em doses adequadas à nutrição da cana-de-açúcar, ou seja, utilizando a recomendação de adubação em potássio, não causa qualquer problema de salinização ou de lixiviação de íons que possa prejudicar o ambiente, resultando em incrementos na produtividade, economia de divisas e reciclagem de nutrientes, permitindo uma produção mais sustentável (Quadro 01) (COOPERCITRUS, 2013).

É importante lembrar o caráter orgânico desse resíduo, o que faz com que órgãos certificadores de agricultura orgânica, tornem perfeitamente aceitos seu uso em programas de selo verde. O fato de que a aplicação da vinhaça promove muito mais ganhos ambientais do que perdas, desde que sejam criteriosas as aplicações, logo se deve pensar na mesma como fonte de nutrientes, que são totalmente benéficos para a agricultura, em geral, e é a cana-de-açúcar quem absorve quase toda a sua produção.

Quadro 01: produtividade ao longo de estágios em áreas irrigadas ou fertirrigadas em comparativo com áreas não irrigadas ou fertirrigadas.

Núm. cortes	Produtividade Potencial (t ha ⁻¹)	
	<i>Não irrigada*/fertirrigada</i>	<i>Fertirrigada/ irrigada*</i>
1.º(12 meses)	75	90
1.º(18 meses)	80	104
2.º	70	91
3.º	65	88
4.º	55	77
5.º	45	68
6.º	-----	65
7.º	-----	60
Média	65	80

(COOPERCITROS, 2013)

*Considerando uma irrigação de salvação

Embora haja estudos sobre cana-de-açúcar elaborados por diversas instituições do país, a maioria deles está voltada para solucionar problemas locais, fato que implica na implantação e desenvolvimento de pesquisas voltadas para a região norte do estado do Espírito Santo.

O objetivo deste trabalho foi identificar a alteração que a utilização da vinhaça ao longo de vários anos exerceu nos atributos químicos (macro, micronutrientes, pH, matéria orgânica, condutividade elétrica e razão de absorção de sódio) e físicas do solo (condutividade hidráulica, curva de retenção de água e densidade do solo) de modo que permita identificar possíveis melhorias e/ou problemas no manejo deste subproduto. Os resultados também poderão mostrar se o uso deste resíduo ao longo dos anos contribui ou não para a incremento na qualidade deste solo.

2- REVISÃO DE LITERATURA

2.1 –A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), pertence à família Poaceae e à classe monocotiledônea. Apresenta metabolismo C₄ em maiores temperaturas (30 – 40°C) possuem alto desempenho fotossintético em comparação com plantas de metabolismo C₃, pois necessitam de concentrações menores de CO₂, apresentando então taxa de crescimento maior entre os meses mais quentes em nossa região, portanto de outubro a maio (TAIZ e ZEIGER, 2004).

De modo geral com relação às exigências climáticas, a cana-de-açúcar apresenta certas exigências com relação à sua fase de desenvolvimento, na fase de brotação, perfilhamento e crescimento vegetativo, também conhecido como fase de crescimento rápido, a cultura exige umidade, temperatura elevada, na fase de maturação, também conhecido como fase de crescimento lento, a cana exige temperatura baixa e tempo seco para que entre em fase de maturação acumulando grandes quantidades de sacarose, que é o açúcar de maior interesse para a atividade industrial (ANDRADE e CARDOSO, 2004).

Considerada historicamente como um dos principais produtos agrícolas do Brasil, vem sendo cultivada desde a época da colonização. De seu processamento obtêm-se o açúcar (nas suas mais variadas formas e tipos), o álcool (anidro e hidratado), o vinhoto e o bagaço.

Devido a grandeza dos números do setor sucroalcooleiro no Brasil a cana-de-açúcar é tida como o principal tipo de biomassa energética, base para todo o agronegócio sucroalcooleiro.

2.2 – Aspectos econômicos

Abrigando atualmente 6 das 343 unidades processadoras de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool, o Estado do Espírito Santo foi responsável pelo processamento de 0,53 % do total de matéria prima processada no Brasil na safra de 2015/16, valor que corresponde a 2.833 mil toneladas e estima-se que na safra de 2016/17 o estado tenha uma queda de produção superior a 20% devido ao déficit hídrico que atingiu a região norte do estado (CONAB, 2015).

Os primeiros engenhos de cana-de-açúcar para produção de açúcar e aguardente surgiram em São Mateus em 1605. No entanto, a partir do ano de 1815, quando o café começou a ser cultivado no Estado, a cana-de-açúcar começou a perder espaço sendo superada com o primeiro surto cafeeiro no ano de 1850 (ROCHA & COSSETI, 1983).

Jerônimo Monteiro, então governador do Estado do Espírito Santo, instalou entre 1911-12 a Usina Paineiras no sul do estado com o objetivo de dinamizar a economia da região que era extremamente dependente do café. E, dadas suas potencialidades na produção do álcool, o Estado do Espírito Santo implantou mais 6 destilarias além de modernizar a usina Paineiras tornando-se quase autossuficiente na oferta do álcool, embora continuasse um grande importador de açúcar (INCAPER, 2009). Além do que, o Estado não recebe nenhum subsídio e/ou intervenção do governo, como o faz os Estados do nordeste brasileiro e a região de Campos-RJ. Fato esse que contribui para a independência e o compromisso de construir uma atividade economicamente viável (UDOP, 2010).

O Estado do Espírito Santo criou em 2003 o Plano Estratégico 2025 que estabelece metas e estratégias setoriais a alcançar ao longo de duas décadas. Este plano relaciona ações para todos os setores do agronegócio capixaba, inclusive o setor sucroalcooleiro que terá

ações nas esferas jurídicas, ambientais, trabalhistas, logística e pesquisas para elevar a produtividade dos canais do Estado (SEAG, 2007).

O Estado do Espírito Santo vem sofrendo com irregularidades pluviométricas nos últimos 5 anos e este fato tem comprometido ainda mais o setor sucroalcooleiro do Estado, alternativas a falta de umidade e nutrientes no solo devem ser consideradas importantes para diminuir a influência do regime pluviométrico na produtividade das lavouras do Estado.

Somente nos últimos dois anos 03 (três) unidades produtoras deixaram de produzir na região, comprometendo a renda de agricultores e causando desempregos diretos e indiretos. A produtividade média do Centro Sul do país, principal região produtora, é de cerca de 70,5 ton./ha frente a 46,3 ton./ha de média do Estado capixaba. (CONAB, 2015).

Buscar alternativas e identificar possíveis manejos que possam somar para uma melhor produtividade poderá contribuir para a sustentabilidade e viabilidade econômica deste setor no Estado.

2.3 – Efeitos da vinhaça no solo

Não há dúvida com relação aos benefícios que o reaproveitamento de resíduos promove ao meio ambiente. No caso da indústria sucroalcooleira, a torta de filtro e a vinhaça são exemplos que são reaproveitados nas lavouras em forma de adubação e irrigação. Porém, o potencial poluidor desses resíduos resultaram em leis e normas que regem e fiscalizam estas atividades, como por exemplo, a Normativa P4.231 elaborada pela CETESB-SP e que é seguida por outros estados produtores como o Espírito Santo.

Esta normativa baseia-se em na análise de solo no perfil de 0-80 que é realizada periodicamente em áreas fertirrigadas, visando repor somente a quantidade necessária de potássio, que é de 185 kg ha⁻¹ por corte, limitando a concentração máxima que não poderá exceder 5% da Capacidade de Troca Catiônica – CTC, para tanto, foi criada a fórmula que define os limites máximos de aplicação, equação (A) (CETESB, 2006).

$$Q \text{ (m}^3 \text{ de vinhaça/há)} = \frac{[(0,05 * CTC - K_{so}) * 3744 + 185]}{K_{si}} \quad (A)$$

Em que:

- **0,05** = 5% da CTC;
- **CTC** = Capacidade de Troca Catiônica, expressa e, dada pela análise de fertilidade do solo;
- **K_s** = concentração de potássio no solo, expresso em cmolc dm⁻³, à profundidade de 0 a 0,80 metros, dada pela análise de fertilidade do solo;
- **3744** = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc dm⁻³ ou meq 100cm⁻³, para kg de potássio em um volume de 1 (um) hectare por 0,80 metros de profundidade;

O uso indiscriminado desses recursos pode resultar em danos ambientais e a aplicação de vinhaça no solo sem nenhum critério para definir dosagens e lâminas podem resultar na inviabilização do uso deste recurso.

As mudanças nas propriedades químicas do solo promovidas pela aplicação da vinhaça podem alterar a estabilidade de agregados e a dispersão de argila do solo, influenciando na sua compactação, cujas principais consequências são: o aumento da densidade, a diminuição do tamanho dos poros e a redução da condutividade hidráulica (KLEIN& LIBARDI, 2002).

Este contexto é fundamentado na agricultura sustentável devido à reciclagem de água e nutrientes para o solo cultivado, o manejo da cana-de-açúcar que contempla a aplicação de vinhaça, também mitiga os efeitos dessa monocultura sobre o ambiente. Neste sentido, o controle da aplicação da vinhaça no solo pelas usinas alcooleiras e seus prováveis efeitos sobre o ambiente, devem ser controlados com monitoramento contínuo.

Silva et al. (2007) alertam que, quando aplicada em altas doses, pode acarretar efeitos indesejáveis como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, salinização do solo e poluição do lençol freático.

2.4.1 – Atributos químicos

2.4.1.1 – Macro e micronutrientes

No geral as pesquisas que tratam deste assunto evidenciam uma melhoria nas condições químicas dos solos tratados com vinhaça ao longo do tempo, devido ao fornecimento de nutrientes e aumento de matéria orgânica. O potássio é o principal nutriente que compõe a vinhaça, e sua aplicação no campo é determinada pela diferença entre quantidade existente em sua composição e a quantidade existente no solo. Medeiros et al., (2003) relataram aumento de pH, teores de cálcio, magnésio e potássio, sendo que quando aplicada adequadamente, cerca de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, a vinhaça equivale a uma adubação de 61 kg ha^{-1} de nitrogênio, 343 kg ha^{-1} de K e 108 kg ha^{-1} de Ca.

Gonçalves et al., (2009) notou acúmulo de microelementos ferro, zinco e cobre nas camadas mais superficiais de um solo tratado com vinhaça e a presença de maior quantidade de manganês nas camadas mais profundas em solos de canais de vinhaça. Barros et al., (2010) observou em um solo que recebeu vinhaça por 10 anos, a elevação de matéria orgânica, Ca + Mg trocáveis, CTC, V (%), SB, macro e micronutrientes e não havendo efeito sobre o pH. Devido a presença de agente neutralizante da acidez como a matéria orgânica, solos sob manejo de vinhaça tem apresentado redução do H^+/Al (PRADO, 2000).

2.4.1.2 – Condutividade elétrica (CE)

O alto teor de sais encontrados na vinhaça que são aplicadas devido a prática agrícola de fertirrigação implantada nas usinas do setor, evidencia que o uso de técnicas de análise e acompanhamento de características de propriedades do solo, são importantes por indicar caminhos a seguir de modo a evitar a inviabilização do uso agrícola destes solos.

A condutividade elétrica (CE) é usada para estimar a quantidade de sais presente em solução do solo. Quanto maior a quantidade de sais presente na solução, maior será o valor de CE obtido. Tomé Jr. (1997), afirma que o excesso de sais na zona radicular, independentemente dos íons presentes, prejudica a germinação, desenvolvimento e produtividade das plantas.

2.4.1.3 – Razão de adsorção de sódio (RAS)

A sodificação dos solos devido a práticas agrícolas é uma preocupação constante de pesquisadores e produtores, pois o seu efeito reduz capacidade de produção e afeta o desenvolvimento de culturas comerciais como a cana-de-açúcar. A salinização de um solo se da pelo desequilíbrio e excesso de sais como o sódio (Na) e potássio (k), ambos presentes na composição da vinhaça.

A RAS (razão de absorção de sódio) é a relação medida de sódio e íons polivalentes (Ca e Mg) e tem sido utilizada na caracterização de solos sódicos e águas residuárias (ex: vinhaça) e é calculada utilizando a concentração de cátions em soluções aquosas de solo, extratos de saturação e possui uma relação direta com a condutividade elétrica (SANTOS, 2004)

2.4.1.4 – pH

O pH é uma importante informação sobre a alcalinidade e acidez do solo, seus valores são adimensionais e os níveis variam de 0 a 14, sendo o valor 7 caracterizado como neutro, e valores abaixo classificados como ácidos e valores acima classificados como básicos. A maioria das plantas tem sua faixa ideal em torno de 5,5 e 7,0. O variação de pH influencia na disponibilidade de nutrientes para as plantas (MALAVOLTA, 1980).

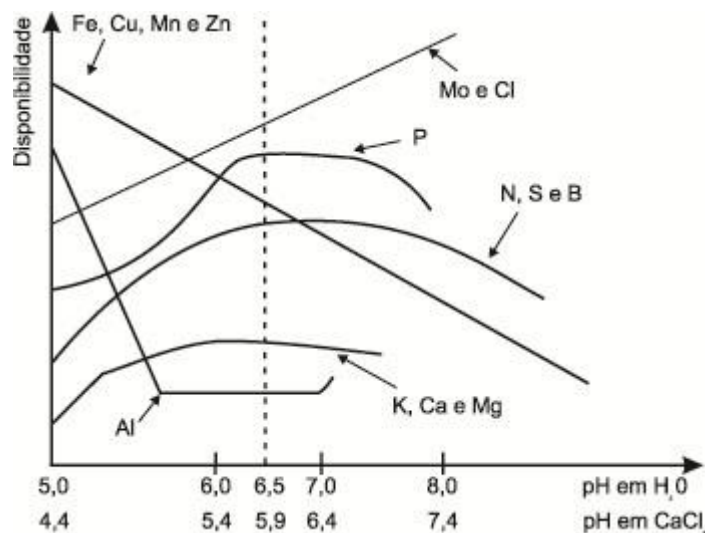


Figura 01: Disponibilidade de nutrientes em função do pH. MALAVOLTA, 1980.

Alterações no pH tem sido relatada em diversos estudos sobre a influência da vinhaça no solo, Brito et al., (2009) relatou aumento de pH e justificou este fato devido a presença de cátions e pela redução do $H^+ + Al$, originário da decomposição da matéria orgânica presente nesse efluente, contrariando Barros R. P. et al., (2010), que não notou alteração deste atributo. Segundo Rodella et al.(1983), o aumento do pH se dá em um primeiro momento logo após a aplicação, voltando a valores originais após certo tempo.

Devido a não ter um comportamento padrão com relação a áreas sob aplicação de vinhaça, entender como esta variável se relaciona com os solos da região se torna importante para nortear medidas agrônômicas para a implantação e continuidade de culturas agrícolas como a cana-de-açúcar.

2.4.2 – Atributos físico-hídricos

2.4.2.2 – Curva de retenção, Disponibilidade de água no solo e Água prontamente Disponível

Dentro dos vários atributos físicos dos solos relacionados ao armazenamento de água no solo e desenvolvimento das plantas está a curva de retenção de água no solo (CRA). A curva de retenção de água no solo expressa a relação entre o potencial mátrico (Ψ_m , kPa) e a umidade do solo (U , $g\ g^{-1}$; θ , $cm^{-3}\ cm^{-3}$) (NASCIMENTO et al., 2010), e esta é uma característica específica de cada solo (BEUTLER et al., 2002).

A curva de retenção de água traz ferramentas para estudos como o balanço de água no solo, a disponibilidade de água às plantas, a dinâmica da água e solutos no solo, a infiltração e o manejo de irrigação. A relação entre a energia com que a água está retida (potencial matricial) e o conteúdo de água no solo (umidade) é expressa pela curva de retenção de água no solo. Esta ferramenta pode fornecer tanto o momento quanto a quantidade de água a aplicar para um manejo correto e adequado de irrigação. A partir dela, podem-se obter, também, os valores de umidade correspondentes à capacidade de campo (θ_{CC}) e ao ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), sendo que a diferença de umidade entre θ_{CC} e θ_{PMP} é definida como a capacidade de água disponível (CAD) de um solo a uma dada profundidade (BARRETO et al., 2011).

A retenção de água é explicada por dois processos, pela capilaridade e adsorção, que estão relacionadas com as forças mátricas, onde o solo retém água com forças cujas intensidades aumentam conforme o seu conteúdo de água diminui, dando origem ao termo potencial mátrico da água no solo (LIBARDI, 2010).

O conteúdo de água retido em determinado Ψ_m decorre da estrutura, da distribuição dos poros, da densidade do solo nos quais fenômenos capilares são de maior importância; quando os fenômenos de adsorção dominam, esta é dependente da textura e da superfície

especifica das partículas minerais da fração argila (HILLEL, 1982; BEAUTLER et al., 2002; REATTO et al., 2007; AJAYI et al., 2009).

A determinação da curva de retenção pode ser feita com diferentes metodologias, como o método da centrifuga (SILVA & AZEVEDO, 2002), e a mesa de tensão ou câmaras de pressão Richards que determinam potenciais até 1500 kPa, utilizando amostras indeformadas e deformadas de solo (EMBRAPA, 1997).

Segundo Dexter (2004), o modelo de ajuste proposto por Van Genuchten (1980), permite relacionar com alto poder de predição, a energia de retenção e disponibilidade hídrica, por isso tem sido adotado universalmente.

Essa equação matemática é caracterizada por apresentar duas assíntotas, relacionadas com os conteúdos de água no solo correspondentes à saturação (U_{sat}) e ao conteúdo residual (U_{res}), e um ponto de inflexão entre os platôs, o qual é dependente dos atributos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (" α ", " n " e " m "), obtidos pelo método dos quadrados mínimos, utilizando recursos computacionais (DOURADO NETO et al., 2000). No ajuste da curva de retenção, é previsível que, quanto maior o número de pontos, mais representativa será a curva de retenção (SILVA et al., 2006).

Segundo Machado et al. (2008), alguns estudos mostram que a curva de retenção de água permite encontrar relações de dependência entre os coeficientes das equação matemáticas que descrevem com diversas propriedades do solo. Como diferentes sistemas de uso e manejo do solo podem promover modificações na sua estrutura e no seu comportamento físico-hídrico, a curva de retenção pode ser utilidade na avaliação da qualidade do solo e nortear práticas sustentáveis de produção agrícola, mediante esta inter-relação.

Um avanço na quantificação da qualidade estrutural do solo, a partir da curva de retenção de água no solo (CRA) foi proposto por DEXTER (2004), introduzindo o índice S (S de "slope" = declividade), o qual é baseado no ponto de inflexão da CRA, onde principal interesse está na inclinação da CRA neste ponto. Tanto a posição do ponto de inflexão, como o coeficiente angular da CRA no ponto de inflexão, são importante. O ponto de inflexão da CRA

é o ponto em que a segunda derivada da curva de retenção é zero e a primeira derivada muda de negativo (convexidade) para positivo (concavidade) (SILVA et al., 2010).

Atualmente o índice S, proposto por Dexter (2004), tem se destacado como uma nova ferramenta de avaliação estrutural do solo, e é definido pela declividade da curva característica de retenção da água do solo em seu ponto de inflexão. Este índice vem sendo aceito como parâmetro indicador da qualidade estrutural de solos por representar a distribuição do tamanho de poros de maior frequência, o que torna possível a comparação direta dos efeitos de diferentes práticas de manejo em diferentes solos (SILVA et al., 2012).

A porosidade microestrutural (poros estruturais compreendendo micro-fendas, fendas, bioporos e macroestruturas produzidas pelo preparo do solo) são os principais responsáveis pela maior declividade S da curva de retenção de água no solo no ponto de inflexão, mostrando que o índice S governa os principais atributos físicos do solo. Uma baixa qualidade física do solo está ligada a solo que apresenta somente porosidade textural (ocorre entre as partículas dos minerais primários). Algumas areias são exceção, já que tais solos geralmente são pouco trabalháveis e apresentam baixas taxas de infiltração de água, dentre outros; portanto, a boa qualidade do solo está ligada à presença de poros estruturais e um correspondente alto valor de S (DEXTER, 2004).

2.4.2.3 - Condutividade hidráulica do solo (K_{fs})

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) é uma das propriedades físico-hídricas do solo que assume relevância por fornecer informações imprescindíveis da capacidade de transporte de água, solutos e substâncias químicas em praticamente todos os mecanismos de fluxo (TREVISAN et al., 2009).

Os processos de infiltração de água no solo, projetos de irrigação e drenagem, perdas de fertilizantes e de solo por erosão e de substâncias químicas por lixiviação são geralmente relacionados ao fluxo de água, o qual influencia todo o processo de utilização dos recursos solo e água (MESQUITA & MORAES, 2004).

A infiltração de água no solo é proporcional à área da seção e à diferença de potencial total da água entre pontos considerados, podendo ser a superfície do solo e um ponto qualquer abaixo, e inversamente proporcional à distância entre estes dois pontos. A condutividade hidráulica se apresenta como o coeficiente de proporcionalidade entre a intensidade de fluxo e as grandezas citadas e expressa a facilidade com que a água se move no solo. Esta relação é descrita pela Lei de Darcy que, em 1856, escreveu uma equação que permite conhecer a condutividade hidráulica (LIBARDI, 2010).

Dentre as variáveis que influenciam este fluxo, a condutividade hidráulica do solo (K) se destaca. Ela é um parâmetro que representa a facilidade com que o solo transmite água. O valor máximo de condutividade hidráulica é atingido quando o solo se encontra saturado, e é denominado de condutividade hidráulica saturada (REICHARDT, 1990).

A condutividade hidráulica do solo saturado sofre influência de atributos do solo tais como: estrutura, textura, homogeneidade, densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total e macro e micro porosidade (TREVISAN et al., 2009), manejo, a composição granulométrica e o teor de matéria orgânica (SILVA et al., 2012).

As práticas culturais adotadas alterando a estrutura do solo influenciam diretamente a K_{sat} , influenciam mais até do que os processos de gênese e formação da estrutura dos solos. Inclusive, devido ao importante efeito do diâmetro dos poros, a variabilidade de K_{sat} em sítios próximos pode alcançar várias ordens de grandeza.

Um dos métodos empregados para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado é o permeâmetro de carga constante, também conhecido como permeâmetro de Guelph (SCHERPINSKI et al., 2010). Segundo Silva et al. (2012) nos últimos anos diversos autores vêm utilizando o permeâmetro de Guelph. Este instrumento é composto de uma garrafa de Mariotte que controla a carga constante da água. O reservatório de água é formado por um tubo acrílico com régua graduada e um tripé, que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares. O permeâmetro de Guelph, segundo Reynolds et al. (1983), é utilizado para a medição em campo, na ausência do lençol freático, da zona da condutividade hidráulica do solo saturado e do potencial de fluxo matricial, até uma profundidade de 2 m (SCHERPINSKI et al., 2010).

Outro método utilizado é o de laboratório, utilizando amostras indeformadas, sendo que o seu limitante é a alteração que ocorre no solo devido a sua retirada, o que faz ocorrer uma variação da K_{sat} entre os métodos de campo (permeâmetro de Guelph) e de laboratório.

A variação entre medidas de laboratório e campo pode ser devida às diferenças inerentes de cada método. Exemplificando, o permeâmetro de Guelph mede a componente horizontal e vertical de K_{sat} sob condições anisotrópicas, enquanto o método de laboratório determina os valores verticais de K_{sat} . Portanto, comparar valores obtidos de K_{sat} por diferentes métodos não leva a conclusões objetivas (MESQUITA & MORAES, 2004).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Caracterização da área experimental

O trabalho foi realizado em áreas com cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), em um solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, na área fertirrigada na fazenda Cordanta J (39°52'20"W e 28°26'04"S), em área não fertirrigada e cultivada com cana-de-açúcar na fazenda Cordanta P (39°51'43"W e 18°26'21"S), pertencentes à empresa DISA, Destilaria Itaúnas SA, tendo como comparação uma área de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) na fazenda Aliança (39°52'18"W e 18°26'01"S) pertencente à Suzano Papel e Celulose e uma área de mata nativa (39°52'22"W e 18°25'57"S), todas localizadas no município de Conceição da Barra – ES.

O relevo da área é plano a suave ondulado, com predominância de platôs característicos dos Tabuleiros Costeiros. O clima do município de Conceição da Barra é Am, segundo classificação de Köppen, caracterizado por clima tropical úmido, com inverno seco e chuvas máximas no verão. A precipitação média anual de 1.333 mm concentra-se entre os meses de novembro a março. A temperatura média anual é de 23°C e as médias máximas e mínimas são de 29°C e 18°C, respectivamente (NÓBREGA et al., 2008).

O delineamento experimental empregado foi o inteiramente casualizado em um esquema fatorial 4 (ambiente) x 4 (profundidade) com quatro repetições, sendo, 04 ambientes: área cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada, área cultivada com cana-de-açúcar não fertirrigada, área de eucalipto e área de mata nativa; e 04 profundidades (cm): 0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm.

A área fertirrigada localizada na fazenda Cordanta J, cultivada com a variedade RB86-7515, e atualmente em seu 4º estágio, teve seu primeiro plantio realizado em 1998 e no ano 2000 passou a receber vinhaça como fonte de água e nutrientes. A partir do ano de 2009, suas características químicas vêm sendo monitoradas com o objetivo de atender à legislação ambiental que regula esta atividade e determinar doses de vinhaça a serem aplicadas a cada ano safra. Por questões operacionais o acompanhamento não foi realizado no ano de 2010 (tabela 01). As análises físico-hídricas e estudos comparativos foram somente realizados a partir deste estudo.

TABELA 01 Quantidade de vinhaça aplicada na área fertirrigada e teores nutricionais, encontrados no solo na camada de 0-80, e entre os anos de 2009 e 2014.

ÁREA FERTIRRIGADA							
Parâmetro	Unidade	2009	2010	2011	2012	2013	2014
	m ³	111.790	272.776	277.055	190.458	346.092	239.634
Vinhaça	Lâmina total, mm	111,8	272,8	277,1	190,5	346,1	239,6
	N. Lâminas	3	3	4	3	4	5
	mm/Lâmina	37,3	90,9	69,3	63,5	86,5	47,9
Fósforo-Mehlich	mg dm ⁻³	10,30		11,00	18,57	45,50	20,71
Potássio	mg dm ⁻³	26,70		47,00	49,00	51,17	53,86
Cálcio	cmolc dm ⁻³	0,81		1,00	0,86	1,03	1,60
Magnésio	cmolc dm ⁻³	0,18		0,28	0,13	0,18	0,27
Enxofre	mg dm ⁻³	9,50		4,00	11,57	6,83	2,86
Alumínio	cmolc dm ⁻³	0,11		0,12	0,09	0,05	0,00
Cobre	mg dm ⁻³			0,18		2,22	
Ferro	mg dm ⁻³			155,00		282,33	
Manganês	mg dm ⁻³			13,00		19,33	
Sódio	mg dm ⁻³	12,50		23,20	21,71	24,67	22,00
Zinco	mg dm ⁻³			6,64		4,07	
Matéria orgânica	dag/dm ³	1,99		1,80	2,54	1,80	2,19
pH em água	-	5,62		5,74	5,71	5,88	6,06
Saturação de bases (v)	%	33,39		43,30	31,80	38,63	51,06
CTC a pH 7,0 (t)	cmolc dm ⁻³	3,12		3,42	3,53	3,20	3,84
CTC efetiva	cmolc dm ⁻³	1,17		1,52	1,21	1,38	2,01
H + AL	cmolc dm ⁻³	2,06		2,02	2,40	1,87	1,83

A área não fertirrigada localizada na fazenda Cordanta P, cultivada com a variedade SP83-2847, atualmente no 5º estágio, teve seu primeiro plantio realizado no ano de 1998 e no ano de 2011 passou a ter os teores de nutrientes monitorados com o objetivo principal de comparar com áreas que recebem a aplicação de vinhaça (tabela 02).

TABELA 02 - Valores nutricionais encontrados nas análises de solos realizadas na camada de 0-80 e quantidade de vinhaça aplicada na área não fertirrigada entre os anos de 2011 e 2014.

ÁREA NÃO FERTIRRIGADA							
Parâmetro	unidade	2009	2010	2011	2012	2013	2014
	m ³	-	-	-	-	-	-
Vinhaça	Lâmina total, mm	-	-	-	-	-	-
	N. Lâminas	-	-	-	-	-	-
	mm/Lâmina	-	-	-	-	-	-
Fósforo-Mehlich	mg dm ⁻³	-	-	6,00	9,00	18,25	4,33
Potássio	mg dm ⁻³	-	-	14,50	19,00	18,75	9,67
Cálcio	cmolc dm ⁻³	-	-	1,35	1,67	1,03	0,93
Magnésio	cmolc dm ⁻³	-	-	0,40	0,20	0,18	0,17
Enxofre	mg dm ⁻³	-	-	3,75	10,67	3,75	2,33
Alumínio	cmolc dm ⁻³	-	-	0,00	0,10	0,23	0,30
Cobre	mg dm ⁻³	-	-	0,20		1,75	
Ferro	mg dm ⁻³	-	-	75,75		175,00	
Manganês	mg dm ⁻³	-	-	25,00		18,25	
Sódio	mg dm ⁻³	-	-	8,75	6,67	11,75	4,67
Zinco	mg dm ⁻³	-	-	5,53		2,38	
Matéria orgânica	dag/dm ³	-	-	1,48	3,00	1,88	1,67
pH em água	-	-	-	6,13	6,13	5,58	5,33
Saturação de bases (v)	%	-	-	54,13	51,67	35,33	34,73
CTC a ph 7,0 (t)	cmolc dm ⁻³	-	-	3,20	3,63	3,55	3,23
CTC efetiva	cmolc dm ⁻³	-	-	1,75	2,00	1,45	1,40
H + AL	cmolc dm ⁻³	-	-	1,45	1,73	2,33	2,13

As características da vinhaça foram fornecidas pela empresa, e segundo dados locais, as amostras se referem às análises de características químicas encontradas na composição deste subproduto e foram realizadas no laboratório FULLIN, no município de Linhares-ES (tabela 03).

Tabela 03. Resultados analíticos das características químicas encontradas na vinhaça no período de 2011 a 2013.

Parâmetro	Unidade	2011	2012	2013
Cálcio Total	mg L ⁻¹	230,2	635	406
Condutividade elétrica	µS cm ⁻¹	4.340	6030	3520
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg L ⁻¹	4.595	600	-
Demanda Química de Oxigênio	mg L ⁻¹	23.360	17.444	-
Dureza total	mg L ⁻¹	1.199	2.104	-
Fosfato	mg L ⁻¹	60	118	69
Magnésio total	mg L ⁻¹	152	126	187
Nitrato	mg L ⁻¹	68	78	-
Nitrito	mg L ⁻¹	0,0319	-	-
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	151	397	126
Nitrogênio Total (Kjedahl)	mg L ⁻¹	369	183	178
Potássio Total	mg L ⁻¹	1000	1900	774
pH	mg L ⁻¹	3,91	4,44	4,76
Sódio Total	mg L ⁻¹	625	550	-
Sólidos suspensos Totais	mg L ⁻¹	5150	5100	-
Sulfato	mg L ⁻¹	1.232	1.116	-

A área não fertirrigada cultivada com eucalipto e a área de mata nativa foram selecionadas devido à proximidade e pelas características homogêneas do solo, com o objetivo de isolar o fator vinhaça e cultivo de cana-de-açúcar e possibilitar a análise dessas variáveis e a influência que as mesmas exercem nas diferentes profundidades estudadas. Portanto, foram consideradas áreas “testemunhas”.

3.2 – Atributos químicos do solo

As amostras deformadas de solo, foram retiradas nas camadas de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm com a utilização de trado manual, obedecendo ao número de repetições por local de estudo, que resultaram em 64 amostras no total. Em seguida foram identificadas e enviadas ao laboratório de análises químicas e físicas Fullin, localizado no município de Linhares-ES, para a obtenção dos valores dos parâmetros: fósforo-Mehlich (mg dm⁻³), potássio (mg dm⁻³), enxofre (mg dm⁻³), magnésio (mg dm⁻³), alumínio (mg dm⁻³), H + Al (mg dm⁻³), pH em H₂O, matéria orgânica (mg dm⁻³), ferro (mg dm⁻³), zinco (mg dm⁻³), cobre (mg dm⁻³),

manganês (mg dm^{-3}), boro (mg dm^{-3}), sódio (mg dm^{-3}), soma de bases ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), saturação de bases (V) (%), CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e CTC a pH 7,0 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

3.2.1 - Razão de absorção de sódio (RAS)

A razão de absorção de sódio teve seus valores expressados em $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e realizados em função dos teores de sódio, cálcio e magnésio, obtidos das análises químicas das amostras de solos, e calculados de acordo com a equação 2:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}} \quad (2)$$

Em que:

RAS: Razão de adsorção do solo

Na: teor de Sódio – $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$

Ca: teor de Calcio – $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$

Mg: teor de Magnésio – $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$

3.2.2 – Condutividade elétrica do solo (CE)

A condutividade elétrica do solo foi obtida com a utilização de um condutímetro de bancada Tecnopon MCA 150®, calibrado previamente com solução padrão, usando a proporção 1:2, utilizando-se 20 cm^3 de terra fina seca ao ar (TFSA) e uma porção de 40 cm^3 de água destilada, colocados em um recipiente plástico de 200 ml, agitando manualmente com

a utilização de um bastão de vidro por um minuto. Em seguida permaneceu em repouso por 30 minutos e logo após realizada a leitura, sem agitação (DOLINSKI et al., 2009).

3.3 – Análise físico-hídrico do solo

Para a retirada de amostras de solos deformadas e indeformadas, utilizadas na obtenção da densidade do solo e curva de retenção de água no solo, foram feitas 04 trincheiras de 1 metro de profundidade para cada ambiente estudado (Figura 02) e, com a utilização de anéis cilíndricos, foram retiradas amostras nas profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm de profundidade, que representa o nível médio das camadas de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80.

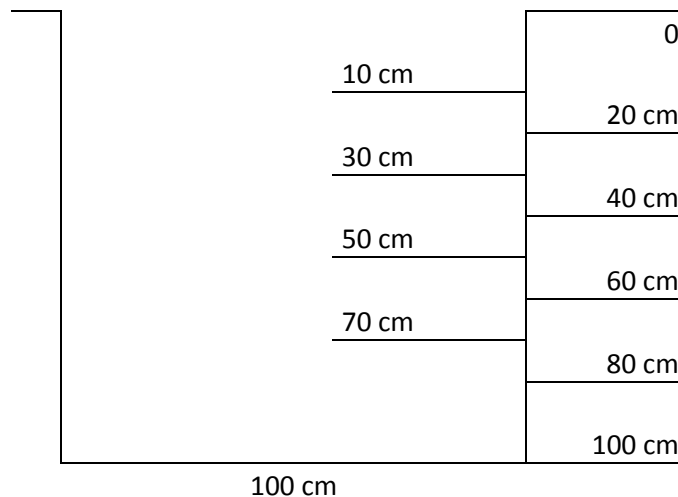


Figura 02: Formato da trincheira feita para a retirada de amostras indeformadas nas profundidades de 10, 30, 50 e 70 cm, representado as quatro profundidades.

Para a análise física do solo (textura, densidade e retenção de água), as amostras deformadas e indeformadas foram levadas ao Laboratório de Física do Solo do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo (CEUNES/UFES).

3.3.1 – Análise textural

A análise textural foi realizada pelo método da pipeta, baseado no princípio da velocidade de queda das partículas, conforme a Lei de Stokes, utilizando-se como dispersante químico o hidróxido de sódio a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (EMBRAPA, 1997).

Para a dispersão física, empregou-se a agitação lenta de 50 rpm por 16 h em agitador rotatório tipo Wagner. A fração silte foi obtida por diferença entre duas pipetagens, sendo na primeira recolhido silte + argila e, na segunda, apenas argila. A separação da fração areia foi feita por lavagem e peneiramento em peneira com malha de 0,053 mm. Na tabela 4 está apresentada a análise granulométrica.

Tabela 03. Valores médios de areia fina, areia grossa, argila, argila dispersa em água e silte das amostras deformadas de solo analisadas e 04 profundidades e 04 ambientes.

Ambiente	Profundidade (cm)	Areia Fina	Areia Grossa	g . Kg ⁻¹		
				Argila	Silte	Argila Dispersa em água
Fertirrigada	0-20	252,60	730,20	8,40	2,80	6,00
Não fertirrigada		202,70	781,90	8,20	1,90	5,30
Eucalipto		201,80	785,30	7,30	2,00	3,60
Mata		222,00	760,50	8,70	2,40	6,30
Fertirrigada	20-40	282,70	695,00	11,10	3,70	7,50
Não fertirrigada		202,60	779,90	9,00	2,00	6,50
Eucalipto		191,90	794,70	7,00	2,10	4,30
Mata		228,20	748,90	12,10	1,80	9,00
Fertirrigada	40-60	379,40	575,30	22,00	5,10	18,20
Não fertirrigada		309,20	659,60	14,80	3,70	12,60
Eucalipto		326,40	637,50	17,30	4,90	13,90
Mata		306,20	657,50	18,90	3,90	13,50
Fertirrigada	60-80	420,20	505,80	37,60	6,20	30,20
Não fertirrigada		278,70	682,00	17,10	7,70	14,60
Eucalipto		387,80	566,50	22,60	5,30	17,70
Mata		311,30	634,30	30,30	2,80	21,30

A determinação da argila dispersa em água foi realizada adicionando 50 g de solo a 125 ml de água destilada, agitando-se com bastão de vidro e deixando em repouso durante uma noite. Em seguida transferiu o conteúdo para o copo metálico do agitador, e em seguida passou-se a solução na peneira de 0,075 mm, lavou-se a areia e completou com o volume de 1.000 ml e agitou-se por 20 segundos e após 90 minutos efetuou a leitura do densímetro (EMBRAPA, 1997).

3.3.2 - Curva de retenção, Disponibilidade de água no solo e Água prontamente Disponível

Para a obtenção da curva de retenção de água no solo utilizou-se a câmara de Richards no laboratório de física do solo do CEUNES/UFES. As amostras foram saturadas com água por 24 horas, em seguida foram pesadas (peso de amostra saturada) e colocadas no interior da câmara. As tensões aplicadas foram 10 (capacidade de campo), 30, 50, 100, 300 e 1500 kPa (ponto de murcha permanente). Para cada tensão aplicada, aguardava-se o cessamento da drenagem da água excedente (equilíbrio entre tensão aplicada e umidade relacionada) e em seguida as amostras eram pesadas e colocadas novamente na câmara, ajustando-se a próxima tensão.

Finalizadas as aplicações das tensões, as amostras foram colocadas em estufa a temperatura de 105 °C por 48 horas, em seguida, foram pesadas separadamente, o anel, a liga e a membrana e foram descontados do peso da amostra (peso do solo seco) (EMBRAPA, 1997).

A umidade gravimétrica das amostras (g g^{-1}) foi ajustada para umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) com a utilização da densidade aparente do solo. A partir dos valores ajustados, utilizou-se o método proposto por Van Genuchten (1980), equação 3, para a obtenção da curva de retenção que associa os valores de umidades obtidos no equilíbrio dos respectivos potenciais matriciais.

A umidade de saturação (θ_s), umidade residual (θ_r) e os parâmetro de ajuste α , n e m (m foi considerado dependente de n , equivalendo a $1-1/n$) e o R^2 foram obtidos com o auxílio do programa online SWRC (SEKI, 2007).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi_m)^n]^m} \quad (3)$$

Em que:

θ = Umidade do solo (m^3m^{-3});

θ_r = Umidade do solo na tensão de 1500 kPa (m^3m^{-3});

θ_s = Umidade do solo saturado (m^3m^{-3});

T = Tensão da água no solo (kPa);

α , m, n = parâmetros empíricos da equação, obtidos pelo ajuste do modelo.

A água disponível no solo (AD) foi calculada pela diferença entre os valores obtidos na capacidade de campo (10 kPa) e o teor na tensão de 1500 kPa, considerado o ponto de murcha permanente. A água prontamente disponível é a quantidade obtida pela diferença do teor de água retida a 10 kPa e a 100 kPa (SOUZA, 2013).

3.3.3 - Condutividade hidráulica do solo (Kfs)

As medições de condutividade hidráulica do solo saturado no campo foram realizadas utilizando-se um permeâmetro de fluxo constante (Permeâmetro de Guelph) (Figura 03), de acordo como os procedimentos descritos no manual de instruções operacionais do próprio permeâmetro (SOIL MOISTURE, 2005).



Figura 03. Avaliação de condutividade hidráulica do solo com a utilização do Permeâmetro de Guelph.

As medidas das taxas de infiltração foram realizadas em cargas constantes de 5 cm (R_1) e 10 cm (R_2) de água em intervalos de tempos, nas quatro profundidades apresentadas e nos quatro diferentes ambientes. Por meio das equações (4) ou (5), cuja escolha dependeu da opção de reservatório combinado ou interno utilizado, foi possível determinar a condutividade hidráulica do solo saturado. Registra-se que na área fertirrigada foi necessário a utilização do reservatório interno a partir da profundidade de 40 cm.

$$K_{sat} = (0,0041) (X) (R_1) - (0,0054)(X)(R_1) \quad (4)$$

$$K_{sat} = (0,0041) (Y) (R_2) - (0,0054)(Y)(R_2) \quad (5)$$

Em que:

K_{sat} = condutividade hidráulica do solo saturado (cm s^{-1});

R_1 = taxa de infiltração de água, determinada pelo permeâmetro, para uma carga constante de 5 cm de água;

R_2 = taxa de infiltração de água, determinada pelo permeâmetro, para uma carga constante de 10 cm de água; e

X e Y = constantes fornecidas pelo fabricante do permeâmetro.

No caso do permeâmetro utilizado, as constantes X e Y são respectivamente 35,22 para o reservatório combinado e 2,15 para o interno.

Para a análise estatística foi utilizado o software ASSISTAT®. Os dados foram submetidos à análise de variância e, posteriormente, submetidos ao teste de Scott-knott, a 5% de significância. O teste F, a 5% e 1% de significância, foi aplicado aos valores com o objetivo de verificar a interação entre os tratamentos e as profundidades amostradas.

4- RESULTADOS

4.1 - Análise nutricional e atributos químicos do solo

Nas análises dos resultados de macro, micronutrientes e atributos químicos do solo, não houve interação significativa entre os ambientes e as profundidades para as variáveis magnésio (mg dm^{-3}), alumínio (mg dm^{-3}), H + Al (mg dm^{-3}), ferro (mg dm^{-3}), cobre (mg dm^{-3}), manganês (mg dm^{-3}), matéria orgânica (dag dm^{-3}) e saturação por bases (V) (%), porém apresentaram interação significativa pelo teste F quando se analisa a profundidade (tabelas 05 e 06).

Tabela 05: Atributos químicos do solo, em quatro profundidades de amostragem.

Profundidade (cm)	Magnésio	Alumínio	H + AL	Ferro	Cobre	Manganês	Matéria Orgânica
							dag dm^{-3}
	mg dm^{-3}						
0-20	0,44 a	0,14 b	1,18 b	141,87 b	0,31 a	12,37 a	2,21 a
20-40	0,43 a	0,26 b	2,23 b	166,31 b	0,19 b	6,25 b	1,77 b
40-60	0,19 b	0,49 a	2,67 a	300,81 a	0,11 c	4,00 b	1,20 c
60-80	0,12 b	0,67 a	2,97 a	373,43 a	0,10 c	2,18 b	0,86d

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F.

Os teores de magnésio foram superiores nas primeiras duas profundidades, decrescendo acentuadamente a partir da profundidade de 40 cm, fato também encontrado por Bebé et al. (2009), onde os valores de Mg correlacionaram-se negativamente com a profundidade, ficando retido nas camadas mais superficiais. A vinhaça apresenta valores muito baixos de Mg, modificando moderadamente a concentração nos solos analisados (CANELAS, 2003).

O alumínio e a acidez potencial (H + Al) tiveram comportamento semelhantes (tabela 05), aumentando os teores significativamente nas camadas de 40-60 e 60-80 cm, resultados semelhantes aos encontrados por SILVA et al., (2007). Os teores de ferro também tiveram aumento significativo com o aumento da profundidade, comportamento inverso ao apresentado pelo cobre e manganês que não apresentaram relação significativa com a área fertirrigada, contrariando resultados obtidos por Gonçalves et al. (2009). A matéria orgânica apresentou maiores valores na camada de 0-20 cm, porém os resultados não mostraram relação significativa com a vinhaça. Silva et al. (2007) concluíram que não se deve esperar efeitos de aumento de matéria orgânica devido à adição deste subproduto pois esta se encontra na forma coloidal e facilita a sua decomposição por microrganismos de forma rápida.

Tabela 06: Atributos químicos em quatro profundidades de amostragem.

Ambiente	Alumínio	H + AL	Ferro	Saturação de bases (V)
				%
		mg dm ⁻³		
Fertirrigada	0,15 c	2,03 c	371,18 a	50,41 a
Não fertirrigada	0,31 c	2,20 c	229,37 b	43,62 a
Eucalipto	0,43 b	2,71 b	194,18 b	40,04 a
Mata	0,65 a	3,11 a	187,68 b	25,46 b

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F.

Os teores de alumínio e acidez potencial (H + Al) também apresentaram comportamento similar quando se compara o ambiente como fator isolado. Valores menores foram encontrados na área fertirrigada e não fertirrigada, indicando que, possivelmente, o manejo da cana-de-açúcar nestes locais provocou essa alteração (Tabela 6). A área de eucalipto apresentou valor superior ao da cana-de-açúcar, porém menor que o encontrado

no solo de mata nativa, indicando que a ação antrópica favoreceu a diminuição da concentração dessas variáveis (CANELLAS L. P. et al. 2003).

A área fertirrigada apresentou maior teor ferro em comparação com as demais que não sofreram alterações significativas (Tabela 6), podendo a vinhaça ter contribuído com o aumento desse micronutriente, resultado observado por Gonçalves et al. (2009). Eles observaram acúmulo de ferro nas camadas inferiores de amostras de solo da parte interna e externa de canais de vinhaça.

A interação ambiente e profundidade ocorreu para as variáveis fósforo-Mehlich, potássio, enxofre, zinco e sódio (Tabela 07).

Tabela 07: Atributos químicos em quatro ambientes e em quatro profundidades de amostragem

Ambiente	PROFUNDIDADE (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
Fósforo-Mehlich (mg dm ⁻³)				
Fertirrigada	16,50 aA	6,50 aB	2,50 aC	1,00 aC
Não fertirrigada	4,50 bA	2,25 bA	1,25 aA	1,50 aA
Eucalipto	5,00 bA	2,50 bA	1,50 aA	1,00 aA
Mata	2,50 bA	2,00 bA	1,00 aA	1,00 aA
Potássio (mg dm ⁻³)				
Fertirrigada	58,00 aA	40,00 aB	21,75 aC	13,50 aC
Não fertirrigada	20,50 bA	10,75 bB	7,50 bB	6,50 aB
Eucalipto	25,75 bA	19,25 bA	17,00 aA	14,25 aA
Mata	23,00 bA	25,00 bA	20,75 aA	11,50 aA
Enxofre (mg dm ⁻³)				
Fertirrigada	7.75 bA	7.50 bA	8.00 bA	9.75 cA
Não fertirrigada	8.50 bA	8.25 bA	9.25 bA	9.50 cA
Eucalipto	12.75 aA	10.00 aB	12.00 aA	14.00 bC
Mata	12.00 aA	11.00 aA	9.25 bB	12.25 aA

Zinco (mg dm ⁻³)				
Fertirrigada	0.93 aA	0.50 aB	0.20 aB	0.10 aB
Não fertirrigada	0.90 aA	0.30 aB	0.18 aB	0.10 aB
Eucalipto	1.08 aA	0.60 aA	0.23 aB	0.15 aB
Mata	0.78 aA	0.55 aA	0.33 aA	0.15 aA

Sódio (mg dm ⁻³)				
Fertirrigada	28.25 aA	20.00 aB	14.25 bC	11.50 bC
Não fertirrigada	14.25 bA	9.50 bA	8.00 bA	7.50 bA
Eucalipto	18.00 bA	14.00 bA	12.25 bA	11.25 bA
Mata	18.25 bA	19.25 aA	22.75 aA	18.00 aA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

Os teores de fósforo encontrados na área fertirrigada se concentraram em maior quantidade na camada de 0-20 cm, decrescendo com o aumento da profundidade e sempre em maior quantidade quando comparado com os demais ambientes, que não apresentaram mudanças significativas entre si. Busato et al. (2005), estudando a aplicação de vinhaça em diferentes profundidades (0-20 cm e 20-40 cm), verificaram que, na área com aplicação de vinhaça, foram observadas diferenças de 210% e 267%, respectivamente, no compartimento P-disponível, em relação à área que não recebeu este subproduto, resultado que corrobora com os teores observados (Tabela 07).

O potássio, principal nutriente encontrado na vinhaça, teve seus resultados de acordo com o esperado, em que a maior concentração ocorreu no ambiente fertirrigado nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. Todavia, nas profundidades de 40-60 e 60-80 cm, os teores encontrados nas áreas de eucalipto e mata nativa foram equivalentes ao ambiente fertirrigado, fato que não ocorreu com a área de cana-de-açúcar não fertirrigada (Tabela 11). Barros et al. (2010) definiu que, apesar da sua forma líquida, a vinhaça tende a concentrar o K nas camadas superiores do solo da área fertirrigada. Tal comportamento foi observado na superfície do solo da área fertirrigada, bem como a diminuição dos teores em profundidade, fato verificado por vários pesquisadores, em outras culturas. Resultados semelhantes foram obtido por Bebé et al. (2009).

Os teores de enxofre foram similares nos ambientes fertirrigado e não fertirrigado, apresentando maiores valores de concentração nas áreas de eucalipto seguido de mata nativa (Tabela 07).

O zinco apresentou valores similares entre os ambientes, porém na área fertirrigada e não fertirrigada a sua concentração decresce de acordo com o aumento da profundidade e a partir da camada 40-60 cm esse comportamento também é observado na área de eucalipto. Reis & Monnerat (2002) avaliando canais da região de Campos dos Goytacazes (RJ) também encontraram maiores valores de Zinco em áreas fertirrigadas, tanto com colheita mecanizada crua e colheita manual queimada (Tabela 07).

O sódio, importante sinalizador de salinidade do solo e também presente na vinhaça, apresentou valor significativamente superior na camada 0-20 cm, na área fertirrigada, comparada com as demais. Na camada de 20-40 cm esta concentração foi equivalente na área de mata nativa, e nas camadas 40-60 e 60-80 cm, as concentrações neste último ambiente foram superiores e significativas comparadas com os demais. O ambiente não fertirrigado e eucalipto apresentaram concentrações equivalentes, resultados que concordam com o estudo realizado por Canelas et al. (2003), onde o Na apresentou decréscimo de concentração nos horizontes superficiais em comparação com as testemunhas, explicando que esse fato provavelmente se deu em função da competição pelos sítios de troca desse solo, onde o K, existente em maiores quantidades na vinhaça, deve ter deslocado o Na, facilitando a lixiviação desse elemento, que migrou para os horizontes mais profundos (Tabela 07).

As variáveis CTC efetiva, CTC a pH 7,0 e cálcio não apresentaram diferenças significativas pelo teste F na interação ambiente x profundidade tão pouco quando se compara um dos tratamentos (ambiente e profundidade) isoladamente.

4.1.1 - Razão de absorção de sódio (RAS)

Os resultados das análises indicaram que a área de mata nativa apresentou maior valor significativo da RAS a partir da camada de 20-40 cm, seguida da área fertirrigada, área de eucalipto e área não fertirrigada, que não apresentaram teores significativos entre si.

Acreditava-se que essa variável seria maior em áreas sob manejo de vinhaça, uma vez que este nutriente é encontrado na composição deste subproduto (Tabela 08).

Tabela 08: Razão de absorção de sódio em quatro ambientes e em quatro profundidades de amostragem.

Ambiente	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
	RAS (mmolc . dm ⁻³)			
Fertirrigada	29,33 aA	25,57 bA	23,76 bA	23,91 bA
Não fertirrigada	18,71 aA	15,13 bA	13,58 bA	14,74 bA
Eucalipto	20,95 aA	20,64 bA	22,15 bA	24,82 bA
Mata	29,14 aB	34,45 aB	53,47 aA	53,99 aA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

A RAS expressa o equilíbrio de cátions monovalentes (Na) com divalentes (Ca e Mg), que neste caso apresenta maiores teores de Na no ambiente de mata nativa (tabela 07), causando maior desequilíbrio e por ocasião aumentando valores de CE (tabela 09) pois estão relacionados e diminuindo valores de condutividade hidráulica causado pela aumento da dispersão de argila (MATOS et al., 2014).

4.1.2 – Condutividade elétrica do solo (CE)

Os resultados foram expressos em mS m⁻¹ e as análises estatísticas mostraram diferenças significativas de 1% entre os ambientes e 5% entre as profundidades pelo teste F, mas não houve interação entre os tratamentos. Sendo assim, analisando os fatores de forma independente, quando se comparou as profundidades, os maiores valores significativos foram encontrados na camada de 0-20 cm, enquanto que as demais não diferiram significativamente (Tabela 09).

Tabela 09: Condutividade elétrica do solo em quatro profundidades, função dos ambientes analisados.

Profundidade (cm)	CE (mS/m)
0-20	0,04082 a
20-40	0,03287 b
40-60	0,02787 b
60-80	0,02751 b

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F.

Analisando os ambientes, a área de mata nativa apresentou valores superiores com relação aos demais que não apresentaram diferenças significativas entre si (Tabela 10).

Tabela 10: Condutividade elétrica do solo em quatro ambientes, em função das profundidades de amostragem a analisadas.

Ambiente	CE (mS/m)
Fertirrigada	0,02922 b
Não fertirrigada	0,02519 b
Eucalipto	0,02989 b
Mata	0,04476 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F.

Maiores valores de CE estão relacionados com os teores de sais presentes na solução do solo, ou seja, quanto maior a quantidade de sais maior será a CE, que neste caso pode ser explicada pela maior concentração de Na no ambiente de mata nativa (BRANDÃO & LIMA, 2002),

4.1.3 – pH

Os valores de pH encontrados apresentaram diferenças significativas entre os ambientes e profundidades, sendo que na área fertirrigada houve redução de concentração ao longo do perfil do solo. A área de mata nativa apresentou menores valores, porém não significativos em comparação com os demais ambientes (Tabela 11).

Tabela 11: Valores de pH do solo dos ambientes e profundidades analisadas

Ambiente	PROFUNDIDADE (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
	pH em água			
Fertirrigada	6,15 aA	5,90 aA	5,48 aB	5,33 aB
Não fertirrigada	5,75 aA	5,55 aA	5,43 aA	5,33 aA
Eucalipto	5,65 aA	5,45 aA	5,18 aA	4,80 aA
Mata	5,15 aA	5,00 aA	4,80 aA	4,78 aA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

A não alteração do pH entre os ambientes também foi observada por R. P. de Barros et al. (2010) onde os efeitos de redução do pH do solo podem ser observados logo após a aplicação de vinhaça, porém voltando a valores originais após certo tempo principalmente devido a atividades de microrganismos. Bebé et al. (2009) verificaram que a aplicação de vinhaça ao longo dos anos não alterou o pH dos solos estudados. Diferentemente, Brito et al. (2005) verificaram aumento do pH em todos os solos estudados e com as doses de vinhaça acima de 350 m³ ha⁻¹. Já o fato da diminuição do pH na área fertirrigada também foi constatado no estudo realizado por Maia & Ribeiro (2004) que afirmaram que as camadas mais profundas do solo geralmente apresentam maior acidez em relação às camadas superficiais devido à aplicação de corretivos e adubações que favorecem o aumento do pH do solo.

4.2 - Atributos físico-hídricos do solo

4.2.1 - Curva de retenção, disponibilidade de água no solo, água prontamente Disponível e densidade do solo

O modelo de Van Genuchten utilizado para a obtenção de curva de retenção de água no solo apresentou coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,99 para todas os ambientes e profundidades analisadas, mostrando-se altamente explicativo no intervalo de tensões e umidades avaliadas. Em todos os ambientes o parâmetro α diminuiu com o aumento da profundidade (tabela 12).

Tabela 12: Umidade de saturação (θ_s), umidade de residual (θ_r), parâmetros de ajuste de curva de retenção (α , m e n) e coeficiente de determinação (R^2) determinados em quatro ambientes e em quatro profundidades de amostragem.

Ambiente	PROFUNDIDADE (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
θ_s				
Fertirrigada	0,3704	0,3243	0,3482	0,3583
Não fertirrigada	0,5051	0,5390	0,5030	0,5575
Eucalipto	0,3325	0,4338	0,3978	0,4060
Mata	0,5150	0,4741	0,5100	0,5247
θ_r				
Fertirrigada	0,0007	0,0688	0,0978	0,1610
Não fertirrigada	0,0428	0,0775	0,1009	0,1270
Eucalipto	0,0322	0,0887	0,1289	0,1166
Mata	0,0042	0,0299	0,1424	0,1458
A				
Fertirrigada	1518,10	10358,0	7,7083	1,7667
Não fertirrigada	4,9340	1,1044	2,0274	1,4095
Eucalipto	4,1853	1,9290	0,9121	1,3054
Mata	1753,00	113,41	3,6687	6,9415
N				
Fertirrigada	1,1111	1,2082	1,1616	1,3332
Não fertirrigada	1,4032	1,7676	1,4130	1,5441
Eucalipto	1,4807	1,4883	1,4754	1,4370
Mata	1,1006	1,0897	1,2198	1,1789

M				
Fertirrigada	0,1000	0,1723	0,1391	0,2499
Não fertirrigada	0,2873	0,4343	0,2923	0,3524
Eucalipto	0,3246	0,3281	0,3222	0,3041
Mata	0,0914	0,0823	0,1802	0,1518

R²				
Fertirrigada	1,0000	0,9995	0,9999	0,9997
Não fertirrigada	0,9992	0,9999	0,9997	0,9998
Eucalipto	0,9993	0,9989	0,9997	0,9995
Mata	0,9998	0,9993	0,9996	0,9997

Na camada de 0-20 cm, o ambiente de mata nativa apresentou maior umidade de tensão na capacidade de campo ($pF\ 2 = 10\ kPa$) seguidos pelos ambientes não fertirrigado, fertirrigado e eucalipto, sendo que este último apresentou menor teor de água disponível (AD). O ponto de murcha permanente ($pF = 1.500\ kPa$) apresentou resultados semelhantes em todos os ambientes (Figura 04).

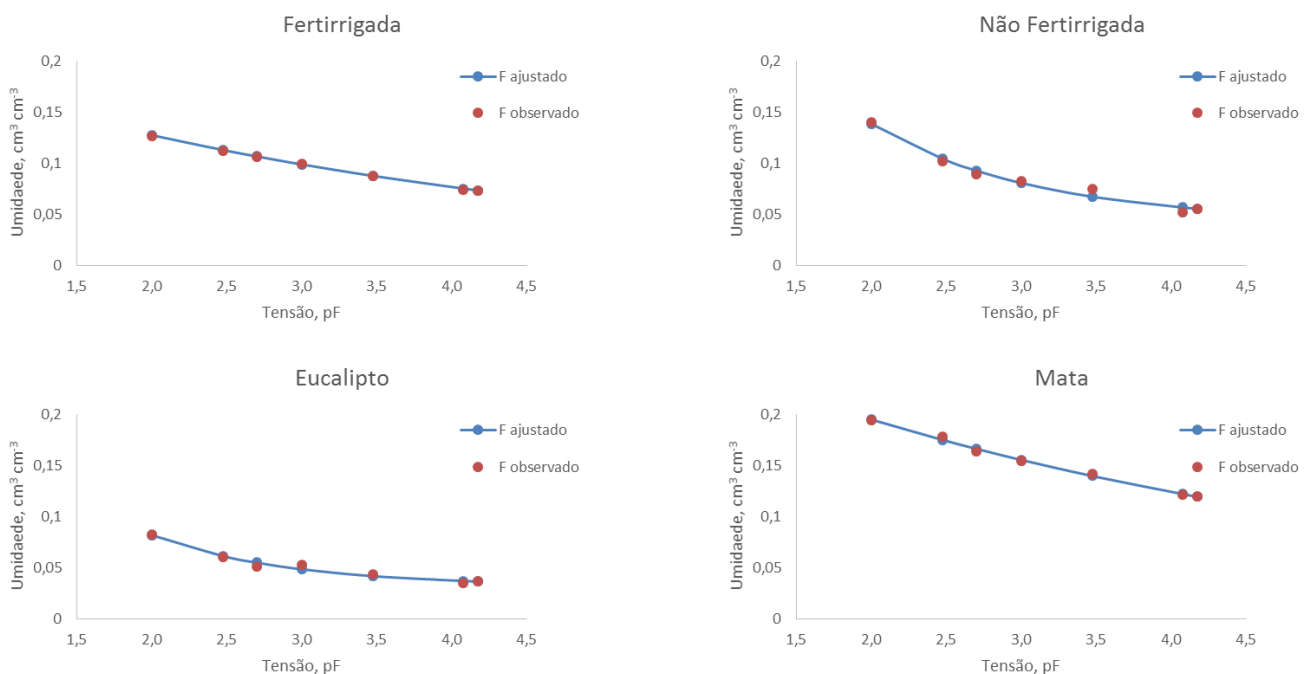


Figura 04: Curva de retenção de água no solo na camada de 0-20 cm de profundidade nos ambientes fertirrigado, não fertirrigado, eucalipto e mata nativa.

Nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-80 cm o ambiente de mata nativa apresentou maior quantidade de água na tensão de capacidade de campo ($pF 2 = 10$ kPa) seguido pelo ambiente de eucalipto, área não fertirrigada e área fertirrigada. O ponto de murcha permanente ($pF = 1.500$ kPa) apresentou comportamento semelhante nos ambientes cultivados com cana-de-açúcar e eucalipto, apresentando menores valores quando comparados ao ambiente de mata nativa e indicando que a realização de práticas agrícolas interferiu na característica de armazenamento de água do solo desta região e nesta profundidade (Figura 05, 06 e 07).

Figura 05: Curva de retenção de água no solo na camada de 20-40 cm de profundidade nos ambientes fertirrigado, não fertirrigado, eucalipto e mata nativa.

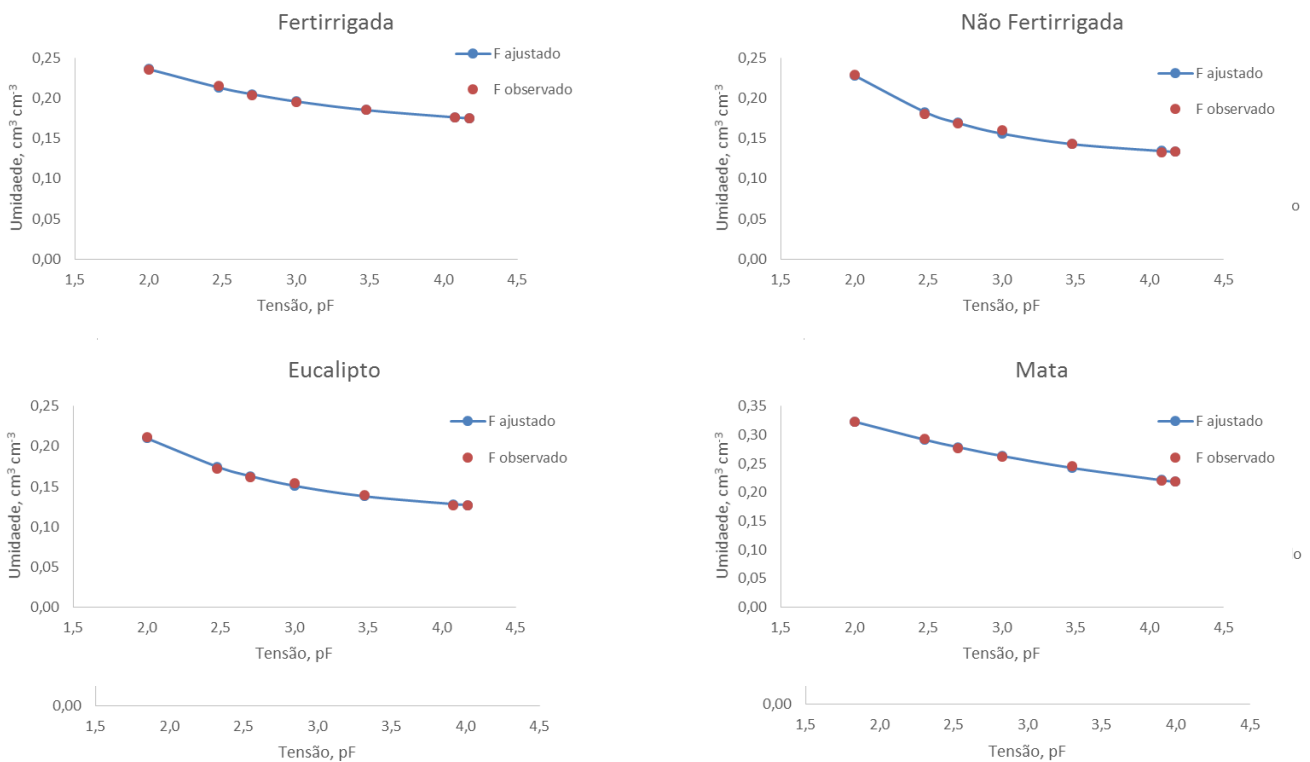


Figura 06: Curva de retenção de água no solo na camada de 40-60 cm de profundidade nos ambientes fertirrigado, não fertirrigado, eucalipto e mata nativa.

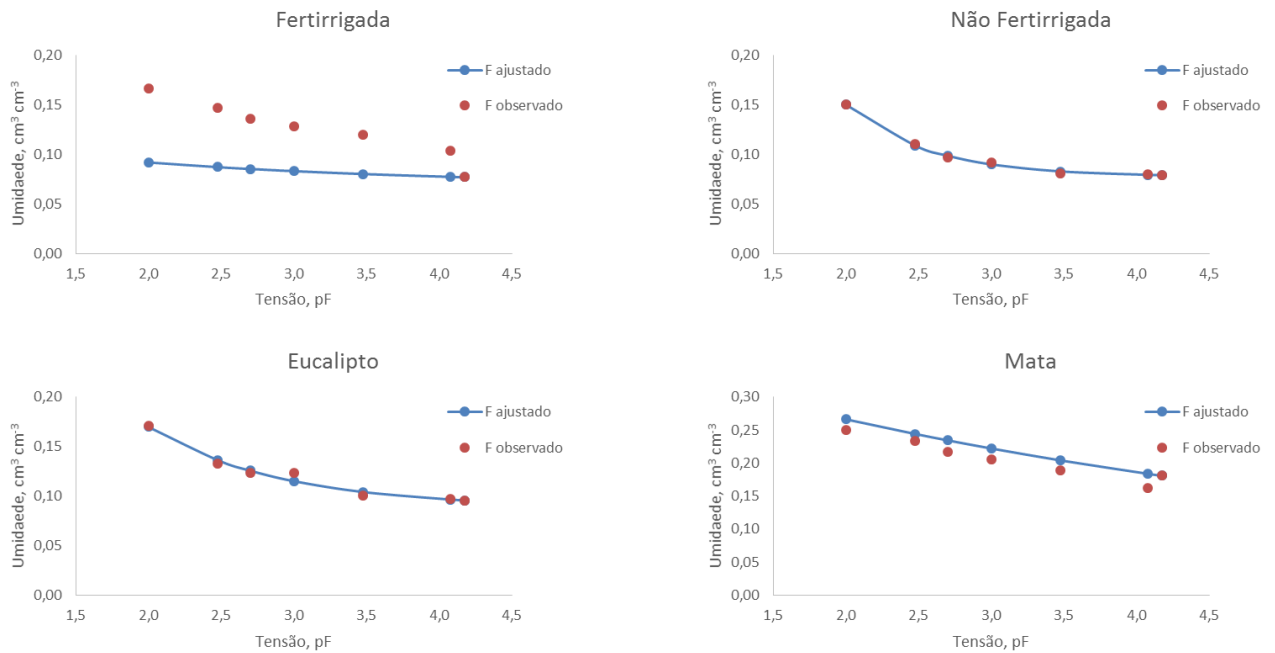


Figura 07: Curva de retenção de água no solo na camada de 60-80 cm de profundidade nos ambientes fertirrigado, não fertirrigado, eucalipto e mata nativa

O ambiente não fertirrigado apresentou maior quantidade água disponível (AD) e água prontamente disponível na profundidade de 0-20. Já o ambiente de mata nativa apresentou maior quantidade de água disponível (AD) em comparação com os outros ambientes nas profundidades de 20-40, 40-60 e 60-80. O ambiente fertirrigado apresentou menor quantidade de água disponível e água prontamente disponível (Tabela 13).

Tabela 13: Água disponível (AD) e água prontamente disponível (APD) em quatro ambientes e em quatro profundidades de amostragem.

Ambiente	Profundidade (cm)	AD	APD
		cm ³ cm ⁻³	
Fertirrigada	0-20	0,05232	0,02863
Não fertirrigada		0,08194	0,05794
Eucalipto		0,04483	0,03333
Mata		0,07306	0,03952
Fertirrigada	20-40	0,01456	0,00879
Não fertirrigada		0,07072	0,06010
Eucalipto		0,07316	0,05459
Mata		0,08251	0,04410
Fertirrigada	40-60	0,06674	0,03845
Não fertirrigada		0,09949	0,07073
Eucalipto		0,08323	0,06143
Mata		0,10800	0,06577
Fertirrigada	60-80	0,06002	0,04021
Não fertirrigada		0,09390	0,07229
Eucalipto		0,08186	0,05906
Mata		0,10191	0,05974

Os resultados encontrados de água disponível (AD) mostraram que, na camada de 0-20 cm, o ambiente não fertirrigado teve maior concentração de umidade em relação aos demais, enquanto que nas camadas partir de 20 cm o ambiente de mata nativa sempre foi superior aos demais. Costa et al. (2009) relatam que modificações na capacidade de campo alteraram a água disponível (AD). O ambiente fertirrigado apresentou os menores valores de umidade em todas as profundidades analisadas.

A densidade do solo (g cm⁻³) também apresentou interação significativa entre os tratamentos analisados (Tabela 14), sendo que na camada inicial o ambiente com a presença de eucalipto apresentou menor densidade, e a partir da camada 40-60 cm teve comportamento similar à área fertirrigada, apresentando os menores valores entre os ambientes. O ambiente com mata nativa apresentou maior densidade significativa nas camadas superiores a 40 cm de profundidade.

Tabela 14: Densidade químicas em quatro ambientes e em quatro profundidades de amostragem

Ambiente	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
	Ds (g cm ⁻³)			
Fertirrigada	1,52 aA	1,62 aA	1,51 bA	1,33 cB
Não fertirrigada	1,70 aA	1,72 aA	1,62 aA	1,59 bA
Eucalipto	1,23 bB	1,54 aA	1,41 bA	1,38 cA
Mata	1,62 aB	1,60 aB	1,78 aA	1,84 aA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

Os valores de densidade do solo nas profundidades de 0-20 e 20-40 foram maiores na área fertirrigada. Nas camadas de 40-60 e 60-80 foram superiores na área de mata nativa, tanto o eucalipto quanto a cana-de-açúcar exigem operações agrícolas que abrangem as camadas de 0 a 80 cm, estas práticas podem ter contribuído para a redução de densidade nestes ambientes.

4.2.2 - Condutividade hidráulica do solo (Kfs)

Os resultados de condutividade hidráulica indicaram uma redução significativa na área fertirrigada a partir da camada de 20 cm de profundidade, onde foi necessário a utilização do reservatório interno do permeâmetro de Guelph. O ambiente não fertirrigado apresentou comportamento similar ao ambiente com eucalipto. O ambiente de mata nativa apresentou valores bem superiores e significativos nas duas primeiras camadas, no entanto, nas profundidades de 40-50 e 60-80 cm, apresentou comportamento estatisticamente similar ao ambiente tratado com vinhaça, ou seja, uma redução significativa (Tabela 15).

Tabela 15: Condutividade hidráulica do solo em quatro ambientes e em quatro profundidades de amostragem.

Ambiente	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
Kfs (cm s ⁻¹)				
Fertirrigada	0,0047 bA	0,0010 bB	0,0001 aB	0,0001 aB
Não fertirrigada	0,0051 bA	0,0024 bA	0,0023 aA	0,0010 aA
Eucalipto	0,0042 bA	0,0024 bA	0,0024 aA	0,0011 aA
Mata	0,0111 aA	0,0086 aA	0,0028 aB	0,0006 aB

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

A redução de condutividade hidráulica também foi observada por Uyeda et al. (2013) e segundo os autores, este fato ocorreu devido ao íon potássio, tal como o sódio, tratar-se de cátion monovalente e que tem a capacidade de promover a dispersão das argilas, podendo levar à redução de poros reduzindo a permeabilidade do solo. Tal justificativa que pode ser aplicada a este estudo que, na avaliação de argila dispersa, apresentou, para a área fertirrigada, maiores valores nas camadas mais profundas (Tabela 4). Solos com baixa condutividade hidráulica dificultam o desenvolvimento das culturas pela baixa absorção de nutrientes, penetração de raízes e aeração deficiente do solo (VARALLO et al., 2010)

5- CONCLUSÕES

1. Houve redução significativa nos teores de alumínio e acidez potencial (H + Al) na área fertirrigada.
2. Valores de pH e matéria orgânica não apresentaram diferenças significativas entre os ambientes analisados.
3. A área fertirrigada apresentou valores significativos e crescentes de ferro (Fe) de acordo com a profundidade, em comparação com os outros ambientes.
4. A área de mata nativa apresentou maior teor de sódio (Na), indicando que as práticas agrícolas provocaram redução significativa deste nutriente no perfil do solo. Ou quem sabe dizer que a aplicação de vinhaça não aumentou os teores de Na no solo.
5. Houve aumento da concentração de Potássio na área fertirrigada com vinhaça.
6. Os teores de água disponível (AD) e água prontamente disponível (APD) foram menores nas áreas fertirrigadas.
7. A condutividade hidráulica (kFs) foi significativamente inferior na área fertirrigada nas profundidades de, 40-60 e 60-80 cm.
8. De modo geral, o solo sob manejo de vinhaça por vários anos apresentou melhoria nas características químicas, porém com relação à física, a condutividade hidráulica, significativamente baixa nesta área, pode limitar os benefícios apresentados, de modo que o acompanhamento desta informação também deve ser levada em consideração na elaboração do planejamento anual de aplicação de vinhaça.

6- REFERÊNCIAS

- AJAYI, A.E.; DIAS JUNIOR, M.S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C.F.; SOUZA, T.T.T. & INDA JUNIOR, A.V. **Strength properties and compaction susceptibility of Brazilian Latosols**. Soil Tillage Res., v.105, p.122-127, 2009.
- ANADRADE, A.L.B. Cultura da cana-de-açúcar. In: CARDOSO, M. das G. (Ed.). Produção de aguardente de cana. 2. Ed. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004.
- BARRETO, H. B. F.; BATISTA, R. O.; FREIRE, F. G. C.; SANTOS, W. O.; COSTA, F. G. B. **Análises de indicadores de retenção e armazenamento de água no solo do perímetro irrigado gorutuba, em Janaúba-MG**. Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil) v.6, n.5, p. 189 - 192 , 2011.
- BARROS, R. P. de; VIEGAS, P. R. A.; SILVA, T. L. da; SOUZA, R. M. de; BARBOSA. L.; VIEGAS, R. A.; BARRETO, M. C. de V.; MELO, A. S. de. **Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça**, Pesquisa Agropecuária Tropical, v.40, p.341-346, 2010.
- BEBÉ, F. V.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, G. B.; OLIVEIRA, V. S. **Avaliação de solo sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.6, p.781-187, 2009.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I; ROQUE, C.G. **Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p.829-834, 2002.
- BRANDÃO, S. L., LIMA, C. L., **pH e condutividade elétrica em solução do solo, em áreas de pinus e cerrado na chapada, em uberlândia (mg)**. Instituto de geografia – UFU. Caminhos de Geografia – Revista Online, Jun/2002
- Brito, F.L.; ROLIM, M.M.; PEDROSA, E.M.R. **Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco**. Rev. Bras. Ciênc. Agrár. Recife, v.4, n.4, p.456-462, 2009

Brito, F.L.; ROLIM, M.M.; PEDROSA, E.M.R. **Teores de potássio e sódio no lixiviado e em solos após a aplicação de vinhaça**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, Suplemento, p.52-56, 2005.

BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. **Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo: I - Fracionamento sequencial**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 935- 944, 2005.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo, Norma Técnica P 4.231, 2005, 12p

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. – v.2 – Safra 15/16, n.2 – Segundo levantamento**, ISSN 2318-7921. 1. Cana-de-Açúcar. 2. Safra. 3. Agronegócio, p. 1-33, ago. 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

COOPERCITRUS. Irrigação em cana-de-açúcar proporciona alta produtividade e longevidade ao canavial. **Revista Agropecuária**. Ed. 333. 2013. Acesso em 03 de Setembro de 2014.

CORÁ, J. E.; FERNANDES, C.; BERLADO, G. J. M.; MARCELO, A. V. **Adição de areia para dispersão de solos na análise granulométrica**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, V. 33, 255-262, 2009.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; SILVA, F. R. **Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração agricultura-pecuária**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, p.235-244, 2009.

DEXTER, A. R. **Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth**. Geoderma, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004.

DOLINSKI, M. A., MOTTA, A. C. V., SERRAT, B. M., MAY-DE MIO, L. L., **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, n.5, p.371-376, Sept./Oct. 2009.

DOURADO NETO, D. ; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.;BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo Van Genuchten. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

GONÇALVES, H. M.; BORGES, J. D.; SILVA, M. A. S. **Acúmulo de metais pesados e enxofre no solo em áreas de influência de canais de vinhaça de fertirrigação**. Biosci. J., Uberlândia, v. 25, n. 6, p. 66-74, Nov./Dec. 2009

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. San Diego, Academic Press, 1982. 364p.

INCAPER. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Setores do agronegócio: cana-de-açúcar**. Vitória-ES. 2009. Disponível em: http://www.incaper.es.gov.br/pedeag/setores10_02.htm. Acesso em: 15 de maio de 2015.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. **Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro**. Ciência Rural, v.40, n.7, p.1550-1556, 2010.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. **Densidade e distribuição de diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.26, p.857-867, 2002.

L. P. CANELLAS, A. C. X. VELLOSO, C. R. MARCIANO, J. F. G. P. RAMALHO, V. M. RUMJANEK, C. E. REZENDE G. A. SANTOS. **Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo**. R. Bras. Ci. Solo, 27:935-944, 2003.

LIBARDI, P. L. **Água no solo**. In: Física do Solo. SBCS. p 241-281, 2010.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALISKI, J.; SCAPIM, C. A. **Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p. 495-502, 2008.

MAIA, J. L. T.; RIBEIRO, M. R. **Cultivo contínuo da cana-de-açúcar e modificações químicas de um Argissolo Amarelo fragipânico**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.39, p.1127- 1132, 2004.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ed.Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MATOS, A. T. **Disposição de águas residuárias no solo**. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/UFV, 2004. 144 p.

MEDEIROS, S. C. L.; RIBEIRO, S. R.; CONEGLIAN, C. M. R.; BARROS, R. M.; BRITO, N. N.; DRAGONI S., G.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. **Impactos da agroindústria canavieira sobre o meio ambiente**. In: Fórum de Estudos Contábeis, 3, 2003, Rio Claro, Anais... Rio Claro: UNICAMP, 2003.

NASCIMENTO, P. S.; BASSOI, L. H.; PAZ SILVA, V. P.; PEDRO VAZ, C. M.; NAIME, J. M.; MANIERI, J. M. **Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo**. Irriga, v.15, n.2, p.193-207, 2010.

NÓBREGA, N.E.F. da.; SILVA, J.G.F. da; RAMOS, H.E.A.; PAGUNG, F.S. **Balço hídrico climatológico e classificação climática de Thornthwaite e Köppen para o município de São Mateus – ES**. In: XVIII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. São Mateus – ES, 2008.

Disponível em < http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/arquivos_pdf/publicacoes/CONIRD/1569_sao_mateus.pdf> Acesso em 02/09/2014.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F.M. **Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso**. Scientia Agrícola, v.57, p.739-744, 2000.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. 1ª edição. Curitiba:Discovery, 1996. 446p.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E.S.; MULLER, F.; SILVA, E.M.; CARVALHO JUNIOR, O.A ; BROSSARD, M. **Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequencia across the Brazilian central platea**. Geoderma, 139:251-59, 2007.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo : Manole, 1990. 188p.

REIS, R.A. & MONNERAT, P.H. **Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes (RJ-Brasil)**. R. Bras. Ci. Solo, 26:67-372, 2002.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; TOPP, G. C. **A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table**. Soil Science, v.136, p.250–268, 1983.

ROCHA, Haroldo Corrêa, COSSETTI, Maria da Penha. **Dinâmica cafeeira e constituição de indústrias no Espírito Santo - 1850/1930**. Vitória: NEP/UFES, 1983. Relatório de pesquisa, f. 15-40; 199-213.

RODELLA, A. A.; ZAMBELLO JR., E.; ORLANDO FILHO, J. O. **Calibração de análises de fósforo e potássio no solo em cana-de-açúcar: 2ª aproximação**. Saccharum, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 39-42, 1983.

SANTOS, A. P. R., dos. **Efeito da irrigação com efluente de esgoto tratado, rico em sódio, em propriedades químicas e físicas de um argissolo vermelho distrófico cultivado com capim – Tifton 85**. Piracicaba-SP. 2004. Dissertação de mestrado. ESALQ-SP. 79p.

SCHEINOST, A; SINOWSKI; AUERSWALD, K. 1997. **Rationalization of soil water retention curves in a highly variable soils cape, I. Developing a new pedotransfer function**. University of Muchen, Germany. Geoderma 78: 129-143.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; BOAS, M. A. V.; SAMPAIO, C.; JOHANN, J. A. **Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo**. Acta Scientiarum Agronomy, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2010.

SEAG. Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. **Plano estratégico de desenvolvimento da agricultura capixaba**. Vitória-ES. 2007. Disponível em: <http://www.seag.es.gov.br/pedeag/index.html>. Acesso em: 02 de setembro de 2014.

SEKI, K. (2007) **SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure**. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4: 407-437. 2007.

SILVA, A. J. N. da; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. de. **Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.759– 585, 2007.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. **Indicadores da Qualidade Física do Solo**. In: *Física do Solo*. SBCS. p 241-281, 2010.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; OLIVEIR, L. M. **Índices no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo**. *Bioscience Journal*, v. 28, n. 3, p. 338-345, 2012.

SILVA, E. M. DA,; LIMA, J. E. F. W.; AZEVEDO, J. A. DE.; RODRIGUES, L. N. **Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, n.2, p.323-330, 2006.

SILVA, E.M. da; AZEVEDO, J.A. **Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, p.1487-1494, 2002.

SILVA, JU.C.; WENDLING, B.; CAMARGO, R.; PRAZERES MENDONÇA, L.B.; FREITAS, M.C.M. **Análise comparativa ente os sistemas de preparo do solo: aspectos técnicos e econômicos**. *Enciclopedia Biosfera*, v.7 n.12; p. 1-11, 2011.

SILVA, M. A. S. da; GRIEBELER, N. P.; Borges, L. C. **Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.108-114, 2007.

SOIL MOISTURE EQUIPAMENT CORP. **Guelph Permeameter model 2800K 1 (operating instructions)**, Santa Bárbara, CA, 2005.

SOUZA, J. M., **Atributos físico-hídricos do solo em lavoura de café conilon submetida à subsolagem**. *Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo*. 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. Ed., Porto Alegre: Editora Artmed, 2004. 719p.

TOMÉ Jr., J. B. **Manual para Interpretação de Análise de Solo**. Editora Guaíba: Agropecuária, 1997.

TREVISAN, R. ; SALEMI, L. F.; MORAES, J. M.; OLIVEIRA, J. C. M. **Condutividade hidráulica do solo saturado na zona vadosa in situ e em laboratório**. *Irriga*, v. 14, n. 3, p. 413-422, 2009.

UDOP. União dos Produtores de Bioenergia. **Em PE, metade dos fornecedores é de assentados**. São Paulo-SP. 2010. Disponível e. Acesso em: 02 de setembro de 2014.

UYEDA, C. A., **influencia da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial**. Tese (Doutorado) – ESALQ, Piracicaba, 66p. 2009.

VARALLO, A. C. T. et al. **Alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-amarelo irrigado com água de reuso**. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.14, n.4, p.372–377, 2010.