



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS UNIDADE**  
**ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



## **TESE DE DOUTORADO**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**

**IMPACTOS DA DINÂMICA DO ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO  
SOLO EM ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR**

**JOEL MEDEIROS BEZERRA**

Campina Grande - PB

Março - 2016

JOEL MEDEIROS BEZERRA  
Engenheiro Agrícola & Ambiental

**IMPACTOS DA DINÂMICA DO ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO  
SOLO EM ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de concentração Irrigação e Drenagem.

Área De Concentração:

**Engenharia de Irrigação e Drenagem**

Orientadores:

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Sallydelândia Sobral de Farias**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vera Lúcia Antunes de Lima**

Campina Grande - PB

Março - 2016

## FICHA CATALOGRÁFICA



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS UNIDADE  
ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE DE DOUTORADO

JOEL MEDEIROS BEZERRA

**IMPACTOS DA DINÂMICA DO ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO  
SOLO EM ÁREA CULTIVADA COM CANA-DE-AÇÚCAR**

BANCA EXAMINADORA:

PARECER

\_\_\_\_\_  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Sallydelândia Sobral de Farias – Orientadora  
UAEA/CTRN/UFCG

\_\_\_\_\_  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Vera Lúcia Antunes de Lima – Orientadora  
UAEA/CTRN/UFCG

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luciano Marcelo Falle Saboya – Examinador  
UAEA/CTRN/UFCG

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Dantas Neto – Examinador  
UAEA/CTRN/UFCG

\_\_\_\_\_  
Dra. Gilvanise Tito - Examinadora  
PNPD/CNPq/UFCG

\_\_\_\_\_  
Dr. Geovani Soares de Lima - Examinador  
PNPD/CNPq/UFCG

Campina Grande - PB

Março - 2016

*A minhas preciosas filhas, Anna e Lara:  
inspiração, motivação e o sentido de tudo...*

*A minha esposa, Bruna: pelo carinho,  
compreensão e força para superar os desafios.*

## **DEDICO**

*A meus pais, José Bezerra e Marta Elizabete,  
pelo amor, confiança, dedicação e apoio,  
mesmo muitas vezes à distância, me apoiando  
nos estudos e contribuindo na minha formação  
moral, intelectual e espiritual.*

## **OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus, por me ter proporcionado sabedoria, confiança, paciência e fé nos momentos difíceis, discernimento e paz para realizar este sonho;
- A meus pais, José Bezerra Subrinho e Marta Elizabete Medeiros Bezerra, e a meu irmão Lucas Medeiros Bezerra, pelo apoio incondicional;
- A minha esposa, Bruna Monique da Silva, por estar sempre a meu lado;
- À pesquisadora, professora e minha orientadora Dra. Maria Sallydelândia Sobral de Farias, pela amizade, parceria, paciência, dedicação e confiança que em mim depositou, contribuindo sempre para me transformar em um profissional cada vez melhor;
- À pesquisadora, professora e orientadora Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima, pela amizade, e confiança que em mim depositou;
- Ao pesquisador e professor Dr. Glécio Machado Siqueira, da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), pela amizade, contribuições diferenciais, auxílio no desenvolvimento da presente pesquisa, além da colaboração em diversos trabalhos e projetos desenvolvidos ao longo da pós-graduação;
- Ao pesquisador e professor Dr. Luciano Marcelo Fallé Saboya, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pela amizade e contribuições diferenciais;
- Ao pesquisador Dr. Geovani Soares de Lima, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pela amizade e contribuições diferenciais, além do apoio em distintos momentos ao longo do doutorado;
- À UFCG, pela oportunidade de estudar e evoluir um pouco mais como ser humano. Enfim, aos professores e funcionários da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA), por todos os ensinamentos, pelos bons e inesquecíveis anos de convivência;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Ensino Superior (CAPES) pela concessão do auxílio da bolsa de estudo, o que me permitiu dedicação à pós-graduação;
- À Fundação de Agricultura Sustentável (Agrisus) pelo financiamento do projeto 1188/2013, o qual aprovei junto a mesma, possibilitando a execução da presente pesquisa;
- À Usina Santa Teresa, pela oportunidade do desenvolvimento da presente pesquisa em suas instalações e fornecimento de dados;
- Aos amigos e colegas que me acolheram na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) os quais me apoiaram ao longo do doutorado;
- Aos examinadores, por se disporem a contribuir com a melhoria desta pesquisa;

- Aos professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica do Rio Grande do Norte (IFRN) Campus Natal Central, Diretoria de Recursos Naturais (DIAREN), pela cumplicidade, entusiasmo e sobretudo por me ensinarem que o magistério está além da sala de aula;
- A toda a minha família, por todo apoio, carinho e incentivo durante a minha formação;
- Aos amigos que me acolheram em Campina Grande, juntamente com minha família;
- Por fim, expresso os meus mais sinceros agradecimentos a todos que, mesmo não citados, contribuíram, direta ou indiretamente, para que essa pesquisa obtivesse êxito.

## SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT .....	xv

### **CAPÍTULO I - Introdução, revisão de literatura e material e métodos**

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1. OBJETIVOS .....	21
1.1.1. Objetivo geral.....	21
1.1.2. Objetivos específicos.....	21
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
2.1. Cultivo do agrossistema de cana-de-açúcar .....	22
2.2. Propriedades químicas, físicas e hídricas do solo em agrossistema de cana-de-açúcar .....	23
2.2.1. Propriedades químicas.....	24
2.2.2. Propriedades físicas .....	25
2.2.3. Propriedades hídricas .....	27
2.3. Matéria orgânica e qualidade do solo .....	28
2.4. Dinâmica do estoque de carbono e nitrogênio no solo .....	30
2.5. Dinâmica do Carbono e Nitrogênio em cana-de-açúcar com queima da palha .....	32
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1. Localização da área experimental .....	35
3.2. Amostragem do solo .....	38
3.3. Determinações analíticas efetuadas .....	39
3.3.1. Atributos químicos do solo .....	39
3.3.2. Atributos físico-hídricos do solo .....	39
3.3.3. Condutividade hidráulica .....	40
3.3.4. Estoque de carbono e do nitrogênio do solo .....	41
3.4. Análise estatística multivariada .....	42
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

### **CAPÍTULO II - Estoque de carbono e nitrogênio em Argissolo Amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar em cronosequência** Toc448142690

<b>Resumo .....</b>	<b>59</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>60</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>62</b>
2.1. Localização da área.....	62
2.2. Amostragem dos teores de carbono orgânico e nitrogênio total do solo .....	63
2.3. Análise estatística .....	65
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>74</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>



**CAPÍTULO III - Diferenciação de atributos químicos de um argissolo amarelo coeso sob cana-de-açúcar em diferentes ciclos de cultivo**

<b>Resumo .....</b>	<b>79</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>80</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>82</b>
2.1. Localização da área.....	82
2.2. Amostragem das variáveis .....	83
2.3. Análise multivariada .....	85
2.4. Análises dos dados.....	86
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>86</b>
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>94</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>

**CAPÍTULO IV - Caracterização físico-hídrica de um argissolo amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar em diferentes ciclos de cultivo**

<b>Resumo .....</b>	<b>98</b>
<b>Abstract: .....</b>	<b>99</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>100</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>101</b>
2.1. Localização da área.....	101
2.2. Amostragem das variáveis físico-hídricas .....	102
2.3. Análise multivariada .....	103
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>105</b>
<b>4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>113</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>114</b>

**CAPÍTULO V**

<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>118</b>
----------------------------------	------------

## LISTA DE TABELAS

Pág.

### **CAPÍTULO II**

---

- Tabela 1.** Análise estatística do estoque de carbono orgânico total (Cs) do solo para os tempos de implantação da cronosequência, nas diferentes profundidades .... 65
- Tabela 2.** Análise estatística do estoque de nitrogênio total (Ns) do solo para os tempos de implantação da cronosequência, nas diferentes profundidades..... 68
- Tabela 3.** Análise estatística da relação do estoque de carbono (Cs) e nitrogênio (Ns) do solo para os tempos de implantação da cronosequência, nas diferentes profundidades..... 69

### **CAPÍTULO III**

---

- Tabela 1.** Autovalores e autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (CP) e dos atributos químicos do solo nas camadas de 0 a 40 cm..... 89
- Tabela 2.** Autovalores e autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (CP) e dos atributos químicos do solo das camadas de 40 a 100 cm..... 90
- Tabela 3.** Coeficiente de correlação de Pearson entre componentes principais e os atributos geomorfológicos altitude, declividade e condutividade hidráulica do solo saturado (K20) nas camadas de 0 a 40 cm..... 93
- Tabela 4.** Coeficiente de correlação de Pearson entre componentes principais e os atributos geomorfológicos altitude, declividade e condutividade hidráulica do solo saturado (K20) nas camadas de 40 a 100 cm..... 94

### **CAPÍTULO IV**

---

- Tabela 1.** Matriz de correlação (r) entre as variáveis físico-hídricas do solo..... 105
- Tabela 2.** Médias dos atributos físico-hídricos dos grupos formados por profundidade.. 107
- Tabela 3.** Autovalores e autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (CP) e das variáveis físico-hídricas das camadas de 0a 40cm..... 109
- Tabela 4.** Autovalores e autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (CP) e das variáveis físico-hídricas das camadas de 40 a 100cm..... 111

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

### CAPÍTULO I

---

- Figura 1.** Localização geográfica do estado de Pernambuco no Brasil, município de Goiana em destaque e localização da área de estudo..... 35
- Figura 2.** Precipitação diária e temperatura média do ar sobre a área de estudo no período de novembro/2013 à maio/2014..... 36
- Figura 3.** Área de estudo, cultivada com cana-de-açúcar colhida com queima e corte manual: paisagem da área experimental (A) e exposição da superfície do Argissolo Amarelo coeso (B) ..... 36
- Figura 4.** Mapa de localização dos talhões experimentais na área de estudo em Goiana (PE) ..... 37
- Figura 5.** Mapa do modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo em Goiana (PE) 37
- Figura 6.** Mapa de declividade da área de estudo em Goiana (PE) ..... 38
- Figura 7.** Esquema de permeâmetro de carga constante de laboratório montado para avaliação da condutividade hidráulica saturada do solo..... 40

### CAPÍTULO II

---

- Figura 1.** Localização geográfica do estado de Pernambuco, no Brasil, município de Goiana em destaque, além da localização dos talhões experimentais da área de estudo ..... 63
- Figura 2.** Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico com a formação de grupos por profundidade: 0–5 cm (A), 5–10 cm (B), 10–20 cm (C), 20–40 cm (D), 40–60 cm (E), 60–80 cm (F) e 80–100 cm (G) ..... 71
- Figura 3.** Biplot dos pesos de CP1 e CP2, resultante da análise de componentes principais por profundidade: 0–5 cm (A), 5–10 cm (B), 10–20 cm (C), 20–40 cm (D), 40–60 cm (E), 60–80 cm (F) e 80–100 cm (G) ..... 73

### CAPÍTULO III

---

- Figura 1.** Localização geográfica do estado de Pernambuco, município de Goiana em destaque e MDE com a localização das áreas de estudo no Engenho Terra Rica: Mata – Mata preservada; CP – Cana Planta, S1 – Soca de 1º ano, S2 – Soca de 2º ano, S3 – Soca de 3º ano, S4 – Soca de 4º ano, S5 – Soca de 5º ano, S6 – Soca de 6º ano..... 83

<b>Figura 2.</b> Mapa geomorfológico da área de estudo em Goiana (PE): Modelo Digital de Elevação (A) e declividade (B) .....	85
<b>Figura 3.</b> Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos com a formação de grupos com base na distância euclidiana dos atributos químicos do solo: 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm (D), 40-60 cm (E), 60-80 cm (F) e 80-100 cm (G) .....	87
<b>Figura 4.</b> Biplot da análise de componentes principais (ACP) com base nas variáveis do solo nos diferentes tempos de manejo: 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm (D), 40-60 cm (E), 60-80 cm (F) e 80-100 cm (G) .....	92

## **CAPÍTULO IV**

---

<b>Figura 1.</b> Localização geográfica do estado de Pernambuco, município de Goiana em destaque e localização das áreas de estudo no Engenho Terra Rica: Mata – Mata preservada; CP – Cana Planta, S1 – Soca de 1° ano, S2 – Soca de 2° ano, S3 – Soca de 3° ano, S4 – Soca de 4° ano, S5 – Soca de 5° ano, S6 – Soca de 6° ano.....	102
<b>Figura 2.</b> Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos com a formação de grupos por profundidade: 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm (D), 40-60 cm (E), 60-80 cm (F) e 80-100 cm (G) .....	106
<b>Figura 3.</b> Análise de componentes principais das médias dos atributos dos solos por profundidade. 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm (D), 40-60 cm (E), 60-80 cm (F) e 80-100 cm (G) .....	112

BEZERRA, J. M. **Impactos da dinâmica do estoque de carbono e nitrogênio no solo em área cultivada com cana-de-açúcar**. 2016. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais. Campina Grande, PB.

## RESUMO

O avanço das pesquisas contribui para a melhoria das técnicas de manejo adotadas e, conseqüentemente, para um sistema de cultivo com menor impacto ambiental e maior sustentabilidade. Nestas condições, a presente pesquisa objetiva avaliar os impactos da dinâmica temporal do estoque de carbono e nitrogênio em um Argissolo Amarelo coeso com cultivo de cana-de-açúcar com queima prévia da palha para colheita, sobre propriedades do solo. A área experimental está localizada na Zona da Mata Norte, no município de Goiana-PE. As amostragens de solo foram realizadas em cronosequência de área cultivada com cana-de-açúcar, sendo composta por oito talhões com diferentes tempos de implantação: Tempo zero (Mata, strictu sensu), um, dois, três, quatro, cinco, seis e sete anos. Foram realizadas 5 amostras por talhão em sete profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Para a caracterização da qualidade do solo foram analisadas propriedades físicas (granulometria e densidade aparente), hídricas (condutividade hidráulica, umidade, macro e microporosidade) e químicas (estoque de carbono e nitrogênio, e fertilidade). Os atributos em estudo foram analisados inicialmente por meio da estatística clássica para determinação de dados anômalos e conhecimento do padrão de distribuição, posteriormente aplicou-se análises multivariadas de agrupamentos hierárquicos e de componentes principais, possibilitando a avaliação de similaridades e/ou diferenças das áreas estudadas, além da redução de variáveis dependentes sobre a variação dos dados. A substituição da Mata pelo sistema de cultivo agrícola de cana-de-açúcar com queima da palhada para colheita manual promoveu diminuição de cerca de 50% nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total do solo. Os maiores estoques de carbono e nitrogênio em todas as camadas avaliadas foram estatisticamente pronunciados na área de Mata. O uso das técnicas multivariadas mostrou-se eficiente na distinção de ambientes sobre diferentes tempos de implantação dos ciclos de cultivo da cana-de-açúcar em cronosequência, agrupando os distintos tempos de manejo quanto aos atributos físico-hídricos e químicos do solo, o que remete a importância de estudos de sustentabilidade do solo a longo prazo. A partir do ciclo de cultivo da cana planta verificou-se alterações quanto os atributos físico-hídricos e químicos do solo, principalmente nas camadas superficiais de 0-40 cm. Após sete anos de avaliação dos cultivos observou-se que as características do solo tenderam gradativamente a

retornar as condições iniciais de Mata, mediante ausência de mobilização e revolvimento do solo como pode-se observar na soca de 5° e 4° ano, principalmente em camadas de 60 a 100 cm de profundidade, para as propriedades químicas e físico-hídricas, respectivamente.

**Palavras-chave:** Cronossequência, química do solo, propriedades físico-hídricas, manejo do solo, estatística multivariada.

BEZERRA, J. M. **Stock dynamics of the impacts of carbon and nitrogen in the soil in an area cultivated with sugarcane.** 2016. 120 f. Thesis (Doctoral in Agricultural Engineering). Federal University of Campina Grande, Center for Technology and Natural Resources. Campina Grande, PB.

### ABSTRACT

The progress of research contributes to the improvement of management techniques adopted and, consequently, to a cultivation system with lower environmental impact and greater sustainability. Accordingly, this research aims to evaluate the impact of the stock of the temporal dynamics of carbon and nitrogen in a Ultisol cohesive with sugarcane cultivation with previous straw burning for harvesting on soil properties. The experimental area is located in the North Forest Zone in Goiana-PE municipality. Soil samples were performed in area chronosequence cultivated with sugarcane, it is composed of eight plots with different deployment times: zero time (Mata, strictly speaking), one, two, three, four, five, six and seven years. 5 samples per field were performed in seven 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm. To characterize the quality of soil physical properties were analyzed (particle size and density), water (hydraulic conductivity, moisture, macro and microporosity) and chemical (stock of carbon and nitrogen, and fertility). The attributes in the study were initially analyzed by classical statistics to determine anomalous data and pattern of distribution of knowledge subsequently applied multivariate analysis of hierarchical clustering and principal component, allowing the evaluation of similarities and/or differences of the areas studied in addition to the reduction of dependent variables on the variation of the data. The replacement of forest by agricultural cultivation system of sugarcane with straw burning for manual harvesting promoted decrease of about 50% in organic carbon stocks and total soil nitrogen. The largest carbon and nitrogen stocks in all evaluated layers were statistically pronounced in forest area. The use of multivariate techniques proved effective in environments of distinction about different times of deployment of crop cycles of sugarcane in chronosequence, grouping the different times of management as to the physical water and soil chemical attributes, which refers the importance of long-term soil sustainability studies. From the sugarcane plant cultivation cycle was found to change as water physical and chemical attributes of the soil, especially in the surface layers 0-40 cm. After seven years of evaluation of crops observed that soil characteristics tended gradually to return the initial conditions of forest through lack of mobilization and soil disturbance as can be seen in soca 5th and 4th year, mainly in layers 60-100 cm deep, to the chemical and physical water, respectively.

**Keywords:** chronosequence, soil chemical, physical and hydraulic properties, soil management, multivariate statistics.



## **CAPÍTULO I**

---

### **INTRODUÇÃO, REVISÃO DE LITERATURA E MATERIAL E MÉTODOS**

## 1. INTRODUÇÃO

Globalmente são três as fontes principais de Gases do Efeito Estufa (GEE) que causam o aquecimento global: queima de combustíveis fósseis, mudança do uso da terra e agricultura/pecuária, estando associadas com a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), do metano ( $\text{CH}_4$ ) e do óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Os solos agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de GEE, dependendo do sistema de manejo a que forem submetidos. Sendo que a reserva de carbono na matéria orgânica do solo é uma importante estratégia para atenuar a concentração de dióxido de carbono na atmosfera.

Os solos representam um importante componente no ciclo biogeoquímico do carbono, armazenando cerca de quatro vezes mais carbono que a biomassa vegetal e quase três vezes mais que a atmosfera. Várias são as ênfases e as formas de quantificar o efeito de sistemas de manejo sobre o fluxo de carbono (C) no sistema solo-planta-atmosfera citadas na literatura (JANZEN et al., 1998; COSTA et al., 2008).

O Carbono Orgânico Total (COT) é considerado o indicador mais importante da qualidade do solo e da agricultura sustentável, devido a sua estreita relação com as propriedades físicas, químicas e biológicas, principalmente em solos sob condições tropicais (CONCEIÇÃO et al., 2005; NUNES et al., 2009).

As principais fontes e sumidouros de  $\text{CO}_2$  nos solos estão associadas às mudanças na quantidade de carbono orgânico estocada. O aumento ou diminuição deste estoque depende da quantidade e qualidade da matéria orgânica que entra no solo, os quais, junto à taxa de decomposição, são determinados pela interação entre clima, atributos do solo, e uso e manejo das terras.

Em ecossistemas não alterados pela ação humana, as condições de clima e solo são os principais determinantes do balanço de carbono porque eles controlam as taxas de produção e decomposição. Em sistemas agrícolas, o uso da terra e seu manejo, modificam a entrada de matéria orgânica devido à produção de resíduo, ao tipo de cultura, à fertilização e aos procedimentos de colheita (EMBRAPA, 2007). A magnitude desses processos pode ser avaliada em experimentos de longa duração, pela quantificação dos estoques de C orgânico no solo, em comparação ao seu estoque inicial (COSTA et al., 2006; COSTA et al., 2008).

Dessa forma, a quantificação do carbono da biomassa, bem como o padrão de sua ciclagem, permitem avaliar a magnitude dos reflexos causados pela intervenção antrópica

ou por fenômenos naturais ocorridos no ecossistema, tornando possível, por meio de estudos de ciclagem de nutrientes, a quantificação das saídas ou perdas de nutrientes (OKI, 2002).

Devido à dificuldade na obtenção de medidas diretas de mudança de carbono no solo, reconhecem-se a importância da estimativa do estoque desse elemento dos solos para o inventário do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Estimativas de estoque de carbono nos solos do Brasil, são raras, pouco difundidas e se deparam com a falta de informações sobre a quantidade de carbono orgânico nos solos sob diferentes usos e em diferentes regiões (EMBRAPA, 2007).

Existem alguns registros de estudos que abordam o impacto da implantação de sistemas de manejo do solo e de culturas sobre os estoques de carbono no Brasil, no sentido de avaliar a sustentabilidade de diferentes agroecossistemas nas diversas regiões, tais como: Sudeste (RANGEL et al., 2008), Sul (COSTA et al., 2008; MARTINS et al., 2009), Centro-Oeste (D'ANDRÉA et al., 2004) e Norte (CARVALHO et al., 2006a; CARMO et al., 2007), entretanto a região Nordeste é deficiente em levantamentos que indiquem padrões de tal atributo, limitando-se a poucos relatos, tais como: Fracetto et al. (2012) e Moreira (2013) na Bahia com sistema de mamona e Caatinga, Barros et al. (2013) nos Tabuleiros costeiros paraibanos com sistema de cana-de-açúcar e Mata, Santana (2015) no Sertão pernambucano com diferentes usos. Sendo tal conhecimento de fundamental importância, pela fragilidade dos solos, dos diferentes gradientes de aridez e de condições de instabilidade climática, dentre outros fatores.

Desta maneira, o agrossistema bioenergético foi selecionado para estudo por possuir grande expressão econômica no Brasil, e por estar em franca expansão na Região da Zona da Mata de Pernambuco. Podendo contribuir para a racionalização do processo produtivo, caso sejam aplicadas práticas de manejo conservacionista, visto que implica redução de custos operacionais, assegurando, sobretudo a sustentabilidade da qualidade ambiental e no balanço de gases responsáveis pelo efeito estufa.

Entretanto a medida que a área do agrossistema de cana-de-açúcar se expande, crescem também as preocupações em relação aos impactos dessa cultura no ambiente. Segundo Barros et al. (2013) e Dias et al. (2007) a introdução de sistemas agrícolas em áreas com vegetação nativa resulta, geralmente, numa rápida perda de carbono orgânico em ambientes tropicais, implicando na degradação da qualidade do solo.

Assim, a presente pesquisa tem como premissa básica verificar os impactos da dinâmica temporal do estoque de carbono e nitrogênio em áreas envolvendo experimentos

de longa duração com cultivo de cana-de-açúcar com queima prévia da palha para colheita, relacionando com alguns atributos químicos e físico-hídricos de um Argissolo Amarelo coeso, na Zona da Mata Norte de Pernambuco.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Avaliar os impactos da dinâmica temporal do estoque de carbono e nitrogênio em um Argissolo Amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar com queima prévia da palha para colheita, sobre propriedades do solo.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- a) Avaliar os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total do solo em Argissolo Amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar, com diferentes ciclos de cultivo em cronosequência, com queima prévia da palha para colheita manual;
- b) Diferenciar os atributos químicos de um Argissolo Amarelo coeso sob cana-de-açúcar em diferentes ciclos de cultivo;
- c) Caracterizar as propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar em diferentes ciclos de cultivo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Cultivo do agrossistema de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma gramínea geralmente cultivada em áreas tropicais ou subtropicais, originária do Sudeste Asiático e classificada, segundo Cronquist (1981), em Divisão Manoliophyta, Classe Magnoliopsida, Ordem Graminales, Família Poaceae Gênero *Saccharum*. Sendo adaptada aos climas tropical e subtropical, produzindo relevante quantidade de biomassa (TEJERA et al., 2007), sobretudo quando adequadamente suprida por água e nutrientes (SILVA et al., 2014), sendo semiperene, com ciclo de cinco a sete anos.

O sistema radicular da cana-de-açúcar se desenvolve em maior profundidade que outras culturas, apresentando efeito rizosférico intenso em virtude do seu abundante sistema radicular que, ao ser decomposto, libera nutrientes e ainda contribui para a formação da matéria orgânica do solo, favorecendo intensamente seu estado de agregação. Este sistema é formado por rizomas e raízes fasciculadas, das quais 85% se encontram nos primeiros 50 cm de profundidade e 60% na camada de 20 a 30 cm. Por isso, a cana-de-açúcar é uma das culturas mais afetadas pela compactação do solo (LIMA et al., 2013a; OLIVEIRA et al., 2013).

A cana-de-açúcar é um produto vegetal de importância socioeconômica para o Brasil, e encontra um cenário favorável no país – maior produtor mundial e detentor da tecnologia de produção de etanol de cana (BRASIL, 2012).

Sendo essa uma das principais “commodities” do agronegócio brasileiro, ocupando uma área de 9.070,4 mil hectares, com produção de 654,6 milhões de toneladas na safra 2015/16 (CONAB, 2015). O cultivo da cana-de-açúcar é viável principalmente devido ao seu potencial na geração de energia, produção de açúcar e geração de resíduos reaproveitados no processo produtivo. A grande maioria do cultivo da cana-de-açúcar é sob manejo convencional (EVANGELISTA et al, 2013), utilizando da mecanização para preparo do solo e adição de fertilizantes e corretivos.

A expansão do plantio dessa cultura decorre principalmente da escassez das reservas de combustíveis fósseis demandando buscas por combustíveis alternativos (FAGUNDES et al., 2014). Aliado a tal fato, tem-se que o aumento na produtividade de cana-de-açúcar nos últimos anos se deve, entre outros fatores, às melhorias no uso das tecnologias agrícolas e ao aumento da área cultivada. A incorporação de novas áreas

promove o plantio desta cultura em locais antes considerados marginais, em especial por deficiência hídrica (SILVA et al., 2014).

O monocultivo impôs à cana-de-açúcar, a ocupação de pastagens, mas também de solos férteis em regiões de topografia plana, próximos de grandes centros urbanizados, aptos para o cultivo de culturas alimentícias. Esse sistema de cultivo promove impactos ambientais que empobrecem a biodiversidade e afetam a flora e a fauna locais e regionais (ROSSETTO et al., 2010).

O uso intensivo de solos com o cultivo da cana-de-açúcar modifica significativamente as propriedades físicas do solo. Centurion et al. (2007) a partir do plantio de um Latossolo Vermelho com cana-de-açúcar em Jaboticabal (SP) verificou que o tempo de cultivo interfere na estrutura do solo, proporcionando aumento da densidade e diminuição da porosidade total.

No que concerne à cana de açúcar, por ser uma cultura de expressivo impacto sobre o solo, em virtude do trânsito intensivo de máquinas de grande porte, além de práticas como a queima, torna-se necessário conhecer o efeito de alterações no sistema de produção sobre atributos do solo (EVANGELISTA et al, 2013). Da mesma forma, há necessidade de conhecimento da influência do manejo sobre a sustentabilidade dos atributos do solo.

## **2.2. Propriedades químicas, físicas e hídricas do solo em agrossistema de cana-de-açúcar**

O cultivo dos solos acarreta modificações em seus atributos dependendo da intensidade de preparo e do manejo utilizado. A degradação do solo, decorrente da compactação, destruição da estrutura e da degradação da matéria orgânica, provoca efeitos negativos nas propriedades físicas, hídricas, químicas e biológicas, com prejuízos ao desenvolvimento de plantas, afetando, em consequência, a produtividade desses solos (SILVA & CABEDA, 2006).

Segundo Cardoso et al. (2011) avaliações de alterações nas propriedades do solo, decorrentes de impactos da intervenção antrópica em ecossistemas naturais, podem constituir importante instrumento para auxiliar no monitoramento da conservação ambiental, pois permitem caracterizar a situação atual, alertar para situações de risco e, por vezes, prever situações futuras, especialmente quando adotada como referência a vegetação nativa original.

O estudo dos atributos do solo ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e duração das alterações provocadas por diferentes sistemas de manejo. Por serem sensíveis, esses atributos, são importantes para estabelecer se houve degradação ou melhoria da qualidade do solo em relação a um sistema de manejo determinado (REICHERT et al., 2009).

O conhecimento das modificações físicas e químicas do solo, causadas pelo cultivo contínuo, pode fornecer subsídios para a adoção de práticas de manejo que permitam incrementar o rendimento das culturas, garantindo a contínua sustentabilidade e conservação dos ecossistemas (FREITAS et al., 2012).

Nesse contexto, para identificar o potencial ou as limitações de funcionamento de um tipo de solo, é preciso estabelecer um referencial, o qual se relaciona ao solo em estado natural, sem alterações antrópicas por uso. Teoricamente, nessas condições o solo expressaria o seu potencial, suas limitações e sua qualidade de referência, pois, quando ocorre a modificação de sistemas naturais para agrícolas, muitos atributos do solo são alterados e sua qualidade é modificada (MELO FILHO et al., 2004; VASCONCELOS et al., 2010).

### **2.2.1. Propriedades químicas**

Para que sejam estáveis e continuamente produtivos, os sistemas de manejo devem, além de manter as condições físicas do solo em condições favoráveis ao crescimento das plantas, adicionar nutrientes conforme suas necessidades, bem como o controle efetivo da erosão. As diferentes operações de preparo do solo podem alterar a fertilidade do solo, pois alteram a distribuição e a disponibilidade dos nutrientes no perfil (ARATANI, 2008).

Os atributos químicos do solo dizem respeito à atividade dos elementos químicos e às reações que se processam em cada fase (sólida, líquida e gasosa) do solo, com interações entre eles e deles com o ambiente influenciando a quantidade e a disponibilidade de nutrientes. Em ecossistemas naturais em equilíbrio as entradas de nutrientes originados do intemperismo e da decomposição de resíduos orgânicos se aproximam das perdas por lixiviação, assimilação pelas plantas e mineralização da matéria orgânica (BRADY & WEIL, 2008).

O conhecimento do processo de ciclagem de nutrientes, e sua relação com os recursos naturais de cada ambiente, permitem a elaboração de modelos simplificados dos



ecossistemas, possibilitando, dessa forma, o planejamento do seu uso para fins agrícolas, bem como uma melhor utilização, tanto do ponto de vista econômico, pelo uso racional de fertilizantes para repor de modo eficiente os nutrientes exportados das lavouras, quanto ambiental, considerando as maiores possibilidades para promover a sustentabilidade dos agroecossistemas (CAMPOS et al., 2005).

As propriedades químicas dos solos são afetadas com a retirada da vegetação natural e o cultivo, principalmente na camada arável, em virtude da adição de corretivos e fertilizantes e de operações agrícolas. As principais modificações químicas nos solos cultivados em relação às condições originais decorreram da variação do pH e dos teores de cátions, os quais são dependentes da fertilidade inicial, ou seja, solos eutróficos diminuem a fertilidade e os álicos aumentam, além da redução do alumínio trocável e da saturação por alumínio (MAIA & RIBEIRO, 2004).

O pH influencia a atividade de microrganismos do solo que estão ligados com a mineralização da matéria orgânica, nitrificação, fixação biológica de nitrogênio e infecção do sistema radicular com micorrizas, que aumentam a disponibilidade de nutrientes. É, portanto, uma das propriedades químicas do solo mais importantes para a determinação da produção agrícola (FAGERIA & SANTOS, 2000).

Já a acidez potencial corresponde às substâncias ou aos compostos que liberam o íon hidrogênio ( $H^+$ ) para a solução do solo, causando sua acidificação. Estas incluem o alumínio ( $Al^{3+}$ ) trocável adsorvido às cargas negativas das argilas e dos grupos funcionais COOH e OH da matéria orgânica (BISSANI et al., 2004). A acidificação do solo pode levar a uma perda significativa da produtividade das culturas.

### **2.2.2. Propriedades físicas**

Pesquisas voltadas para a avaliação da qualidade física dos solos têm-se tornado constantes na literatura mundial em virtude das interferências na produtividade das culturas e sustentabilidade dos ecossistemas ligados ao solo (VASCONCELOS et al., 2014).

Dentre os atributos físicos utilizados para avaliar a qualidade física do solo, a densidade do solo e a resistência do solo à penetração têm sido priorizadas atualmente para avaliar sistemas de uso e manejo, por serem atributos diretamente relacionados ao crescimento das plantas e de fácil determinação e ao baixo custo (LIMA et al., 2006).

A resistência mecânica à penetração é um dos parâmetros físicos mais adotados como indicador do nível de compactação do solo e apresenta relações diretas com o crescimento das plantas, sendo mais eficiente na identificação da compactação quando acompanhada da umidade e da densidade do solo (FREDDI et al., 2006).

Ainda a resistência do solo à penetração apresenta maiores correlações com o crescimento radicular, destacando-se como a melhor estimativa do impedimento mecânico ao crescimento radicular (CARVALHO et al., 2006b; LIMA et al., 2013a) e como indicador mais sensível à compactação do solo (FREDDI et al., 2009), comparado com a densidade do solo.

Segundo Dalchiavon et al. (2011) a compactação desencadeia alteração estrutural e a reorganização das partículas e de seus agregados, aumentando a microporosidade, que reflete negativamente na absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas, crescimento e desenvolvimento do sistema radicular e produtividade das culturas. Podendo induzir alterações na absorção e concentração de nutrientes nas plantas e, em consequência, em seu desenvolvimento (FAGUNDES et al., 2014).

Os sistemas de manejo em cultivo tradicional promovem efeitos nas propriedades físicas verificando-se aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade, infiltração e da condutividade hidráulica, quando comparados com o solo sob mata nativa (VASCONCELOS et al., 2014).

A densidade do solo (DS), também conhecida como densidade aparente ou global, é uma propriedade física que reflete o arranjo das partículas do solo, que por sua vez define as características do sistema poroso. Essa propriedade é utilizada para se estimar a compactação do solo, de forma mais genérica. Quanto mais denso um solo, mais compactado ele tende a se apresentar, isto reflete, em menor porosidade total, macroporosidade, menor permeabilidade (condutividade hidráulica), menor taxa de infiltração, e maior resistência a penetração de raízes no solo (KOCHHANN et al., 2000; FERREIRA et al., 2010; COSTA et al., 2012).

Estas condições prejudicam o crescimento do sistema radicular, pois quanto maior a densidade do solo, maior a dificuldade de penetração das raízes, e conseqüentemente, a produção pode ser afetada (desenvolvimento da parte aérea e sua respectiva produtividade), podendo causar também a erosão do solo devido ao aumento de selamento superficial (PAULETTO et al., 1989; REICHERT et al., 2007).

Reichardt et al. (1988) revelaram como a variabilidade espacial da umidade do solo pode ser utilizada com vantagem para estudar a influência desta sobre outros

parâmetros em uma cultura agrícola, tais como absorção de nutrientes, produtividade e fixação biológica do nitrogênio. Segundo Libardi et al. (1996) no solo a umidade varia de modo espacial e temporal. Várias pesquisas da resistência mecânica à penetração e da umidade do solo tem mostrado influência positiva sobre a produtividade vegetal (MONTANARI et al., 2010).

O efeito do condicionamento físico do solo sobre o crescimento das plantas ocorre pela atuação de vários parâmetros e da interação entre estes. A própria sazonalidade climática contribui para a complexidade do sistema. Desta forma, os parâmetros físicos do solo relacionados com a produtividade das culturas podem ser divididos em duas categorias. A primeira relaciona aqueles diretamente envolvidos com o desenvolvimento das plantas, e estão relacionados ao conteúdo de água, a presença de oxigênio, resistência à penetração das raízes e temperatura. Estes aspectos afetam diferentes processos fisiológicos, como a fotossíntese, o crescimento radicular e foliar. A segunda está relacionada com a textura, agregação, porosidade e densidade do solo, fatores que afetam a produtividade das culturas (SILVA & NOGUEIRA JUNIOR, 2001).

Vasconcelos et al. (2014) ao avaliarem sistemas de manejo do solo cultivados com cana-de-açúcar verificaram alterações nos atributos físicos do solo aumentando a densidade e o grau de compactação e reduzindo a condutividade hidráulica saturada quando comparados com a mata nativa.

### **2.2.3. Propriedades hídricas**

A utilização dos diferentes sistemas de manejo proporciona principalmente alterações na estrutura do solo (TAVARES FILHO & TESSIER, 2010). Em longo prazo, tal aspecto pode estar associado à formação de camadas compactadas (LIMA et al., 2013b). A compactação pode elevar a densidade e reduzir o volume de poros no solo, o que resultariam em aumento da erosão, redução na condutividade hidráulica e no alongamento radicular das plantas (SHI et al., 2012).

Essa dinâmica da água em superfície e em subsuperfície condiciona o surgimento da variabilidade ao longo da paisagem dos atributos químicos, físicos, biológicos e mineralógicos no solo. Sendo tal dinâmica fortemente relacionada às formas do relevo que governam os processos de erosão ou deposição de sedimentos e nutrientes criando zonas mais homogêneas em relação às propriedades do solo em cada segmento da paisagem (DANIELS & HAMMER, 1992; MARQUES JÚNIOR & LEPSCH (2000).

José et al. (2013) relatam que o conhecimento das variáveis físico-hídricas do solo permite o planejamento e manejo eficiente de um projeto de irrigação. Vários fatores que condicionam o movimento da água no solo têm sido relatados por diversos autores. Sendo que a caracterização e o maior entendimento destas dependências tornam-se fundamentais para permitir um melhor entendimento dos processos físicos que ocorrem nos solos (FIORIN, 2008).

A infiltração é um importante indicador de estruturação, agregação e transformação do material litólico, além de influenciar na melhoria da capacidade de suporte do solo propiciando um ambiente mais favorável às colonizações espontâneas das espécies, criando sinergia para a reconstrução do ecossistema (MARCHINI, 2012).

A condutividade hidráulica do solo saturado é considerada um parâmetro importante na diferenciação dos efeitos dos sistemas de manejo como armazenamento de água, escoamento superficial e processos de erosão, tornando-se essencial para estudos de modelagem de processos hidrológicos (BAGARELLO et al., 2012; ZIMMERMANN et al., 2013).

### **2.3. Matéria orgânica e qualidade do solo**

Tornar uma área nativa própria à agricultura consiste em quebrar o equilíbrio de um sistema complexo, composto por macro, meso e microorganismos, responsáveis pela estrutura do solo, que por sua vez, suprirá as necessidades do sistema exploratório agrícola. O cuidado do solo, especialmente em relação à erosão, é um pré-requisito à sobrevivência das espécies vivas da terra. Daí a importância de se estudar e monitorar a qualidade do solo para mantê-lo permanentemente produtivo e sem degradação (BRADY e WEIL, 2002; COGO & LEVIEN, 2002).

O conceito de qualidade do solo (QS) começou a ser elaborado no início dos anos 90 e percepções diferenciadas surgiram desde que o tema foi proposto. Porém, o principal avanço foi o aceite da sociedade à importância de avaliar a qualidade do solo. Segundo Doran et al. (1994) uma definição mais complexa para QS, envolve a capacidade do solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema, sustentando a produtividade biológica, mantendo a qualidade do meio ambiente e promovendo a saúde das plantas e dos animais. Em seu ensaio estes propuseram que produção sustentável seja definida seguindo os critérios: a) produção de plantas e resistência à erosão; b) qualidade do meio ambiente como função da qualidade do solo, da água e do ar e, c) saúde humana e animal,

abrangendo a concepção de qualidade de alimentos, composição nutricional e segurança alimentar.

Usualmente a qualidade do solo é considerada sobre três aspectos: físico, químico e biológico, sendo importantes nas avaliações da extensão da degradação ou melhoria do solo e para identificar os manejos sustentáveis. No entanto, a qualidade física merece destaque especial, pois evidencia-se que tem grandes efeitos nos processos químicos e biológicos no solo (DEXTER, 2004; FREITAS et al., 2014).

O uso de metodologias que quantifiquem e qualifiquem as condições estruturais do solo nos vários sistemas de manejo é importante na avaliação da qualidade, considerada um indicador da sustentabilidade dos sistemas de uso e manejo (ARSHAD et al., 1996).

Assim, os impactos do uso e manejo na qualidade física e química do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes propriedades, entre elas podemos elencar a matéria orgânica, devido a sua importância na estruturação e fertilidade dos solos tropicais, além de seu desempenho nas funções ecológicas do solo. Sendo que a matéria orgânica engloba os resíduos vegetais em diversos estágios de decomposição, a biomassa microbiana, as raízes e a fração mais estável denominada húmus (CAMARGO et al., 1999).

A matéria orgânica afeta as características químicas, físicas e biológicas do solo. Entre as características químicas, destacam-se principalmente a disponibilidade de nutrientes às culturas, a capacidade de troca de cátions e a complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, fundamentais em solos tropicais, na sua maioria altamente intemperizados e ácidos. Do ponto de vista físico a característica mais visível é a agregação. A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetadas outras características físicas, como: densidade, porosidade, aeração, capacidade de retenção e a infiltração de água, que são fundamentais à sua capacidade produtiva. No tocante às características biológicas, a matéria orgânica as afeta diretamente, uma vez que atua como fonte de carbono, energia e nutrientes aos microrganismos, refletindo na ciclagem de nutrientes (CAMARGO et al., 1999; BAYER & MIELNICZUK, 2008).

As mudanças na composição da matéria orgânica e as reduções nos estoques de carbono comprometem a sustentabilidade desses agroecossistemas, uma vez que a maior disponibilidade, no solo, de compostos orgânicos pode aumentar a CTC (BAYER, 1999), a atividade microbiana (SCHERER et al., 2007), aumentar a capacidade de armazenamento de água no solo.

Entretanto, em algumas situações, principalmente naquelas em que mudanças de uso do solo ou alterações no sistema de manejo foram recentemente adotadas, a matéria orgânica pode não ser um eficiente discriminador das alterações na qualidade do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005), fazendo necessário o acompanhamento a médio e longo prazo, permitindo quantificar a magnitude e duração das alterações provocadas por diferentes modelos de ambiente (MARCHINI et al., 2015).

A quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) são governadas pela drenagem, acidez, disponibilidade de nutrientes, composição da microbiota e da mesofauna, temperatura do solo, relação carbono/nitrogênio e conteúdo de lignina do material vegetal, distúrbios ocasionados pelo manejo e cultivo, teor e tipo de argila do solo (GREENLAND et al., 1992; MIELNICZUK, 2008), além das condições climáticas locais (TOGNON et al., 1998). Solos com maior conteúdo de MO estável contribuem de maneira significativa para a redução das taxas de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (KRAGT et al., 2012).

Nas regiões tropicais, quando a vegetação nativa é substituída por sistemas agrícolas, o estoque de MOS pode reduzir significativamente pela exposição desta a uma intensa atividade microbiológica, o que resulta na sua rápida decomposição e mineralização (MIELNICZUK et al., 2003). Nos sistemas agrícolas, a dinâmica da MOS pode ser modificada pelo manejo, por meio da seleção de culturas e formas de preparo do solo e, pela adição de fertilizantes minerais e materiais orgânicos (LEITE et al., 2003). Além disso, a natureza textural do solo, preparo do solo, umidade e temperatura também são fatores importantes que influenciam a dinâmica da matéria orgânica, composição e acumulação no solo (GUIMARÃES et al., 2014).

Atualmente, com a adoção de sistemas conservacionistas de cultivo, como é o caso do Plantio Direto (PD) e o Reduzido (PR), tem-se evidenciado sobre a necessidade da reserva, que se constitui no material precursor da futura matéria orgânica humificada, assim como, sobre a importância dessa fase na ciclagem dos nutrientes, no controle da umidade e da temperatura, infiltração de água, erosão e da atividade biológica do solo (CANELLAS et al., 1999).

#### **2.4. Dinâmica do estoque de carbono e nitrogênio no solo**

Na condição de mata natural, os processos de ciclagem do carbono (C) têm como determinantes primários os fatores de formação do solo, clima, paisagem, vegetação,

mineralogia e interações entre esses fatores, uma vez que exercem influência sobre o aporte de resíduos e sobre as saídas de C do solo (STEVENSON, 1994; TORNQUIST et al., 2009).

Já nos sistemas agrícolas, o uso e o manejo do solo atuam modificando tanto a entrada como a saída de C do solo para a atmosfera, em função da produção diferenciada de resíduos, do número de cultivos, das espécies vegetais, da adubação, dos procedimentos de colheita, dos métodos adotados de preparo do solo e do manejo dos restos culturais (LAL & BRUCE, 1999).

O estoque de carbono orgânico do solo (COS) pode ser alterado com variação de intensidade, dependendo do sistema agrícola instalado, sendo um dos atributos mais sensíveis às transformações desencadeadas pelo manejo. Práticas de manejo inadequadas podem levar a um rápido declínio do estoque de COS, contribuindo para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> à atmosfera (FREIXO et al., 2002; BAYER et al., 2006).

Por outro lado, sistemas de manejo que aumentem a adição de resíduos vegetais e a retenção de C no solo representam alternativas importantes para aumentar a capacidade de dreno de C-CO<sub>2</sub> atmosférico e mitigação do aquecimento global (BAYER et al., 2006; CARNEIRO et al., 2009), além da melhoria das qualidades emergentes que se consegue com esse “sequestro de C” (WENDLING et al., 2014), sejam físicas e químicas do solo.

Mudanças de uso do solo, principalmente quando este se encontra sob vegetação nativa, acarretam perdas de carbono orgânico do solo (COS). Isso ocorre principalmente devido à redução da deposição de resíduos orgânicos e à exposição da matéria orgânica do solo antes protegida fisicamente. Contudo, essas perdas são mais intensas em condições tropicais, como as deste estudo, em que fatores como temperatura e umidade proporcionam condições ótimas para a microbiota do solo (STEVENSON, 1994; SOLOMON et al., 2002; CERRI et al., 2003).

Fontana et al. (2014) verificaram que as variações do relevo e do material de origem influenciam a matéria orgânica do solo e o teor de carbono orgânico em horizontes superficiais de perfis de solo em três topolitossequências no ambiente de Mar de Morros, município de Pinheiral, RJ.

O nitrogênio prontamente disponível às plantas é representado pelo nitrogênio mineral (amônio e nitrato), o qual representa apenas de 1% a 2% do nitrogênio total no solo. Estas duas formas, de nitrogênio, extremamente dinâmicas no solo, são produzidas a partir da mineralização do nitrogênio orgânico (VALE et al., 1993).

Em estudos realizados nos diferentes biomas brasileiros, de maneira geral, os autores demonstraram haver relação entre o teor de C e N do solo e o tipo de vegetação (SIQUEIRA NETO et al., 2010; MAIA et al., 2010; FRAZÃO et al., 2010).

Os estoques de N, assim como os de C, variam de forma semelhante, ocorrendo a redução inicial dos teores de N no solo, em consequência da mineralização do N contido na MOS e sua posterior perda por erosão e lixiviação, aliado ao baixo aporte de resíduos vegetais e à grande demanda por N na fase inicial de crescimento das culturas (ANDRADE et al., 2005). De acordo com Neu (2005) maiores aportes de resíduo ao solo, resultam no maior e mais rápido acúmulo de N, uma vez que a principal fonte desse elemento é via deposição de resíduos orgânicos.

Os resultados de Binkley et al. (2004) mostraram que os fluxos e as formas de N no solo (orgânica ou inorgânica), bem como sua influência sobre o acúmulo de C no solo, variaram substancialmente entre sítios e estudos, indicando que não existe um modelo simples para descrever todas as situações. Para esses autores, a maior influência do N sobre o solo se dá devido aos seus efeitos sobre a microbiota do solo.

A grande dificuldade na avaliação da disponibilidade do nitrogênio está associada à dinâmica complexa desse elemento no solo. A mineralização da matéria orgânica e a imobilização de formas minerais são variáveis, dependendo da disponibilidade de resíduos orgânicos, de fatores climáticos e de condições do próprio solo. Além disso, o nitrato é muito móvel no solo, estando sujeito à lixiviação em climas úmidos, podendo, por capilaridade, ascender no solo, em períodos secos de grande evaporação de água na superfície do solo, principalmente em regiões áridas e semi-áridas (RAIJ, 1991).

## **2.5. Dinâmica do Carbono e Nitrogênio em cana-de-açúcar com queima da palha**

Quando a área natural é substituída por uma cultura submetida a um ambiente intensivo, como a cana-de-açúcar, o estoque de C do solo decresce substancialmente, não sendo recuperado (MAIA & RIBEIRO, 2004). Esses mesmos autores afirmaram que mais de 50% da matéria orgânica previamente acumulada é perdida por diversos processos nos primeiros anos de cultivo, entre eles, a decomposição microbiana e a erosão.

Rosset et al. (2014) ao avaliarem as alterações no estoque de carbono orgânico total de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes manejos de colheita, verificou no solo sob vegetação nativa em todas as profundidades os maiores



teores de COT em relação às áreas manejadas com cana-de-açúcar. Sendo estes relacionados ao aporte constante de resíduos vegetais sobre a superfície do solo, bem como a não perturbação do sistema, diferentemente das áreas manejadas, onde há mobilização do solo no momento da reforma do canavial aumentando a exposição do carbono ao ataque microbiano e efeitos erosivos, além da prática da queima que precede a colheita, contribuindo para a perda de carbono orgânico do solo na forma de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (CEDDIA et al., 1999; MENDONZA et al., 2000).

Ao estudarem áreas de tabuleiros costeiros cultivados com cana-de-açúcar sem queima da palhada, Chaves e Farias (2008) observaram maiores estoques de carbono na camada 0-0,30 m em relação às camadas 0,30-0,60 e 0,60-0,90 m. Os autores relacionaram essa distribuição aos teores de carbono orgânico, que acompanharam essa redução com o aumento da profundidade do solo, atribuindo os maiores teores e estoques de carbono na camada superficial à deposição da palha da cana-de-açúcar na superfície do solo.

A palha, no sistema de cultivo da cana-de-açúcar, constitui parte do processo de produção e favorece na manutenção de propriedades químicas, físicas, biológicas e ecológicas do solo e da cultura. As transformações dos resíduos vegetais que chegam ao solo, e sua decomposição até formas inorgânicas são resultantes da atividade de animais e microrganismos deste ecossistema (BENAZZI et al, 2013).

A palhada da cana-de-açúcar apresenta maior conteúdo de materiais facilmente degradáveis, o que resulta em elevado teor nutricional para os organismos decompositores. O acúmulo da palhada corresponderia a um aporte orgânico similar ao que acontece em ambientes florestais pela deposição de serrapilheira. No caso particular da colheita crua (sem a queima) adicionam-se aspectos favoráveis como a manutenção da umidade do solo; controle de daninhas e redução no uso de herbicidas; controle da erosão; aumento da matéria orgânica à longo prazo; e redução da poluição atmosférica pela ausência de queima, à importância deste tipo de manejo no ciclo de nutrientes (PINHEIRO, 1996).

Já a queima do canavial afeta a biota do solo associada à cultura, diretamente, pelo fogo ou, indiretamente, pela remoção da palhada que protege o solo expondo-o a variações de temperatura e umidade, por meio da incidência solar, devido as maiores taxas de evaporação e evapotranspiração. A queima, eliminando a cobertura do solo, altera condições ambientais, de abrigo, e de alimentação limitando os nichos ecológicos (ARAÚJO FILHO & BARBOSA, 2000).

A prática do manejo com fogo altera as condições de sobrevivência da fauna edáfica, interferindo diretamente na respiração do solo, diminuindo a oferta de compostos mineralizáveis pelos microrganismos do solo, promovendo competição e indicando estresse. Confirma-se que o fogo pode ser muito prejudicial aos microrganismos que atuam na decomposição da matéria orgânica, principalmente devido às altas temperaturas (EVANGELISTA et al., 2013).

Enquanto a queima remove nutrientes do ecossistema, a disponibilidade de nutrientes na camada de cinzas é geralmente maior que na serrapilheira não perturbada. Cátions e fósforo (P) estão prontamente disponíveis nas cinzas, as quais, usualmente, produzem aumento no potencial Hidrogênionico (pH) do solo. Adicionalmente, o N pode ser liberado das cinzas pela atividade microbiológica, imediatamente após a queima dos resíduos (TEIXEIRA et al., 1996)

Naturalmente, ocorrem perdas de N (volatilização e desnitrificação, em solos com microsítios com baixa difusão de O<sub>2</sub> em áreas de floresta) e enxofre (S) devido a reações redutoras em solo mediadas por bactérias. Esses processos de perdas, naturais e artificiais, representam, ao longo dos anos, saídas de nutrientes do sistema solo-planta, determinando uma menor eficiência na ciclagem de nutrientes em áreas de floresta (CAMPOS et al., 2005).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Localização da área experimental

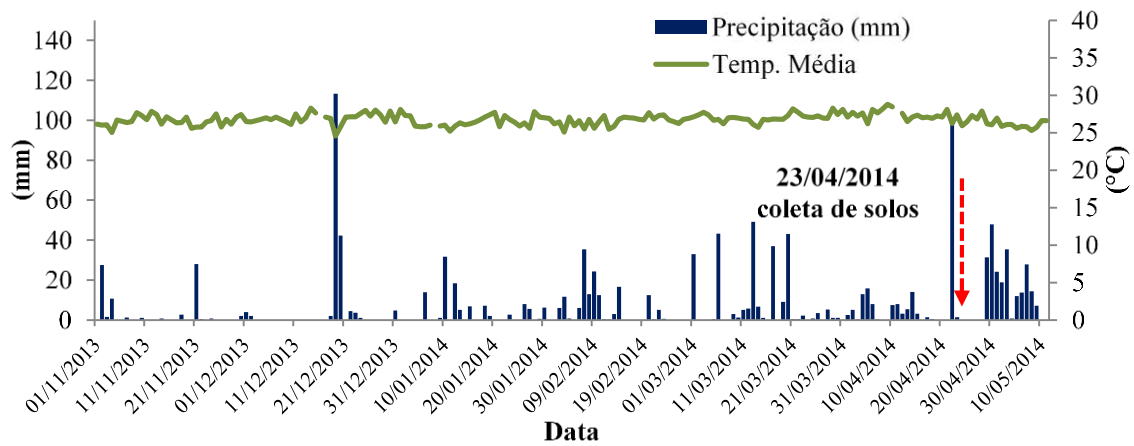
A área experimental está localizada na Usina Santa Teresa, Engenho Terra Rica, no município de Goiana, Zona da Mata Norte, Pernambuco, Brasil, nas coordenadas: Latitude 07° 34' 25" S e Longitude 34° 55' 39" W e altitude 62 m (Figura 1), inserida na bacia hidrográfica do rio Goiana, em que todos os cursos d'água têm regime de escoamento perene e o padrão de drenagem é o dendrítico.



**Figura 1.** Localização geográfica do estado de Pernambuco no Brasil, município de Goiana em destaque e localização da área de estudo

O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Amarelo coeso com predominância de textura arenosa, de acordo com a classificação EMBRAPA (2013), o qual é característico na maioria dos solos da região canavieira do Nordeste.

O clima da região, segundo a Classificação Climática de Köppen-Geiger, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com temperaturas médias anuais variando em torno de 24 °C. A precipitação média anual é de 2.002 mm (CPRH, 2003). A Figura 2 apresenta a distribuição temporal da precipitação e a temperatura do ar sobre a área de estudo no período próximo da realização das amostragens.



**Figura 2.** Precipitação diária e temperatura média do ar sobre a área de estudo no período de novembro/2013 à maio/2014

As áreas estudadas vêm sendo manejadas nos últimos anos com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) em plantio direto com queima prévia da palha para colheita, com corte realizado manualmente (Figura 3 a e b). A área vem sendo cultivada com cana-de-açúcar cultivar RB92579, com preparo mínimo, sendo realizada apenas uma sulcação e reposição de 500 kg ha<sup>-1</sup> de N, P e K a lanço anualmente. Próximo da área cultivada existe a presença de áreas de remanescente de mata (Figura 4).

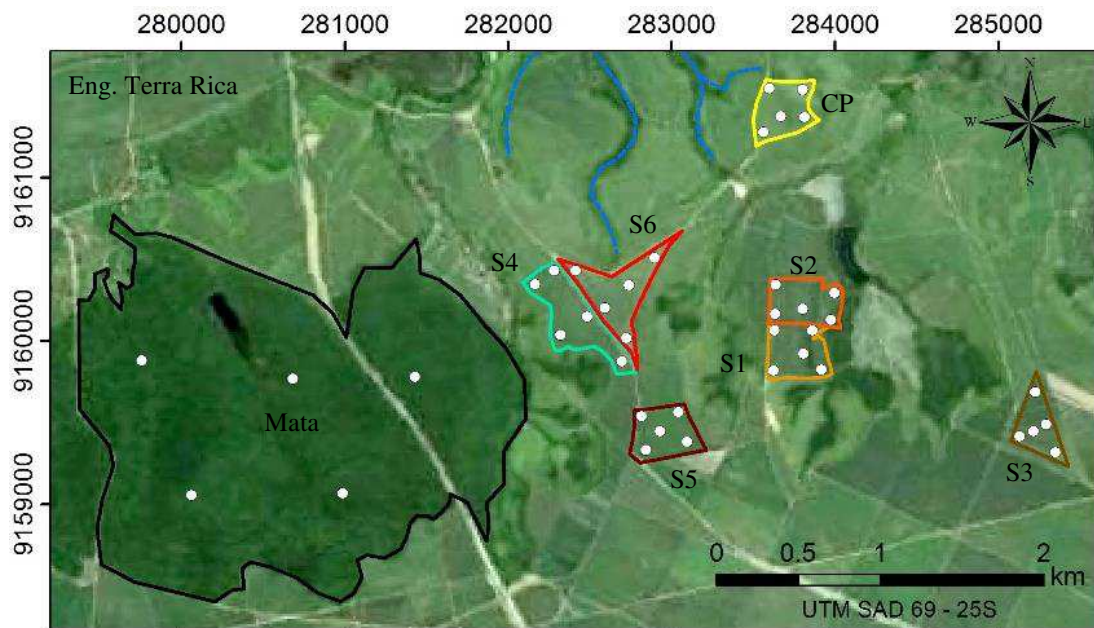
A.



B.

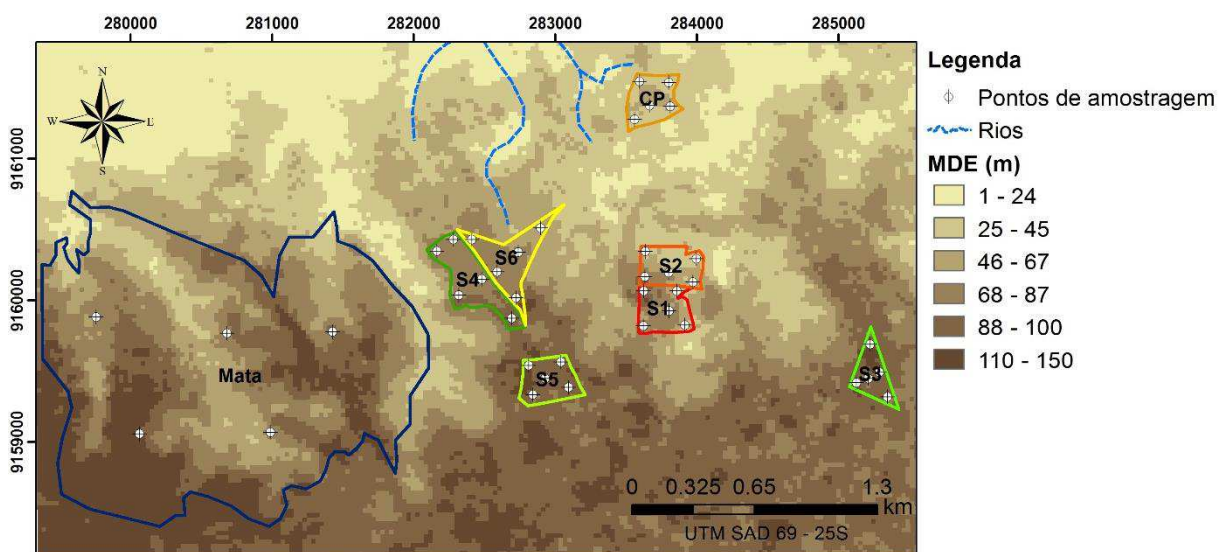


**Figura 3.** Área de estudo, cultivada com cana-de-açúcar colhida com queima e corte manual: paisagem da área experimental (A) e exposição da superfície do Argissolo Amarelo coeso (B)

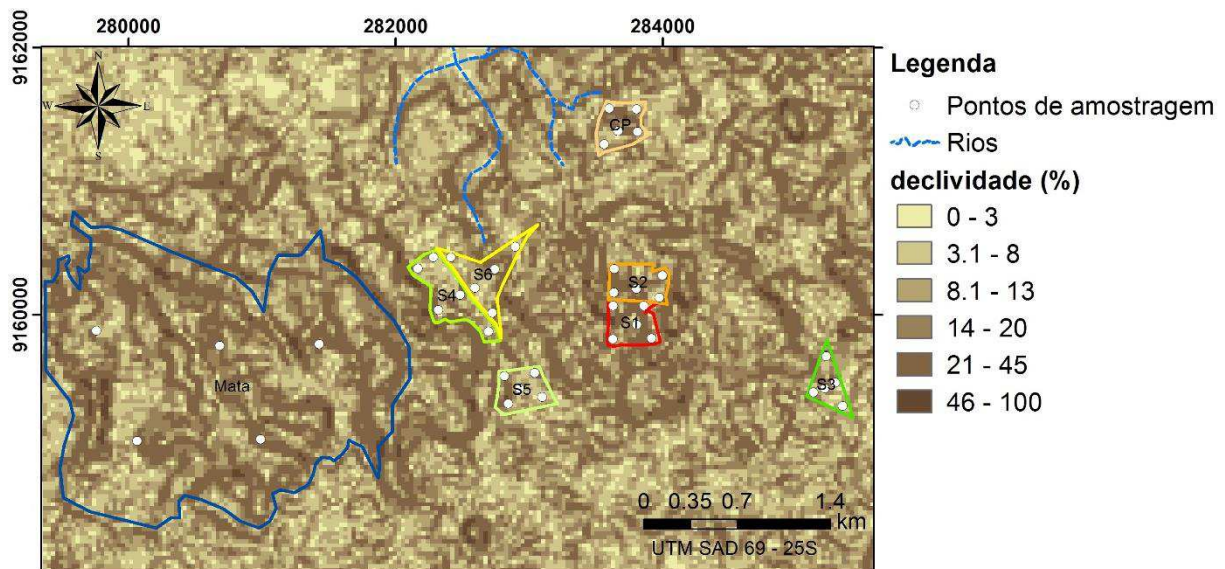


**Figura 4.** Mapa de localização dos talhões experimentais na área de estudo em Goiana (PE). CP – Cana Planta, S1 – Soca de 1º ano, S2 – Soca de 2º ano, S3 – Soca de 3º ano, S4 – Soca de 4º ano, S5 – Soca de 5º ano, S6 – Soca de 6º ano e S7 – Soca de 7º ano.

A topografia da área de estudo (Figura 5) foi determinada utilizando dados do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com o objetivo de gerar um modelo digital de elevação (MDE), e posteriormente possibilitando a determinação da declividade da área de estudo (Figura 6). Servindo para melhor compreensão da dinâmica do conteúdo volumétrico de água do solo, tal como relacionar com a distribuição dos demais atributos do solo.



**Figura 5.** Mapa do modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo em Goiana (PE)



**Figura 6.** Mapa de declividade da área de estudo em Goiana (PE)

A seleção dos talhões foi realizada com base na gestão logística e na proximidade dos talhões experimentais, afim de se obter o máximo de homogeneidade.

### 3.2. Amostragem do solo

Para avaliação dos atributos químicos, físicos e hídricos do solo, foram abertos perfis em locais que representassem as condições do sistema de manejo adotado nas áreas. A abertura dos perfis procedeu-se, priorizando locais representativos das áreas em questão (Figura 1). Foi realizada amostragem de solo de uma cronosequência de cultivo de cana-de-açúcar, em talhões situados na mesma situação topográfica. A cronosequência estudada foi composta por oito talhões com diferentes tempos de implantação do agrossistema bioenergético de cana-de-açúcar: Tempo zero (Mata, strictu sensu), um, dois, três, quatro, cinco, seis e sete anos de implantação dos sistemas de cultivo.

Foram adotados dois diferentes procedimentos de amostragem, sendo necessário realizar coletas de amostras deformadas e não deformadas, em que constituiu-se de coletas de amostras em diferentes profundidades demarcadas ao longo de todo o perfil, devendo ser coletadas 5 amostras simples de solo nas 7 profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm conforme procedimentos de estratificação adotados por Sisti et al. (2004) e Ivo (2012), para posterior determinação das concentrações de carbono orgânico e nitrogênio representativa de cada uma das parcelas para todas as

profundidades amostradas. As amostras foram coletadas com auxílio da abertura de trincheiras na entrelinha da cultura distribuídas aleatoriamente em cada tratamento.

As amostragens de solo na área de estudo foram realizadas no final do ciclo de cada talhão, após a colheita da cana-de-açúcar em todos os talhões experimentais, sendo realizado em abril de 2014, devido a ocorrência de eventos de precipitação comprometendo o procedimento de coleta do material do solo.

Para efeito de comparação dos resultados os atributos avaliados nas áreas de produção também foram amostrados em área de referência (tempo zero) na mata, para se determinar principalmente a relação do manejo do solo com o estoque de carbono e nitrogênio após a colheita da cana-de-açúcar.

A necessidade de se amostrar em áreas sem perturbação se justifica uma vez que estas áreas permitem incorporar ao trabalho dados genéricos sobre o estado inicial e a evolução do estoque de carbono com relação ao manejo empregado nas diferentes áreas, sendo em ambas as áreas os atributos avaliados em áreas de vegetação natural localizada próxima aos talhões cultivados.

### **3.3. Determinações analíticas efetuadas**

#### **3.3.1. Atributos químicos do solo**

Os atributos químicos do solo foram determinados no Laboratório de Química do Solo do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), de acordo com metodologia proposta pela EMBRAPA (2011): pH em  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>; MO por oxidação úmida e leitura colorimétrica; P, K, Ca e Mg extraídos por resina trocadora de íons; H+Al por leitura do pH SMP; e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> extraído com Ca (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) 0,01 mol L<sup>-1</sup>. Além da determinação do N Kjeldahl e matéria orgânica do solo pelo método volumétrico (EMBRAPA, 2011) para posterior determinação do carbono orgânico total do solo. Sendo determinados nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm de profundidade do solo.

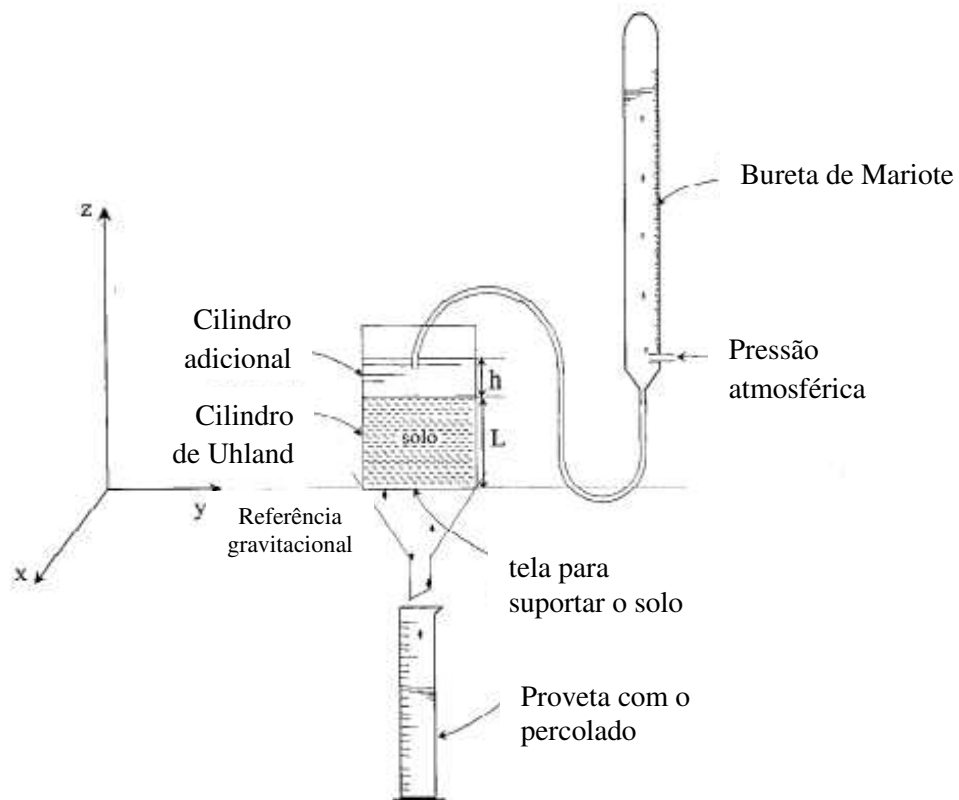
#### **3.3.2. Atributos físico-hídricos do solo**

A granulometria foi determinada no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco pelo método da pipeta nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm de profundidade (EMBRAPA, 2011).

Em cada ponto de amostragem também foram coletadas amostras em anéis volumétricos de  $100 \text{ cm}^3$  para efetuar determinações de densidade do solo, além da posterior determinação da condutividade hidráulica e porosidade total, macro e microporosidade, de acordo com metodologia proposta pela EMBRAPA (2011). Para tal avaliação foram utilizadas as mesmas amostras indeformadas utilizadas para a obtenção da condutividade hidráulica.

### 3.3.3. Condutividade hidráulica

Para avaliar a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) foi realizada a montagem de um permeâmetro de carga constante de laboratório (Figura 7). Este é um aparelho adequado para medição de  $K_0$  preferencialmente superior a  $2,10 \text{ mm s}^{-1}$ , constituindo-se no próprio experimento de Darcy. Neste experimento uma amostra indeformada de solo é submetida a uma coluna de água constante, provocando passagem de água na amostra saturada e sob uma pressão constante (LIBARDI, 2005).



**Figura 7.** Esquema de permeâmetro de carga constante de laboratório montado para avaliação da condutividade hidráulica saturada do solo



Quando a condição de regime estacionário é atingida, a equação 1 de Darcy-Buckingham (1907) é aplicada, sendo  $V_A$  o volume de água que passou pela amostra no tempo  $t$ ,  $A$  a área da secção transversal da amostra,  $L$  o comprimento da amostra e  $h$  o potencial de pressão no topo da amostra.

$$K_0 = \frac{V_A \times L}{A \times t \times (h+L)} \quad (1)$$

Em seguida realiza-se o ajuste da condutividade hidráulica para 20°C, conforme equação 2.

$$K_{20} = K_T \left( \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \right) \quad (2)$$

sendo:

$K_{20}$  – condutividade hidráulica a 20 °C,  $\text{cm s}^{-1}$

$K_T$  – condutividade hidráulica a T °C,  $\text{cm s}^{-1}$

$\mu_T$  – viscosidade da água a T °C (tabelado)

$\mu_{20}$  – viscosidade da água a 20 °C (0,01005)

Posteriormente, realiza-se a classificação da condutividade hidráulica saturada do solo, utilizando os valores de referência  $K_{20}$  da Soil Survey (United State Department of Agriculture - USDA, 1993). Ressalta-se que amostras com alta condutividade hidráulica não necessariamente indicam alta movimentação da água no campo, devido a camadas e horizontes de impedimento ou à posição na paisagem.

É importante que as amostras indeformadas de solo não apresentem rachaduras na borda do anel, deformações do anel ou indícios de compactação para as leituras no permeâmetro de carga constante de laboratório. Outro ponto importante a ser considerado é o sentido de coleta da amostra, já que o fluxo de água deve ser aplicado no mesmo sentido em que ocorre no campo, mantendo sempre a porção inferior do anel protegida com uma tela, evitando o destorroamento.

### 3.3.4. Estoque de carbono e do nitrogênio do solo

Os estoques de carbono e nitrogênio do solo foram determinados em amostras de solo retiradas nas distintas camadas com base no sistema de manejo, condições físicas do solo e profundidade efetiva do sistema radicular da cana-de-açúcar, conforme estratificação utilizada por Sisti et al. (2004) e Ivo (2012), com as seguintes camadas: 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, as amostragens do estoque de carbono e nitrogênio no solo na área de estudo foram realizadas após a colheita da cana-de-açúcar,

sendo realizado no final do ciclo de cada cultivo. Sendo o carbono determinado de acordo com EMBRAPA (2001). Para a determinação do estoque de carbono no solo realizou-se a abertura de 05 (cinco) trincheiras em cada um dos talhões.

Em todo sistema agrícola, a movimentação do solo e o tráfego de máquinas nas etapas de preparo do solo, tratos culturais e/ou colheita, causam compactação das camadas mais superficiais. Assim, seguindo recomendação de Sisti et al. (2004) o estoque de carbono foi calculado utilizando a equação 3, permitindo comparar estoques de nutrientes no solo sob sistemas agrícolas e/ou áreas de referência, em que as camadas de solo a serem comparadas devem possuir a mesma massa do solo do tratamento empregado como referência. O processo de ajuste da massa de solo foi realizado camada a camada, conforme a diferença entre as densidades do solo de cada camada.

$$C_s = \sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti} + \left[ M_{Tn} - \left( \sum_{i=1}^n M_{Ti} - \sum_{i=1}^n M_{Si} \right) \right] C_{Tn} \quad (3)$$

sendo:

$C_s$  - estoque total em Mg C ha<sup>-1</sup>

$\sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti}$  - soma do carbono da primeira (superfície) a penúltima camada no perfil do solo no tratamento avaliado (Mg ha<sup>-1</sup>)

$\sum_{i=1}^n M_{Ti}$  - soma da massa do solo da primeira a última camada no perfil do solo no tratamento avaliado (Mg ha<sup>-1</sup>)

$\sum_{i=1}^n M_{Si}$  - soma da massa do solo da primeira a última camada no perfil do solo no tratamento referência (Mg ha<sup>-1</sup>)

$M_{Tn}$  - massa do solo na última camada do perfil do solo no tratamento avaliado (Mg ha<sup>-1</sup>) e

$C_{Tn}$  - a concentração de carbono na última camada do perfil do tratamento avaliado (Mg C ha<sup>-1</sup> de solo).

A equação utilizada acima para determinação do estoque de carbono (Cs) também foi utilizada para determinação do estoque de nitrogênio (Ns).

### 3.4. Análise estatística multivariada

O tratamento estatístico dos dados foi realizado primeiramente por meio da análise estatística descritiva, com a determinação dos principais momentos estatísticos e posteriormente pelos respectivos intervalos de confiança da média, considerando  $\alpha=0,05$ , sendo utilizados os valores médios e seus respectivos erros padrões, para cada tempo de

implantação do sistema de cultivo da cana-de-açúcar. Os dados foram submetidos à análise de variância, e as comparações das médias das variáveis dentro de cada ambiente estudado foram realizadas pelo teste de Scott Knot a 5%. Além disso, foram utilizadas correlações estatísticas entre os estoques de C e N com os atributos químicos e físico-hídricos do solo, dentro de cada talhão.

Foram aplicados dois métodos estatísticos multivariados, visando classificar os acessos em grupos: análise de agrupamentos hierárquico (AAH) e análise de componentes principais (ACP).

A análise de agrupamentos hierárquica foi realizada calculando-se a distância euclidiana entre os acessos, para o conjunto das propriedades em estudo, visando obter agrupamentos de acessos similares. O resultado da análise foi apresentado de forma gráfica pelo dendrograma que auxiliará na identificação dos agrupamentos dos acessos.

Enquanto, a análise de componentes principais foi aplicada a fim de avaliar qualitativamente as características de cada área e verificar as variáveis que mais estão relacionadas com cada uma delas. A partir dos escores dos componentes principais obtivesse a matriz de distância euclidiana entre as formações. Para se reduzir os erros, devidos às escalas e as unidades das variáveis selecionadas, os dados foram padronizados com média zero e variância 1 (FREITAS et al, 2015).

Permitindo condensar a maior quantidade da informação original contida em  $p$  variáveis em duas variáveis latentes ortogonais denominadas componentes principais, que são combinações lineares das variáveis originais criadas com os dois maiores autovalores da matriz de covariância dos dados (HAIR, 2005).

Desta forma, o conjunto inicial de variáveis passou a ser caracterizado por duas novas variáveis latentes, o que possibilitará sua localização em figuras bidimensionais (ordenação dos acessos por componentes principais). A adequação desta análise foi verificada pela informação total das variáveis originais retidas nos componentes principais que mostram autovalores superiores à unidade, ou autovalores inferiores à qual não dispõem de informação relevante.

De acordo com Sousa Neto (2013) o uso da Análise Fatorial em conjunto com a Análise de Agrupamento permitiu visualizar o reflexo do manejo adotado no comportamento dos atributos químicos e físicos do solo.

Todas as análises estatísticas multivariadas dos dados foram processadas utilizando a linguagem e ambiente R, versão 2.15.1. (R. DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITA, C. Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: **Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. Santa Maria: Palloti, 1997. p.76-11.
- AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.1, p.189-197, 2001.
- ANDRADE, C.A.; OLIVEIRA, C.; CERRI, C.C. Qualidade da matéria orgânica e estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo tratado com biossólido e cultivado com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.5, p.803-816, 2005.
- ARATANI, R. C. **Qualidade física e química do solo sob diferentes manejos e condições edafoclimáticas no estado de São Paulo**. Jaboticabal: UNESP, 112p. 2008. Tese Doutorado.
- ARAÚJO FILHO, J. A.; BARBOSA, T. M. L. **Sistemas agrícolas sustentáveis para regiões semi-áridas**. Sobral, CE: EMBRAPA Caprinos, 2000. 18p. (Circular técnica, 20).
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSSA Special Publication. 49).
- BAGARELLO, V.; D'ASARO, F.; IOVINO, M. A Field assessment of the simplified falling head technique to measure the saturated soil hydraulic conductivity. **Geoderma**, v.187-188, n.1, p.49-58, 2012.
- BARROS, JOSÉ D. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; FARIAS, C. H. A.; PEREIRA, W. E. Estoque de carbono e nitrogênio em sistemas de manejo do solo, nos tabuleiros costeiros Paraibanos. **Revista Caatinga**, v. 26, n.1, p.35-42, 2013.
- BAYER, W. E. P.; C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da material orgânica. In: SATOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da material orgânica de solo**. 2. ed. rev. atual. E ampl. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.7-16.

- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v.86, n.2, p.237-245, 2006.
- BAYER, C.; DICK, D. P.; RIBEIRO, G. M. & SCHEUERMANN, K. K. Carbon stocks in matter fractions as affected by land use and soil management with emphasis on no-tillage effect. **Ciência Rural**, v.32, n.3, p.401-406, 2002.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.9-26.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.1, p.105-112, 1997.
- BENAZZI, E. S.; BIANCHI, M. O.; CORREIA, M. E. F.; LIMA, E.; ZONTA, E. Impactos dos métodos de colheita da cana-de-açúcar sobre a macrofauna do solo em área de produção no Espírito Santo – Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.6, p.3425-3442, 2013.
- BINKLEY, D.; KAYE, J.; BARRY, M.; RYAN, M.G. First-rotation changes in soil carbon and nitrogen in a Eucalyptus plantation in Hawaii. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, n.5, p.1713-1719, 2004.
- BISSANI, C. A.; MEURER, E. J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. Cap. 6, p.1-290.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14.ed., Upper Saddle River: Printice Hall, 2008. 965p.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. P. **The nature and properties of soils**. New Jersey. Ed Prentice Hall, 2002. 1000p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Culturas: cana-de-açúcar**. Secretaria de Produção e Agroenergia (SPAEE). Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 03 nov. 2012.
- CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; GUERRA, J. G. M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistema tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, p.27-40, 1999.

- CAMARGO, O. A., MONIZ, A. C., JORGE, J. A., VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química e física de solos do Instituto Agrônômico**. Campinas: Instituto Agrônômico, 94p. 1986. (Boletim técnico, 106).
- CAMPOS M. L.; MARCHI, G.; LIMA, D. M.; SILVA, C. A. **Ciclagem de nutrientes em floretas e pastagens**. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2005. 61p. (Boletim Agropecuário, n. 65).
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.69 - 90.
- CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.2, p.613-622. 2011.
- CARMO, J. B.; PICCOLO, M.; ANDRADE, C.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; NETO, E. S.; CERRI, C. C. Short-term changes in nitrogen availability, gas fluxes (CO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O) and microbial biomass after tillage during pasture re-establishment in Rondônia, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.96, n.1-2, p.250-259, 2007.
- CARNEIRO, C. E. A.; MELÉM JÚNIOR, N. J.; AZEVEDO, M. C. B. DE; ANDRADE, E. A.; KOGUISHI, M. S.; DIEHL, R. C.; RICCE, W. S.; PASSARIN, A. L.; VAZ, R. H. M.; STELMACHUK, T. L. L.; GUIMARÃES, M. F.; RALISCH, R. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o carbono orgânico total e carbono residual de um Latossolo vermelho eutroférico. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 30, n.1, p. 5-10, 2009.
- CARVALHO, A. M.; BUSTAMANTE, M.; KOZOVITS, A.; MIRANDA, L.; VIVALDI, L.; SOUZA, D. Emissão de óxidos de nitrogênio associada a aplicação de uréia sob plantio convencional e direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.1, p.679-685, 2006a.
- CARVALHO, G. J.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.765-771, 2006b.
- CEDDIA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um

- solo podzólico amarelo no Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.8, p.1467-1473, 1999.
- CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; ARATANI, R. G.; METZNER, A. F. M.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolo Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.2, p.199-209, 2007.
- CERRI, C. E. P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.; CERRI, C. C. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. **Soil Science Society America Journal**, v.67, n.6, p.1879-1887, 2003.
- CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, n.1, p.20-25, 2008.
- COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosion and productivity human life. In: Lal, R. (ed.). **Encyclopedia of Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 428-431.
- Companhia Nacional de Abastecimento Agropecuário – CONAB. **Cana-de-açúcar. Safra 2015/2016, primeiro levantamento**. 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&ordem=criterioSafra1>>. Acesso em: 29 jun. 2015.
- CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.5, p.777-788, 2005.
- COSTA, M. A. T.; TORMENA, C. A.; LUGÃO, S. M. B.; FIDALSKI, J.; NASCIMENTO, W. G.; MEDEIROS, F. M. Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.3, p.993-1004, 2012.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.1, p.323-332, 2008.
- COSTA, F. S.; GOMES, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases de efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, v.36, n.2, p.693-700, 2006.

- CPRH - Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos. **Diagnóstico sócio-ambiental do litoral norte de Pernambuco**. Recife, 214p, 2003.
- CRONQUIST, A. **An integrated system of classification of flowering plants**. New York: Columbia University Press, 1981. 1262p.
- DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica a penetração do solo sob sistema de plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, n.1, p.8-19, 2011.
- DANIELS, R. B.; HAMMER, R. D. **Soil Geomorphology**. 1992 Ed. John Wiley & Sons. New York. 236 p.
- D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.2, p.179-186, 2004.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory. Effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120,n.3-4, p.201-214, 2004.
- DIAS, B. O.; SILVA, C. A.; SOARES, E. M. B.; BETTIOL, W. Estoque de carbono e quantificação de substâncias húmicas em Latossolo submetido à aplicação contínua de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4, p.701-711, 2007.
- DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1994.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. <<http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>>. 3 Mar 2012.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Estoque de Carbono nos Solos do Brasil**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 121. 2007.
- EVANGELISTA, C. R.; PARTELLI, F. L.; FERREIRA, E. P. B.; PIRES, F. R. Atributos microbiológicos do solo na cultura da cana-de-açúcar sob manejo orgânico e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.4, p.1549-1562, 2013.



- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. **Influência do pH na produtividade do feijoeiro no sistema plantio direto em solo do cerrado.** 2008. Disponível em: [www.cnpfa.embrapa.br/conafe/pdf/conafe2005-0010.pdf](http://www.cnpfa.embrapa.br/conafe/pdf/conafe2005-0010.pdf). Acessado em: 29/09/2014.
- FAGUNDES, E. A. A.; SILVA, T. J. A.; BONFIM-SILVA, E. M. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.2, p.188–193, 2014.
- FERREIRA, R. R. M.; FILHO, J. T.; FERREIRA, V. M. Revisão: Efeitos do sistema de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v.31, n.4, p.913-932, 2010.
- FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções.** Santa Maria: UFSM. 2008. 116p. Tese de Doutorado.
- FRACETTO, F. J. C.; FRACETTO, G. G. M.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; SIQUEIRA NETO, M. Estoques de carbono e nitrogênio no solo cultivado com mamona na caatinga. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.36, n.5, p.1545-1552, 2012.
- FRAZÃO, L. A.; SANTANA, I. K. S.; CAMPOS, D. V. B.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.10, p.1198-1204, 2010.
- FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II - Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.805-818, 2009.
- FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.113-121, 2006.
- FREITAS, L.; Casagrande, J. C.; Oliveira, I. A.; Campos, M. C. C.; Oliveira, V. M. R. Atributos químicos de latossolo vermelho submetido a diferentes manejos. **Revista Floresta**, v. 45, n.2, p.229-240, 2015.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C. Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v.57, n.3, p.224-233, 2014.

- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E. Análises multivariadas de atributos físicos em latossolo vermelho submetidos a diferentes manejos. **Enciclopédia Biosfera**. v.8, n.15, p.126-139, 2012.
- FREIXO, A. A.; MACHADO, P. L. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; SILVA, C. A.; FADIGAS, F. S. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.2, p.425-434, 2002.
- GUIMARÃES, D. V.; GONZAGA, M. I. S.; MELO NETO, J. O. Management of soil organic matter and carbon storage in tropical fruit crops. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.3, p.301–306, 2014.
- GHELLER, A. C. A.; MENEZES, L. L.; MATSUOKA, S.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H. P.; ARIZONO, H.; GARCIA, A. A. F. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCAR/CCA/DBV, 1999. 7p.
- GREENLAND, D. J.; WILD, A.; ADAMS, D. Organic matter dynamics in soils of the tropics - from myth to complex reality. In: LAL, R.; SANCHEZ, P. A. **Myths and science of soils of the tropics**. SSSA, Special Publication n.29. Wisconsin: Copyright, 1992. p. 17-33.
- HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre, Brasil, 2005. 593p.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2001: the scientific basis**. United Kingdom: Cambridge University, 2001. 881p.
- IVO, W. M. P. M. **Dinâmica da matéria orgânica em áreas de produção de cana-de-açúcar colhida crua e queimada, no Nordeste do Brasil**. Recife: UFPE, 2012. 143 f. Tese Doutorado.
- JANZEN, H. H.; CAMPBELL, C. A.; IZAURRALDE, R. C.; ELLERT, B. H.; JUMA, N.; MCGILL, W. B.; ZENTNER, R. P. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. **Soil and Tillage Research**, v.47, n.3-4, p.181-195, 1998.
- JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; HONGYU, K.; PERBONI, A.; MARQUES, P. A. A.; DIAS, C. T. S.; COELHO, R. D. Análise multivariada e geoestatística de variáveis físico-hídricas de diferentes solos. **Water Resources and Irrigation Management**, v.2, n.3, p.121-129, 2013.
- KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo fundo: Embrapa trigo, 2000. 20p.

- KRAGT, M. E.; PANNELL, D. J.; ROBERTSON, M. J.; THAMO, T. Assessing costs of soil carbon sequestration by crop-livestock farmers in Western Australia. **Agricultural Systems**, v.112, n.10, p.27-37, 2012.
- LA SCALA JR., N.; BOLONHEZI, D., PEREIRA, G. T. Short-term soil CO<sub>2</sub> emission after conventional and reduced tillage of a no till sugar cane area in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.91, n.1-2, p.244-248, 2006.
- LAL, R.; BRUCE, J. P. The potential do world cropland soils to sequester C and mitigate the greenhouse effect. **Environmental Science & Policy**, v.2, n.2, p.177-185, 1999.
- LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J. C. L.; MACHADO, P. L. O. A.; GALVÃO, J. C. C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.5, p.821-832, 2003.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo, Edusp – Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335p.
- LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.1, p.1-12, 1996.
- LIMA, R. P.; LEON, M. J.; SILVA, A. R. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Revista Ceres**, v.60, n.4, p.577-581, 2013a. h
- LIMA, R. P.; LEON, M. J.; SILVA, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v.60, n.1, p.16-20, 2013b.
- LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. C.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.2, p.217-223, 2006.
- MAIA, S.M.F.; OGLE, S.M.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.106, n.2, p.177-184, 2010.
- 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, n.11, p.1127-1132, 2004.
- MARCHINI, D. C.; LING, T. C.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S.; SOUTO FILHO, S. N.; ARRUDA, O. G. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de

- Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.6, p.574–580, 2015.
- MARCHINI, D. C. **Agregação de um Latossolo em recuperação após 5 anos**. Ilha Solteira: FE/UNESP, 2012. 68p. Dissertação Mestrado.
- MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superficiais geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, v.19, n.2, p.265-281, 2000.
- MARTINS, E. L.; CORINGA, J. E. S.; WEBER, O. L. S. Carbono orgânico nas frações granulométricas e substâncias húmicas de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico – LVAd sob diferentes agrossistemas. **Acta Amazonica**, v.39, n.3, p.655-660, 2009.
- MELO FILHO, J. F.; DEMATTÊ, J. A. M.; LIBARDI, P. L., PORTELA, J. C. Comportamento espectral de um Latossolo Amarelo coeso argissólico em função de seu uso e manejo. **Magistra**, v.16, n.1, p.105-112, 2004.
- MENDONZA, H. N. S.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, L. A.; CEDDIA, M. B.; ANTUNES, M. V. M. Propriedades químicas e biológicas de solos de tabuleiros cultivados com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, n.1, p.201-207, 2000.
- MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.
- MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ, V. H. **Tópicos em ciência do solo**, eds. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3. p.209-248.
- MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DLACHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.6, p.1811-1822, 2010.
- MOREIRA, M. M. **Estoque de carbono e nitrogênio em áreas de vegetação nativa e antropizada no município de Irecê**. Cruz das Almas: UFRB, 2013. 52f. Dissertação Mestrado.

- NEU, V. **Influência da cobertura vegetal na ciclagem de nutrientes via solução do solo na região de Manaus – AM.** Piracicaba: ESALQ (USP), 2005. 93p. Dissertação Mestrado.
- NUNES, L. A. P. L.; DIAS, L. E.; JUCKSCH, I.; BARROS, N. F.; KASUYA, M. C. M.; CORREIA, M. E. F. Impacto do monocultivo de café sobre os indicadores biológicos do solo na zona da mata mineira. **Ciência Rural**, v.39, n.9, p.2467-2474, 2009.
- OKI, V. K. **Impactos da colheita de Pinus taeda sobre o balanço hídrico, a qualidade da água em microbacias.** Piracicaba: ESALQ (USP), 2002. 71 f. Dissertação (Mestrado)
- OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.4, p.1103-1112, 2013.
- OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.3, n.1, p.197-200. 1968.
- PANOSSO, A. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SCALA JÚNIOR, N. Spatial and temporal variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane area under green and slash and-burn managements. **Soil and Tillage Research**, v.105, n.2, p.275-282, 2009.
- PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; NACHTIGALL, G. R. Produtividade do arroz irrigado em sistema de cultivo contínuo e em rotação com soja e milho. In: Reunião da cultura do arroz irrigado, 18, 1989, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1989, p.150-160.
- PINHEIRO, L. B. A. **Estudo da macrofauna de solos cultivados com cana-de-açúcar, sob diferentes manejos de colheita – crua e queimada.** Rio de Janeiro: UFRRJ, 1996. 100p. Mestrado Dissertação.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM R. **A language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2012. URL <http://www.R-project.org>
- RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solo tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo, 285p, 2001.

- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1991. 343 p.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; MELO, L. C. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. Carbono orgânico e nitrogênio total do solo e suas relações com os espaçamentos de plantio de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.2051-2059, 2008.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, n.3, p.211-6, 1988.
- REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.3, p.310-319, 2009.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: NOVAIS, R.F. et al. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap. 2, p. 49-135.
- ROSSET, J. S.; SCHIAVO, J. A.; ATANÁZIO, R. A. R. Atributos químicos, estoque de carbono orgânico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.5, p.2351-2366, 2014.
- ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A.; CANTARELLA, H. Manutenção da fertilidade e recuperação dos solos na cultura da cana-de-açúcar. In: CORTEZ, L. A. B. (Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Edgard Bluncher Ltda., 2010. cap. 3, v.1, p.381-403. Disponível em: <<http://www.apta.sp.gov.br/cana/Coletanea.php?cap=3>>. Acesso em: 27 ago. 2010.
- SANTANA, M. S. **Estoques de carbono e nitrogênio em solos do sertão Pernambucano sob diferentes usos**. Recife: UFPE, 2015. 61 f. Dissertação Mestrado.
- SIQUEIRA NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A. N.; DOUZET, J. M.; FELLER, C.; PICCOLO, M. C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. **Soil and Tillage Research**, v.110, n.1, p.187-195, 2010.
- SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P. DOS; KOHHANN, R. A.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under

- 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.76, n.1, p.39-58, 2004.
- SCHERER, E. E. et al. Propriedades químicas de um latossolo vermelho sob plantio direto e adubação com esterco de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n.1, p.123-131, 2007.
- SCHUNKE, R. M. **Qualidade, decomposição e liberação de nutrientes da serapilheira de quatro cultivares de Panicum maximum**Jacq. Rio de Janeiro: UFRRJ, 1998. 121 f. Tese Doutorado.
- SHI, X. H.; YANG, X. M.; DRURY, C. F.; REYNOLDS, W. D.; MCLAUGHLIN, N. B.; ZHANG, X. P. Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario. **Soil & Tillage Research**, v.120, n.1, p.1-7, 2012.
- SILVA, W. P.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, E. F. F.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, V. G. F. Monitoramento da salinidade de águas subterrâneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.4, p.394-401, 2014.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistema de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.30, n.6, p.921-930, 2006.
- SILVA, J.R.; NOGUEIRA JUNIOR, S. Cereais de inverno: entraves e possibilidade no Estado de São Paulo. **Informativo Econômico**, v.31, n.5, p.51-57, 2001.
- SOLOMON, D.; FRITZSCHE, F.; LEHMANN, J.; TEKALIGN, M. & ZECH, W. Soil organic matter dynamics in the subhumid agroecosystems of the Ethiopian Highlands: Evidence from natural <sup>13</sup>C abundance and particle-size fractionation. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, n.1, p.969-978, 2002.
- SOUSA NETO, O. N. **Análise multivariada dos atributos físicos e químicos de um cambissolo cultivado sob práticas de manejo sustentável da caatinga**. Mossoró: UFERSA. 2013. 78f. Dissertação Mestrado
- SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.3, p.271-278, 2005.
- STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: Genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York: John Wiley e Sons, 1994. 496p.

- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.15, n.1, p.229-235, 1991.
- TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of different management systems on porosity of oxisols in Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3, p.899-906, 2010.
- TEIXEIRA, L. B.; SERRÃO, E. A. S.; TEIXEIRA NETO, J. F. Pastagens cultivadas na Amazônia: sustentabilidade e sua relação com a fertilidade do solo. In: Reunião Brasileira De Fertilidade Do Solo E Nutrição De Plantas, 22, 1996, Manaus. **Anais... Manaus: UA**, 1996. 259p.
- TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v.102, n.1, p.64-72, 2007.
- TOGNON, A. A.; DEMATTÊ, J. L. I.; DEMATTÊ, J. A. M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta Amazônica e dos Cerrados do Brasil Central. **Scientia Agricola**, v.55, n.3, p.343-354, 1998.
- TORNQUIST, C. G.; GIASSON, E.; MIELNICZUK, J.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M. Soil organic carbon stocks of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v.73, n.3, p.975-982, 2009.
- UNITED STATE DEPARTAMENT OF AGRICULTURE. **Soil survey manual: soil conservation service**. Washington, 1993. (Handbook, 18).
- VALE, F. R.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do Solo: dinâmica e disponibilidade dos nutrientes de plantas**. Lavras: FAEPE/ESAL, 1993. 171 p.
- VASCONCELOS, R. F. B.; SOUZA, E. R.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.4, p.381-386, 2014.
- VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S.; COSTA, Y. D. J.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo amarelo distrocoeso de Tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduo orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.2, p.309-316, 2010.
- WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; ALMEIDA, R. F.; ALVARENGA, R. C. Simulação dos estoques de Carbono e Nitrogênio pelo Modelo



- Century em Latossolos, no Cerrado Brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v.45, n.2, p.238-248, 2014.
- WEITZ, A.M.; LINDER, E.; FROLKING, S.; CRILL, P.M.; KELLER, M. N<sub>2</sub>O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v.33, n.7-8, p.1077-1093, 2001.
- ZIMMERMANN, A.; SCHINN, D. S.; FRANCKE, T.; ELSENBEER, H.; ZIMMERMANN, B. Uncovering patterns of near-surface saturated hydraulic conductivity in an overland flow-controlled landscape. **Geoderma**, v.195-196, n.3, p.1-11, 2013.

## **CAPÍTULO II**

---

### **ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM ARGISSOLO AMARELO COESO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR EM CRONOSSEQUÊNCIA**

## **ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM ARGISSOLO AMARELO COESO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR EM CRONOSSEQUÊNCIA**

**Resumo:** A determinação do estoque de carbono e nitrogênio do solo a longo prazo pode subsidiar discussões sobre manejo do solo. O objetivo do presente estudo foi avaliar a distribuição do estoque de carbono orgânico e nitrogênio total de um Argissolo Amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar em cronossequência com diferentes ciclos de cultivo, na Zona da Mata Norte de Pernambuco. A cronossequência estudada foi composta por oito talhões com diferentes tempos de implantação do agrossistema bioenergético de cana-de-açúcar: Tempo zero (Mata, strictu sensu), um (CP), dois (S1), três (S2), quatro (S3), cinco (S4), seis (S5) e sete anos de implantação dos sistemas de cultivo (S6). Os estoques foram avaliados em cinco amostras simples de solo por tratamento, em sete profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Os estoques de carbono orgânico (Cs) e nitrogênio total (Ns) foram avaliados pela análise de variância, complementada com análise multivariada de agrupamento hierárquico e componentes principais. Os estoques de Cs e Ns foram superiores na área de Mata, em todas as profundidades avaliadas. Já a relação de Cs/Ns foi superior nas áreas cultivadas. A substituição da vegetação de Mata por sistemas de cultivo de cana-de-açúcar com queima da palhada para colheita manual proporcionou diminuição de cerca de 50% nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total do solo. Os diferentes ciclos de manejo da cana-de-açúcar a longo prazo não são agrupados com a área de Mata, ao se considerar os estoques de carbono e nitrogênio, desta forma, o tempo de implantação do agrossistema (até 7 anos) ainda não foi suficiente para se equiparar aos estoques da Mata. Os tempos de implantação de cultivo de cana soca de quinto e sexto ano foram os ciclos que apresentaram similaridade com as condições da Mata quanto aos atributos avaliados na formação de grupos. Os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total apresentaram correlação com os atributos físicos avaliados de declividade e densidade do solo.

**Palavras-chave:** manejo do solo, qualidade do solo, sustentabilidade agrícola, ciclagem.

## **CARBON STOCK AND NITROGEN IN YELLOW ULTISOL COHESION GROWN WITH CANE SUGAR IN CHRONOSEQUENCE**

**Abstract:** The determination of carbon stock and long-term soil nitrogen can support discussions on soil management. The aim of this study was to evaluate the distribution of the stock of organic carbon and total nitrogen of a yellow Ultisol cohesive cultivated with sugarcane in chronosequence with different cycles of cultivation in the North Forest Zone of Pernambuco. The chronosequence was composed of eight plots with different bioenergetic agrosystem deployment times of sugarcane: zero time (Mata, strictly speaking), one (CP), two (S1), three (S2), four (S3), five (S4), six (S5) and seven years of implementation of farming systems (S6). Inventories were evaluated in five simple soil samples by treatment in seven depths of 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm. Organic carbon stocks (Cs) and total nitrogen (Ns) were evaluated by analysis of variance, complemented by multivariate analysis of hierarchical clustering and principal component. The Cs and Ns stocks were higher in forest area, at all depths evaluated. Already the Cs/Ns ratio was higher in cultivated areas. The replacement of forest vegetation by sugarcane cultivation systems with straw burning for manual harvesting provided decrease of about 50% in organic carbon stocks and total soil nitrogen. The different sugarcane long-term management cycles are not grouped with the Forest area, when considering the carbon and nitrogen stocks in this way, the agrosystem deployment time (up to 7 years) has not been enough to match to the Forest inventory. Cane cultivation deployment times soca fifth and sixth year were the cycles that showed similarity to the forest conditions on the attributes evaluated in the formation of groups. The organic carbon stocks and total nitrogen correlated with the assessed physical attributes of steepness and soil density.

**Keywords:** soil management, soil quality, agricultural sustainability, cycling.

## INTRODUÇÃO

A reserva de carbono (C) e nitrogênio (N) na matéria orgânica do solo (MOS) é uma estratégia importante para atenuar a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, tal como a reserva de nitrogênio minimizando a presença dos óxidos nitrosos (CERRI et al., 2010). O armazenamento de carbono preferencialmente na fração estável da matéria orgânica representa um benefício ambiental cuja manutenção depende fundamentalmente do manejo do solo (BAYER et al., 2004).

A substituição de ecossistemas naturais por agroecossistemas, com culturas introduzidas, envolve uma série de atividades que reduzem o aporte de biomassa e aumentam as perdas de C e N do sistema do solo por erosão, decomposição e lixiviação (ZINN et al., 2005). As alterações na MOS têm consequências sobre as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e se mostram dependentes das condições edafoclimáticas e das práticas culturais adotadas (CARIDE et al., 2012). Estudos que abordem o impacto da implantação de novos sistemas de manejo do solo e de culturas sobre as propriedades do solo, são relevantes no sentido de avaliar a sustentabilidade de diferentes agroecossistemas em uma região (RANGEL et al., 2008).

Em áreas cultivadas os teores de MOS dependem das taxas de adição de resíduos e da intensidade dos processos de decomposição da matéria orgânica (MO). No Brasil, quando a vegetação perene nativa de uma região é substituída por sistemas agrícolas, os teores de MO são reduzidos e registradas perdas de 80% dos estoques iniciais de MO na camada superficial do solo, em período de cinco anos de cultivo (SILVA et al., 1994). Em solos de regiões tropicais as perdas de C observadas após a retirada da vegetação natural e cultivo dos solos, são mais aceleradas do que em regiões temperadas (MIELNICZUK et al., 2003). Nos trópicos, temperaturas mais elevadas, altos índices pluviométricos e maior atividade microbiana, causam rápida decomposição dos materiais orgânicos incorporados e presentes no solo (LONGO & ESPÍNDOLA, 2000).

Um sistema impactante de cultivo, como o da cana-de-açúcar, pode apresentar diferenças significativas no estoque de carbono e nitrogênio do solo, cujas diferenças são atribuídas à variação de manejo empregado e ao tempo em que a mudança do uso da terra ocorreu. O manejo adequado do solo pode melhorar sua estrutura física e fertilidade, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> pelo maior acúmulo de material vegetal sob o solo acarretando em alta produtividade das plantas (BELZÁRIO, 2008).

Os teores de N apresentam nas diferentes profundidades do solo o mesmo padrão

de distribuição dos teores de C, com maiores valores observados em camadas mais superficiais, em que há maior acúmulo de MO, desta forma, também influenciados pelos sistemas de plantio (RANGEL et al., 2008). A relevância da inclusão do N nos estudos que avaliam a MOS, reside no fato dos compostos orgânicos representarem importante reservatório de formas de N potencialmente disponíveis para as culturas (D'ANDRÉA et al., 2004).

Poucas são as informações sobre as alterações nas propriedades do solo, em especial as relacionadas aos teores de C e N, decorrentes da implantação de diferentes ciclos de cana-de-açúcar em cronosequência. A magnitude desses processos pode ser avaliada em experimentos de longa duração, pela quantificação dos estoques de C orgânico e N total no solo, em comparação com o estoque inicial (COSTA et al., 2006).

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a distribuição do estoque de carbono orgânico e nitrogênio total de um Argissolo Amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar em cronosequência com diferentes ciclos de cultivo, na Zona da Mata Norte de Pernambuco.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização da área

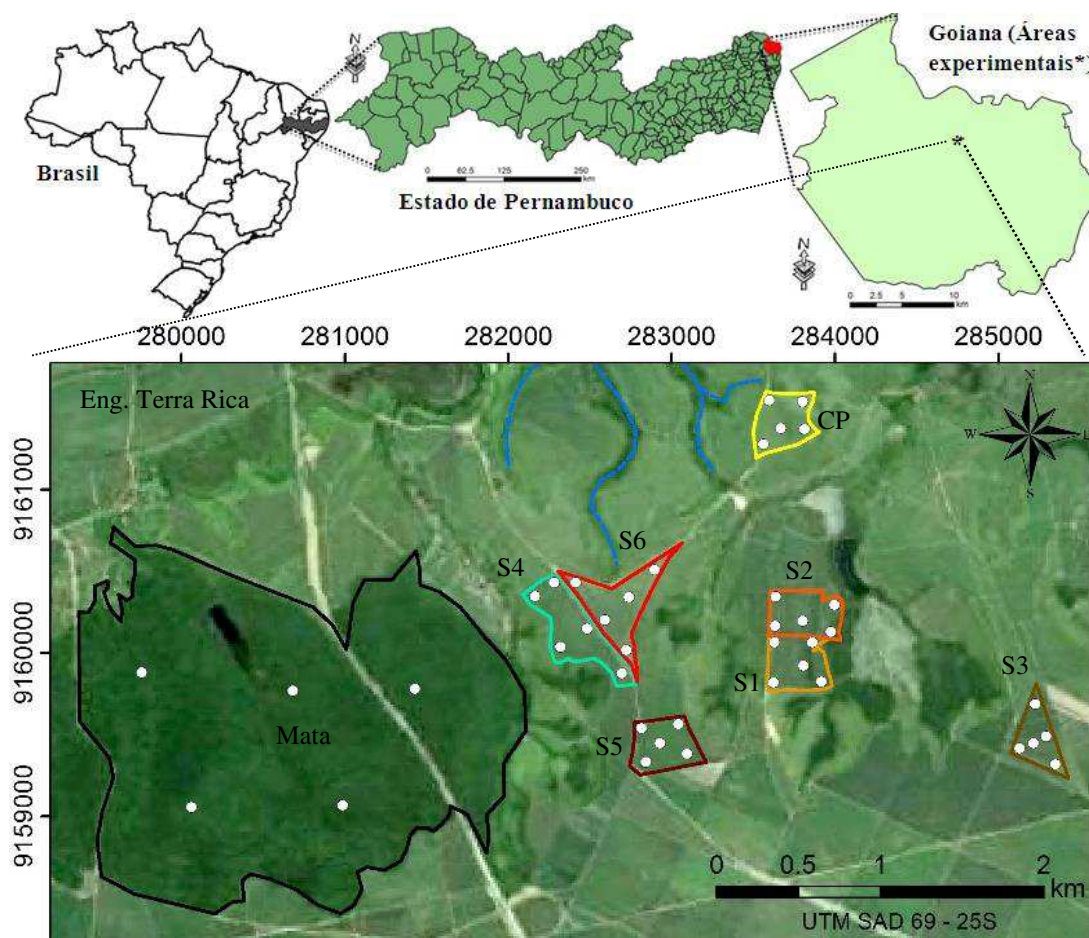
A área experimental está localizada na Usina Santa Teresa, Engenho Terra Rica, no município de Goiana, Zona da Mata Norte, Pernambuco, Brasil, nas coordenadas: Latitude 07° 34' 25" S e Longitude 34° 55' 39" W e altitude 62 m (Figura 1), inserida na bacia hidrográfica do rio Goiana.

O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Amarelo Coeso, textura arenosa, de acordo com a classificação EMBRAPA (2013) os quais são característicos na maioria dos solos da região canavieira do Nordeste.

O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, é tropical úmido, do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com temperaturas médias anuais variando em torno de 24 °C. A precipitação média anual é de 2.002 mm, com precipitação média mensal de 166,83 mm, concentrados principalmente no inverno (CPRH, 2003).

As áreas estudadas vêm sendo manejadas nos últimos anos com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) com queima prévia da palha para colheita, com corte realizado manualmente. Sendo cultivada com a RB92579, com preparo mínimo,

realizando-se apenas uma sulcação e reposição de 500 kg ha<sup>-1</sup> de N, P e K a lanço anualmente. Próximo da área cultivada existe a presença de áreas de remanescente de mata nativa (Figura 1).



**Figura 1.** Localização geográfica do estado de Pernambuco, no Brasil, município de Goiana em destaque, além da localização dos talhões experimentais da área de estudo

### **Amostragem dos teores de carbono orgânico e nitrogênio total do solo**

Para determinação dos teores de carbono orgânico e nitrogênio total do solo, foram abertos perfis em locais que representassem as condições do sistema de manejo adotado nas áreas, sendo realizada amostragem de solo de uma cronossequência de cultivo de cana-de-açúcar em talhões situados na mesma situação topográfica, sendo composta por oito talhões com diferentes tempos de implantação do agrossistema bioenergético: Tempo zero (Mata, strictu senso), um (CP), dois (S1), três (S2), quatro (S3), cinco (S4), seis (S5) e sete anos de implantação dos sistemas de cultivo (S6).

As amostras foram coletadas após realizada a colheita da cana-de-açúcar, em abril de 2014, no final do ciclo de cada talhão, sendo executada amostragem com auxílio da

abertura de trincheiras na entrelinha da cultura distribuídas aleatoriamente. Tendo-se adotado coletas de amostras deformadas e não deformadas, além de coletadas 5 amostras simples (repetições) de solo nas 7 profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, conforme Sisti et al. (2004). As amostras foram encaminhadas ao laboratório para obtenção do teor de matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), através da metodologia de EMBRAPA (2011).

Em todo o sistema agrícola a movimentação do solo e o tráfego de máquinas nas etapas de preparo do solo, tratos culturais e/ou colheita, causam compactação das camadas mais superficiais. Seguindo recomendação de Sisti et al. (2004) para comparar estoques de nutrientes no solo sob sistemas agrícolas e/ou áreas de referência, as camadas de solo a serem comparadas devem possuir a mesma massa do tratamento empregado como referência. O processo de ajuste da massa de solo foi realizado camada a camada, conforme a diferença entre as densidades do solo de cada camada.

A densidade do solo foi obtida por meio do método do anel volumétrico segundo EMBRAPA (2011) e utilizada para cálculo do estoque de carbono (Cs) e nitrogênio no solo (Ns), em cada uma das profundidades, segundo metodologia utilizada por Sisti et al. (2004), conforme equação 1.

$$C_s = \sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti} + \left[ M_{Tn} - \left( \sum_{i=1}^n M_{Ti} - \sum_{i=1}^n M_{Si} \right) \right] C_{Tn} \quad (1)$$

sendo:

$C_s$  é o estoque total em  $Mg\ C\ ha^{-1}$ ;

$\sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti}$  - Soma do carbono da primeira (superfície) à penúltima camada no perfil do solo no tratamento avaliado ( $Mg\ ha^{-1}$ );

$\sum_{i=1}^n M_{Ti}$  - Soma da massa do solo da primeira à última camada no perfil do solo no tratamento avaliado ( $Mg\ ha^{-1}$ );

$\sum_{i=1}^n M_{Si}$  - Soma da massa do solo da primeira à última camada no perfil do solo no tratamento referência ( $Mg\ ha^{-1}$ );

$M_{Tn}$  - Massa do solo na última camada do perfil do solo no tratamento avaliado ( $Mg\ ha^{-1}$ ) e

$C_{Tn}$  - Concentração de carbono na última camada do perfil do tratamento avaliado ( $Mg\ C\ ha^{-1}$  de solo).

Partindo da premissa de que a geomorfologia condiciona a variabilidade dos atributos físicos dentro de um segmento da paisagem com mesma classe de solo e condições climáticas, avaliou-se a relação entre parâmetros geomorfológicos (declividade



e altitude, a partir do MDE raster), densidade do solo, conforme EMBRAPA (2011) e os estoques de carbono e nitrogênio do solo.

### Análise estatística

Os dados dos teores de Cs e Ns e da relação Cs/Ns foram submetidos à análise de variância para verificação em cada profundidade de solo, dos efeitos dos ciclos de cultivo. As médias foram comparadas pelo teste de Scott Knott a 5 %, utilizando-se o aplicativo computacional SISVAR.

Também se procedeu à análise estática multivariada com a técnica de análise de agrupamento hierárquico, realizada através do algoritmo de agrupamento Ward, para obtenção dos agrupamentos de acessos similares; com cálculo das distâncias de forma euclidiana, utilizou-se o programa R. As variáveis consideradas na análise foram Cs, Ns, Cs/Ns, COT, NT, densidade do solo, declividade e altitude; posteriormente aplicou-se a análise de componentes principais (ACP) de todas as variáveis do solo, a fim de identificar a influência das variáveis consideradas quanto aos estoques de Cs e Ns.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após sete anos do cultivo de cana-de-açúcar com queima da palhada para colheita manual, constatou-se diferença significativa no Cs do solo entre os tempos de cultivo da cronosequência avaliados (Tabela 1), em todas as camadas. Com os maiores valores de Cs constatados para o tratamento Mata, tal fato justifica-se pelo maior aporte de MOS, proveniente da constante incorporação de resíduos vegetais oriundo da decomposição lenta e gradual, além da ausência da mobilização dessa área.

**Tabela 1.** Análise estatística do estoque de carbono orgânico total (Cs) do solo para os tempos de implantação da cronosequência, nas diferentes profundidades

Camada	Mata	CP	S1	S2	S3	S4	S5	S6
cm	Cs (Mg C.ha-1)							
0-5	31,71 bA	17,61 aA	20,09 aB	12,96 aA	20,10 aA	16,56 aA	18,403aA	13,62 aA
5-10.	56,07 cC	35,35 bB	42,49 bD	26,69 aB	37,06 bB	33,40 bB	36,546bB	27,78 aB
10-20.	51,04 cC	31,13 aB	39,63 bD	25,50 aB	33,09 aB	32,29 aB	32,48 aB	26,46 aB
20-40	51,43 cC	27,47 aB	33,30 bC	23,99 aB	32,91 bB	31,75 bB	31,05 bB	25,44 aB
40-60	40,60 bB	20,93 aA	24,67 aB	19,27 aA	27,81 aA	26,44 aB	26,76 aB	21,53 aB
60-80	29,78 cA	14,65 aA	11,65 aA	15,61 aA	22,52 bA	20,79 bA	19,95 bA	16,66 aA
80-100	28,23 bA	17,18 aA	14,88 aA	14,15 aA	25,06 bA	20,98 aA	20,76 aA	18,54 aA

Mata – Mata preservada; CP – Cana Planta, S1 – Soca de 1° ano, S2 – Soca de 2° ano, S3 – Soca de 3° ano, S4 – Soca de 4° ano, S5 – Soca de 5° ano, S6 – Soca de 6° ano. Médias seguidas de letras diferentes, maiúsculas na vertical e minúsculas na horizontal, diferem entre si pelo teste de Scott Knot ( $p < 0,05$ )

Sugere-se que a ausência de diferença estatística entre os tempos de cultivo na camada de 0-5 cm (com exceção da Mata), remete-se a influência do teor de argila da camada coesa existente em função do revolvimento mecânico, promovendo desta forma maior lixiviação e percolação das frações labéis da MOS na camada arável, aliado a maior exposição a mineralização e oxidação da MOS em função da maior aeração e a ciclagem desta em função da fauna epígea presente.

Em todas as camadas, a Mata foi estatisticamente diferente aos ciclos do sistema agrícola, apresentando maiores reservas, com exceção da camada 80-100 cm, cuja Mata foi estaticamente semelhante ao tratamento S3. O ciclo S2 apresentou os menores valores de Cs em praticamente todas as camadas avaliadas (Tabela 1).

Virto et al. (2011) mostraram que a variação de Cs pode ser positiva ou negativa, dependendo das entradas de C no sistema de produção agrícola. Paul et al. (2013) sugerem que futuros estudos devem estabelecer, para diferentes regiões climáticas e tipos de solo, os níveis de retenção de resíduos mínimos críticos para a manutenção do CO e conservação do solo.

Os estoques médios de Cs para as camadas avaliadas neste estudo estão superiores aos verificados por Fracetto et al. (2012) em estudo realizado no bioma Caatinga com cultivo de mamona na Bahia em Latossolo vermelho de textura argilosa, com valores máximos de 28,04 Mg ha<sup>-1</sup> na área de vegetação nativa contra 13,93 Mg ha<sup>-1</sup> na área cultivada com mamona. Fracetto et al. (2012), verificaram que a conversão da Caatinga para o cultivo da mamona ocasiona diminuição de cerca de 50 % no estoque de Cs no solo, corroborando com os valores obtidos nas camadas avaliadas.

Ao se avaliar os tempos de implantação da cronossequência de forma isolada por profundidade verificou-se que ocorre diferença estatística para os valores de Cs em todos os tratamentos, evidenciando, assim, que houve modificação dessa variável. O tratamento Mata apresentou diferença estatística para as camadas de 5 a 60 cm com maiores estoques, o que remete à presença da fauna epígea na ciclagem de nutrientes, conseqüentemente, o consumo e mineralização da matéria orgânica presente. Já os tratamentos com cultivo da cana-de-açúcar apresentaram diferença estatística nas camadas de 5 a 40 cm, com exceção do S1, o que pode ser compreendida como camada arável; logo, remete-se a incorporação das cinzas dos resíduos vegetais do processo de queima para colheita, associada com a lixiviação do MOS presente no solo.

Verificou-se a presença dos maiores estoques de Cs na camada de 5-10 cm, ocorrendo redução no Cs em profundidade em todos os ambientes, provavelmente devido

à diferença na espessura das camadas e à tendência de aumento da densidade, tanto com a profundidade do solo como com a mudança do uso de campo natural para ambientes agricultáveis, corroborando com os dados apresentados por Barros et al. (2013), constatando que a substituição da mata nativa pelo cultivo de cana-de-açúcar aumentou significativamente a densidade do solo.

Sugere-se que o aumento de Cs nas camadas mais superficiais (5 a 40 cm), foi causado possivelmente, pela percolação dos componentes lábeis e pela redistribuição de partículas da palhada pela fauna do solo. Também é aventada a hipótese de maior concentração e renovação de raízes superficiais nas entrelinhas cobertas pela palhada, além da incorporação dos nutrientes das cinzas provenientes da queima da palhada; havendo maior deposição de material leve. Smernik et al. (2000) relataram que com a queima da vegetação se adiciona carbono na forma de carvão, que apresenta reatividade biológica e química menor quando comparado a outros materiais orgânicos no solo.

Os maiores estoques de Cs observados nos tratamentos de cana soca de 1º nas camadas de 5 a 40 cm podem estar relacionados à menor intervenção das operações de revolvimento do solo, realizada por ocasião do preparo para o plantio da cana-de-açúcar. Em que o revolvimento do solo aumenta a superfície de contato do solo com o ar, que faz com que haja exposição da MO aos microrganismos decompositores, favorecendo a sua oxidação e decomposição, contribuindo significativamente para o decréscimo do seu teor ao longo dos anos (GÓES et al., 2005).

Avaliando os valores de Cs nas áreas de cana-de-açúcar (Tabela 1) observou-se redução significativa em relação à Mata de 59% no tratamento cana soca de 2º ano (S2) após a segunda queima da palha para colheita, na camada 0-5 cm. Tal redução do aporte de CO no solo não se deve unicamente à redução da quantidade de resíduos adicionados, mas também, possivelmente ao aumento da atividade microbiana, favorecido por melhores condições de aeração, temperaturas mais elevadas e alternância mais frequente de umedecimento e secagem do solo, pela sucessão contínua, pelas queimadas e pelas perdas devidas à própria erosão.

Quanto ao Ns do solo (Tabela 2) foi observada diferença significativa entre os tratamentos, em todas as camadas verificando-se comportamento estatístico similar ao Cs, os maiores teores de Ns também foram constatados para o tratamento Mata, estando associada à matéria orgânica, justificando seu maior acúmulo. Os quais são provenientes das deposições contínuas e variadas de diversos materiais orgânicos com diferentes graus de decomposição, oriundos da maior diversidade de espécies.

**Tabela 2.** Análise estatística do estoque de nitrogênio total (Ns) do solo para os tempos de implantação da cronosequência, nas diferentes profundidades

Camada	Mata	CP	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Cm	Ns (Mg C.ha <sup>-1</sup> )							
0-5	1,20 bA	0,26 aA	0,62 aA	0,39 aA	0,58 aA	0,43 aA	0,47 aA	0,46 aA
5-10	2,17 bB	0,61 aA	1,37 aB	0,81 aA	1,13 aB	0,90 aA	1,02 aA	0,92 aB
10-20	3,10 cC	0,95 aA	2,14 bC	1,26 aB	1,57 aB	1,47 aB	1,60 aB	1,37 aB
20-40	4,07 cD	1,38 aB	2,87 bD	1,74 aC	2,10 aC	1,98 aC	2,16 aC	1,80 aC
40-60	4,80 dE	1,69 aB	3,51 cE	2,19 bC	2,50 bC	2,37 bC	2,67 bC	2,17 bC
60-80	5,47 dF	1,93 aC	3,94 cF	2,64 bD	2,91 bD	2,76 bD	3,22 bD	2,54 bD
80-100	6,13 eG	2,17 aC	4,49 dF	3,13 bD	3,60 cE	3,13 bD	3,78 cD	2,99 bD

Mata – Mata preservada; CP – Cana Planta, S1 – Soca de 1º ano, S2 – Soca de 2º ano, S3 – Soca de 3º ano, S4 – Soca de 4º ano, S5 – Soca de 5º ano, S6 – Soca de 6º ano. Médias seguidas de letras diferentes, maiúsculas na vertical e minúsculas na horizontal, diferem entre si pelo teste de Scott Knot ( $p < 0,05$ )

O tratamento CP apresentou os menores valores de Ns em todas as camadas, estando relacionado à rápida decomposição da MOS. Os teores de NT dependem de fatores como temperatura, umidade, aeração, quantidade e natureza do material orgânico depositado no solo (CAMARGO et al., 1999). No solo de Mata a fonte de resíduos orgânicos está associada à deposição natural de restos de plantas que alcançam o solo na forma de folhas, galhos e outros fragmentos orgânicos bem como substâncias orgânicas derivadas da decomposição das raízes.

Enquanto, os demais tempos de implantação com queima corroboram com Canellas et al. (2007), os quais afirmam que a queima para despalha do canavial, além de reduzir o aporte de resíduos vegetais, favorece a oxidação da MOS e expõe a superfície do solo aos processos erosivos, verificando-se diminuição do estoque de MOS ao longo do tempo.

Ao se avaliar os tempos de implantação de cultivo de forma isolada por profundidade, verificou-se que existiu diferença estatística para Ns em todos os ciclos. A Mata apresentou diferença estatística para todas camadas, o que remete à mineralização gradativa do N elementar, além da ação de seus fatores no ciclo biogeoquímico do mesmo; já os ciclos de cultivo da cana-de-açúcar apresentaram diferença estatística nas profundidades avaliadas, cujas camadas superficiais podem estar relacionadas a deposição e ciclagem das cinzas da queima, enquanto a camada mais profunda pode ser justificada pela possível decomposição da MO existente no sistema radicular.

Os estoques médios de Ns para as camadas avaliadas neste estudo estão superiores aos verificados por Fracetto et al. (2012) os quais encontraram valores na ordem de 3,61 Mg ha<sup>-1</sup> para área de vegetação nativa de Caatinga contra 1,72 Mg ha<sup>-1</sup> na área cultivada com mamona. Constatou-se uma redução significativa em relação à Mata de 78% no

tratamento CP após o preparo do talhão, na camada 0-5 cm.

Para todas as camadas de estudo a diferença foi significativa entre os tratamentos para Ns, indicando efeito da vegetação e dos diferentes tempos de implantação de manejo sobre as variáveis analisadas. Os maiores valores Cs e Ns foram encontrados na Mata podendo estar relacionados à elevada riqueza de espécies, além de condições propícias ao desenvolvimento da fauna epígea inferindo que o material vegetal depositado nessa parcela possui maior decomposição e, conseqüentemente, maior retorno de MOS em função da ciclagem dos organismos decompositores.

Verificou-se predominância das maiores proporções dos estoques de Cs e Ns nos tratamentos com cultivo agrícola, cujo fato, pode ser justificado pela influência da densidade do solo diante das práticas de revolvimento mecânico do solo associado à incorporação das cinzas da queima da palhada. Ao observar a Tabela 3 pode-se averiguar que só ocorreu efeito significativo para relação Cs/Ns, entre os tratamentos avaliados nas profundidades de 0 a 20 cm, provavelmente em função da decomposição da MO armazenada nesta camada, resultante da exposição na substituição da Mata em que foi realizado revolvimento mecânico para preparo do talhão para cultivo.

**Tabela 3.** Análise estatística da relação do estoque de carbono (Cs) e nitrogênio (Ns) do solo para os tempos de implantação da cronossequência, nas diferentes profundidades

Camada	Mata	CP	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Cm	Cs/Ns							
0-5	26,42 aB	77,02 bE	32,68 aC	32,55 aC	34,80 aC	39,12 aC	41,34 aC	30,55 aC
5-10	25,79 aB	60,19 bD	30,84 aC	32,93 aC	32,63 aC	37,51 aC	36,22 aC	31,05 aC
10-20	16,43 aA	33,07 bC	18,34 aB	20,74 aB	21,09 aB	22,45 aB	20,37 aB	19,82 aB
20-40	12,55 aA	20,88 aB	11,56 aB	14,05 aA	15,64 aB	16,35 aB	14,46 aB	14,36 aA
40-60	8,48 aA	13,10 aA	7,01 aA	8,83 aA	11,11 aA	11,34 aA	10,04 aA	10,05 aA
60-80	5,48 aA	7,95 aA	2,93 aA	6,10 aA	7,74 aA	7,67 aA	6,22 aA	6,64 aA
80-100	4,61 aA	8,32 aA	3,24 aA	4,59 aA	6,94 aA	6,76 aA	5,54 aA	6,22 aA

Mata – Mata preservada; CP – Cana Planta, S1 – Soca de 1º ano, S2 – Soca de 2º ano, S3 – Soca de 3º ano, S4 – Soca de 4º ano, S5 – Soca de 5º ano, S6 – Soca de 6º ano. Médias seguidas de letras diferentes, maiúsculas na vertical e minúsculas na horizontal, diferem entre si pelo teste de Scott Knot ( $p < 0,05$ )

Observou-se diferenças significativas entre as profundidades avaliadas dentro de cada tempo de implantação, em virtude da modificação dos atributos do solo, sendo constatado distribuição decrescente das relações de Cs/Ns nas camadas avaliadas, em que foram observados maiores valores na camada de 0-5 cm.

Embora tenha apresentado diferença significativa para as camadas de 0 a 40 cm. Tais valores elevados das relações sugerem que o CO se encontrava em estágio mais avançado de humificação uma vez que valores entre 10 e 12 são normalmente encontrados

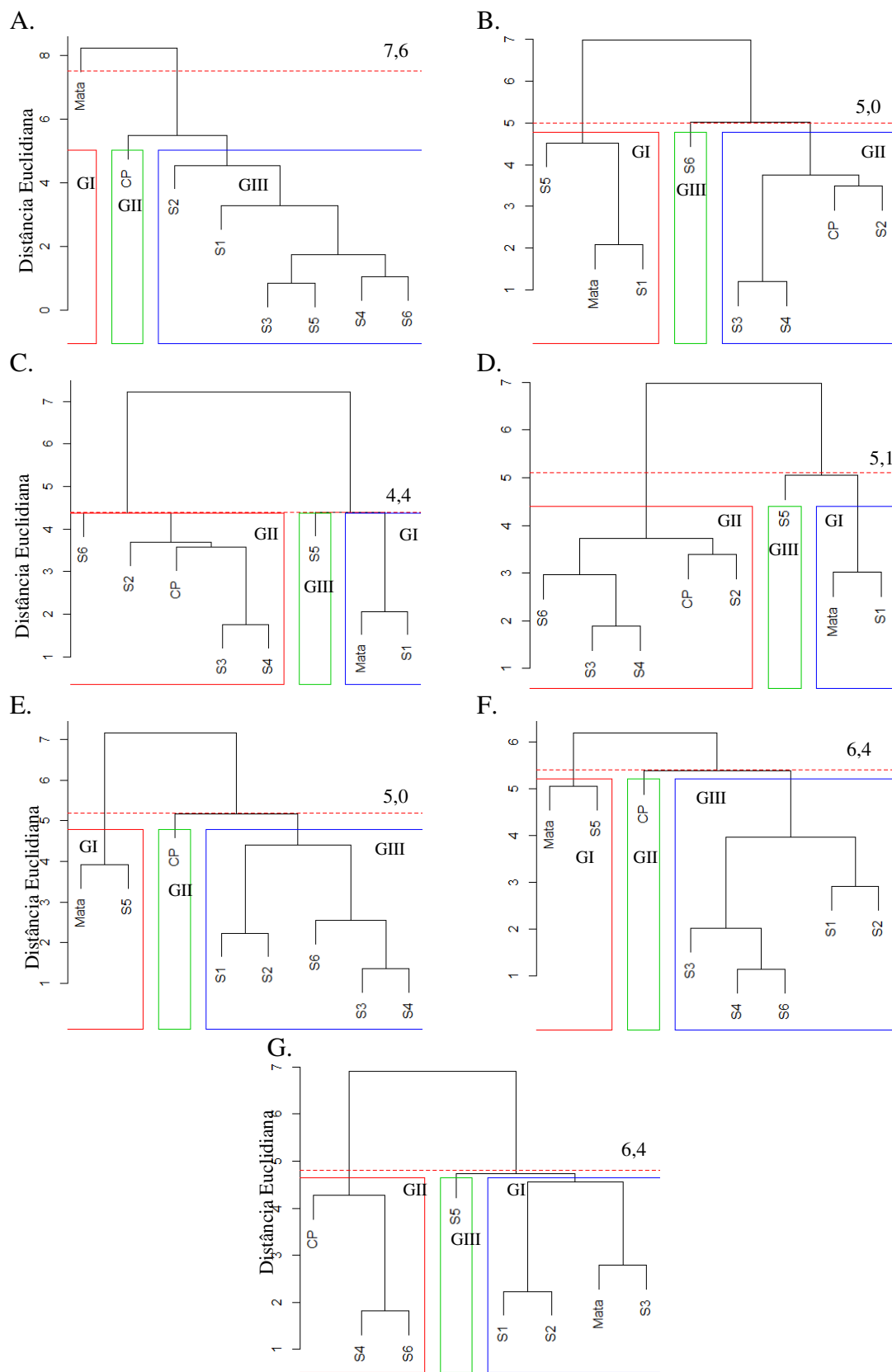
para solos cultivados (WENDLING et al., 2011). Estando os valores obtidos superiores aos obtidos por Fracetto et al. (2012), os quais obtiveram maiores relações de 12 para área de vegetação e 9,3 para área cultivada com mamona.

Os maiores valores de Cs/Ns foram constatados na CP podendo ser consequência da recente transição do sistema de Mata para cultivo, ocorrendo a presença dos resíduos vegetais da Mata depositados no solo, provenientes do revolvimento mecânico para preparo do talhão promovendo adições de resíduos orgânicos a camada. Enquanto, os menores valores entre sistema de cultivo foram constatados para o ciclo S1, o qual pode ser recorrente ao início da queima para despalha, promovendo menor deposição da MOS.

A diferença na relação Cs/Ns entre os diferentes ciclos de cultivo da cana-de-açúcar, foi mais acentuada mediante a modificação do sistema de Mata para cultivo no ciclo de CP, sendo que, a longo prazo da implantação do sistema, tende-se a estabilizar tais flutuações evidenciando que a diferenciação no manejo dos resíduos culturais altera significativamente o quociente (Tabela 3). Tal fato corrobora com Graham et al. (2002), em que atribuíram a menor relação Cs/Ns nas camadas superficiais ao suprimento de N tanto dos resíduos vegetais como dos fertilizantes aplicados.

Em todas as camadas avaliadas a relação Cs/Ns na área de Mata esteve abaixo da observada na área cultivada, o que pode estar associado ao fato dos tratamentos estudados terem proporcionado alterações significativas nos teores de Cs e Ns, a diminuição da relação Cs/Ns é condicionada pelo consumo dos resíduos vegetais pelos microrganismos do solo que o liberam na forma de CO<sub>2</sub>. Esse processo é indicativo da humificação da MO e neste caso, há indicação de que a decomposição e humificação se processam mais rapidamente no solo arenoso. Isto é coerente com a característica de maior macroporosidade nesse tipo de solo, o que proporciona melhores condições de aeração e atividade da microfauna decompositora (LUCA et al., 2008).

O teste de agrupamento por distância euclidiana não seguiu a mesma dinâmica do teste de Scott Knott a 5%, mostrando que, diferente deste, considera vários fatores que vão além da simples diferença estatística numérica. Na análise de agrupamento foi admitido um corte na distância euclidiana variando por profundidade da ordem de 4,4 a 7,6 (Figura 2), permitindo a divisão dos tratamentos dos diferentes ciclos de cultivo da cronosequência em grupos.



**Figura 2.** Dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico com a formação de grupos por profundidade: 0–5 cm (A), 5–10 cm (B), 10–20 cm (C), 20–40 cm (D), 40–60 cm (E), 60–80 cm (F) e 80–100 cm (G). GI – Grupo 1, GII – Grupo 2 e G3 – Grupo 3

Isto indica que, com o uso conjunto dos atributos físicos (Ds, altitude e declividade) e químicos (Cs, Ns, Cs/Ns, COT e NT) foi possível ordenar os dados em três grupos: o G1, englobando os dados formados pelos valores mais elevados quanto aos teores avaliados, em que se verificou predominância da área de Mata na camada 0-5 cm, sendo que na profundidade 5-10 cm passa a ser constituído pela Mata, S1 e S5, enquanto na camada 10 a 40 cm passa a ser formada pela Mata e S1, indicando, enquanto a camada 40 a 80 cm forma-se o grupo pela Mata e S5, desta forma, semelhança entre as características desses tempos de implantação, ou seja, grau de sustentabilidade após o período de implantação. A Mata se destacou dos demais (Figura 2) pois este ambiente possui alta variabilidade em razão dos fatores intrínsecos do solo, como a alta relação com sua concentração de MOS e sua respectiva ciclagem.

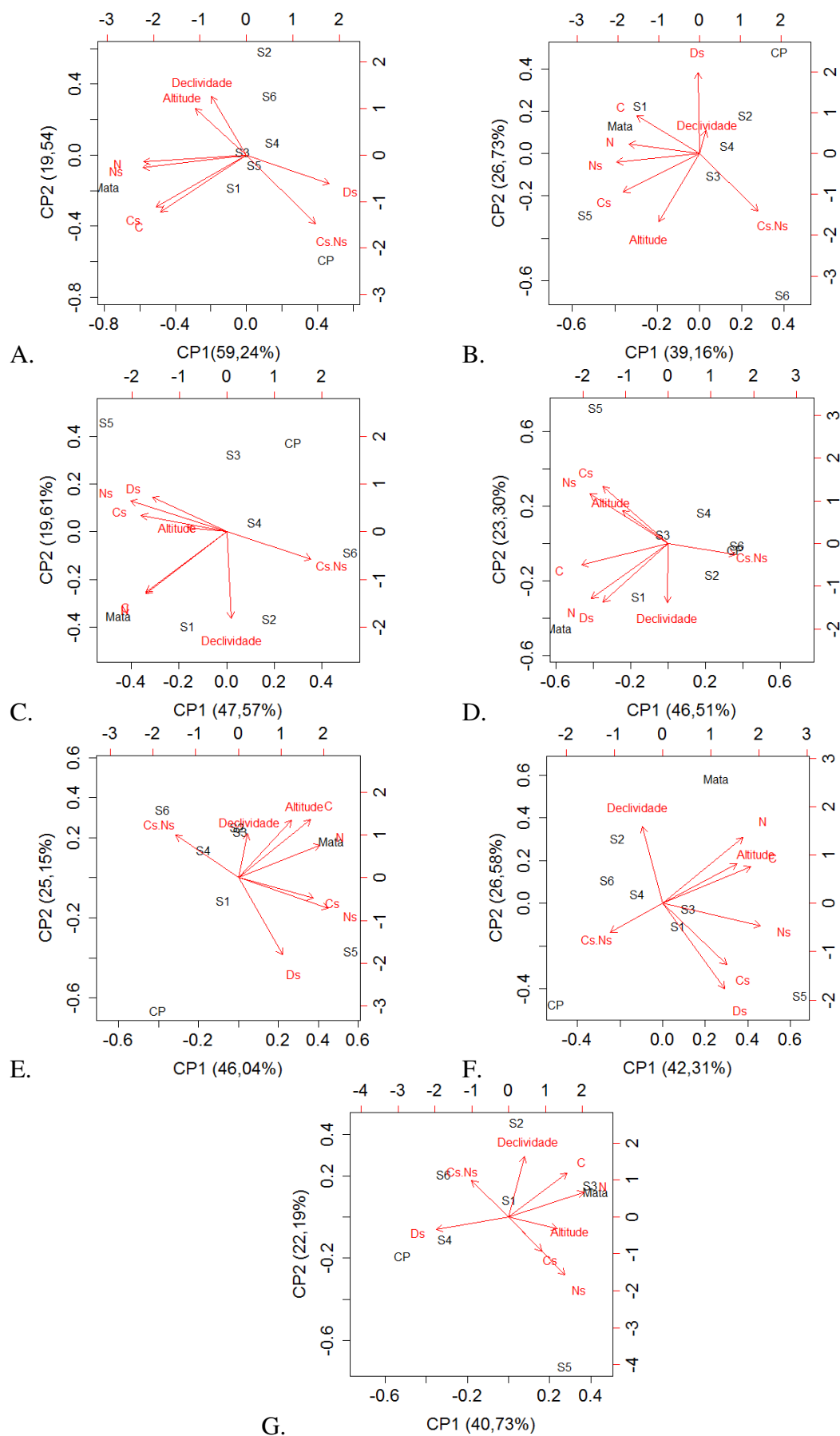
O G2, formado pelos dados com valores intermediários do tratamento CP isoladamente nas camadas 0-5, 40 a 80 cm de profundidade, passando a ser constituído pelos tratamentos CP, S2, S4 e S6 nas camadas de 5 a 40 cm, sendo provavelmente, decorrente das atividades de mecanização e preparo do solo para cultivo, mediante a substituição da Mata para uso agrícola.

O G3 foi formado pelos menores valores sendo que na camada 0-5 cm compreende maior quantidade de tempos de implantação dos ciclos de cultivo devido à homogeneidade quanto às características superficiais, envolvendo as áreas com queima para despalha. Na camada 0-5 cm verifica-se dissimilaridade do tratamento S6. Enquanto, as camadas 5-10 e 80-100 cm observa-se dissimilaridade para o ciclo S5. Constatando-se ainda, elevada similaridade nas camadas de 40 a 80 cm.

A diferenciação dos dados apresentados para as profundidades analisadas foi marcante, mostrando as particularidades de cada tempo de implantação, visto que as características dos atributos de um mesmo grupo são semelhantes e diferentes do comportamento de outros agrupamentos, o que corrobora com Freitas et al. (2014).

A análise multivariada pela técnica de componentes principais possibilitou determinar a influência das componentes ortogonais, tal como identificar as variáveis que exercem maior contribuição sobre os estoques de Cs e Ns, nas distintas profundidades avaliadas (Figura 3). As variáveis testadas, que correspondem aos atributos físicos e químicos do solo explicaram com suas variâncias acumuladas, em suas duas primeiras componentes, cerca de 62,92% (Figura 3f) a 78,78% (Figura 3a) de toda a variação dos estoques de Cs e Ns.





**Figura 3.** Biplot dos pesos de CP1 e CP2, resultante da análise de componentes principais por profundidade: 0–5 cm (A), 5–10 cm (B), 10–20 cm (C), 20–40 cm (D), 40–60 cm (E),

60–80 cm (F) e 80–100 cm (G)

Ao se observar a Figura 3, os gráficos de Biplot, apresentam a influência das variáveis na formação dos componentes principais por profundidade, verificando-se que, a localização dos tratamentos associado aos diferentes relevos e a densidade das camadas do solo também pode influenciar no Cs e Ns.

Os estoques de Cs e Ns foram influenciados pelos atributos físicos avaliados, na camada de 0-5, 10-20, 20-40 e 80-100 cm tiveram correlação com a declividade do relevo, enquanto que, nas camadas de 5-10, 40-60 e 60-80 cm foram influenciadas pela densidade do solo. Verifica-se, com base nas relações entre as variáveis, que o Cs e o Ns, têm sinal contrário ao da declividade, condizente com a variação dessa variável física, devido a declividade variar exatamente no sentido inverso dos estoques, ou seja, menor declividade promove maior deposição e, conseqüentemente, menor mobilização e mineralização pela decomposição da matéria orgânica do solo.

A densidade do solo (Ds) apresentou sobreposição dos eixos dos vetores com o Cs e Ns, nas camadas de 10-20 e 60-80 cm de profundidade o que indica, potencialmente, maior densidade proveniente de maior concentração de fração argila e MOS favorecendo o acúmulo de carbono orgânico e nitrogênio total. Verifica-se ainda, que a Mata apresentou as menores densidades do solo, com exceção da camada 20-40 cm (Figura 3), provavelmente em função da camada coesa do Argissolo.

## CONCLUSÕES

1. A substituição da vegetação de Mata por sistemas de cultivo de cana-de-açúcar com queima da palhada para colheita manual proporciona diminuição de cerca de 50% nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total do solo.
2. Os diferentes ciclos de manejo da cana-de-açúcar a longo prazo não são agrupados com a área de Mata, ao se considerar os estoques de carbono e nitrogênio, desta forma, o tempo de implantação do agrossistema (até 7 anos) ainda não foi suficiente para se equiparar aos estoques da Mata.
3. Os tempos de implantação de cultivo de cana soca de quinto e sexto ano foram os ciclos que apresentaram similaridade com as condições da Mata quanto aos atributos avaliados na formação de grupos.
4. Os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total apresentaram correlação com os

atributos físicos avaliados de declividade e densidade do solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, J. D. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; FARIAS, C. H. A. PEREIRA, W. E. Estoque de carbono e nitrogênio em sistemas de manejo do solo, nos tabuleiros costeiros paraibanos. **Revista Caatinga**, v. 26, p. 35-42, 2013.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 677-683, 2004.
- BELZÁRIO, M. H. **Mudança no estoque de carbono devido ao uso da terra no sudoeste da Amazônia**. 2008. 96 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição De Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- CAMARGO, F.A.C.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; VIDOR, C. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.117-137.
- CANELLAS, L. P.; BALDOTTO, M. A.; BUSATO, J. G.; MARCIANO, C. R.; MENEZES, S. C.; SILVA, N. M.; RUJANEK, V. M.; VELLOSO, A. C. X.; SIMÕES, M. L.; MARTIN-NETO, L. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.331-340, 2007.
- CARIDE, C.; PIÑEIRO, G.; PARUELO, J. M. How does agricultural management modify ecosystem services in the argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.154, n.7, p.23-33, 2012.
- CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; MAIA, S. M. F.; CERRI, C. E. P.; COSTA JÚNIOR, C.; FEIGL, B. J.; FRAZÃO, L. A.; MELLO, F. F. C.; GALDOS, M. V.; MOREIRA, C. S.; CARVALHO, J. L. N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, v.67, p.102-116, 2010.
- COSTA, F.S.; GOMES, J.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases de efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, v.36, p.693-700, 2006.
- CPRH – Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos. Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco. **Diagnóstico sócio-ambiental do litoral norte de Pernambuco**. Recife. 214p, 2003.

- D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. & GUILHERME, L.R.G. Estoques de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.179-186, 2004.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.<<http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>>. 3 Mar 2012.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J.C.; OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C. Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v.57, p.224-33, 2014.
- GÓES, G. B.; GREGGIO, T. C.; CENTURION, J. F.; AMAURI, N. B.; ANDRIOLI, I. Efeito do cultivo da cana-de-açúcar na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica do solo. **Irriga**, v. 10, p. 116-122, 2005.
- GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; MEYER, J.H. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **Soil Biology and Biochemistry**, v.34, p.93-102, 2002b.
- LONGO, R.M.; ESPÍNDOLA, C.R. C-orgânico, N-total e substâncias húmicas sob influência da introdução de pastagens (*Brachiaria* sp.) em áreas de Cerrado e Floresta Amazônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.723-729, 2000.
- LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHES, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.789-800, 2008.
- MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V., V.H. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3. p.209-248.
- PAUL, B. K.; VANLAUWE, B.; AYUKE, F.; GASSNER, A.; HOOGMOED, M.; HURISSO, T. T.; KOALA, S.; LELEI, D.; NDABAMENYE, T.; SIX, J.; PULLEMAN, M. M. Medium-term impact of tillage and residue management on soil

- aggregate stability, soil carbon and crop productivity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 164, p. 14-22, 2013.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; MELO, L. C. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. Carbono orgânico e nitrogênio total do solo e suas relações com os espaçamentos de plantio de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2051-2059, 2008.
- SCHOLES, R. J.; BREEMEN, N. The effects of global change on tropical ecosystems. **Geoderma**, v.79, p. 9-24, 1997.
- SMERNIK, R. J.; SKJESTAD, J. O.; OADES, J. M. Virtual fractionation of charcoal from soil organic matter using state  $^{13}\text{C}$  NMR spectral editing. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 665-683, 2000.
- SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.541-547, 1994.
- SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P. DOS; KOHHANN, R. A.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.76, p.39-58, 2004.
- VIRTO, I.; BARRÉ, P.; BURLLOT, A.; CHENU, C. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. **Biogeochemistry**, v. 108, p. 17-26, 2011.
- WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; VINHAL-FREITAS, I. C. Mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema agrossilvipastoril. **Ciência Florestal**. v.21, p.641-653, 2011.
- ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.4, p.28-40, 2005.

### **CAPÍTULO III**

---

## **ATRIBUTOS QUÍMICOS EM ARGISSOLO AMARELO COESO SOB CANA- DE-AÇÚCAR EM CRONOSSEQUÊNCIA DE CULTIVO**

## ATRIBUTOS QUÍMICOS EM ARGISSOLO AMARELO COESO SOB CANA-DE-AÇÚCAR EM CRONOSSEQUÊNCIA DE CULTIVO

**Resumo:** As alterações da cobertura vegetal e o uso do solo promovem mudanças na quantidade e na qualidade dos atributos químicos do solo. Nesse contexto objetivou-se avaliar os atributos químicos de um Argissolo amarelo coeso sob cana-de-açúcar em cronossequência de cultivo, na zona da Mata de Pernambuco, por meio de técnicas estatísticas multivariadas, inter-relacionando com atributos geomorfológicos. As áreas estudadas vêm sendo manejadas nos últimos anos com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), com queima prévia da palha para colheita, com corte realizado manualmente. Foi realizada amostragem do solo de uma cronossequência de cultivo de cana-de-açúcar, composta por oito talhões com diferentes tempos de implantação do agrossistema bioenergético de cana-de-açúcar: Tempo zero (Mata, strictu sensu), um (CP), dois (S1), três (S2), quatro (S3), cinco (S4), seis (S5) e sete anos de implantação dos sistemas de cultivo (S6). Foram coletadas amostras deformadas e não deformadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Em que foram avaliados pH, MO, P, K, Ca, Mg, H+Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn e calculadas a soma de bases (SB), a capacidade total de troca de cátions (T), a saturação por bases (V) e a saturação por alumínio (m). Utilizou-se da inter-relação destes com os atributos geomorfológicos de altitude, declividade, densidade do solo e condutividade hidráulica. Dois métodos estatísticos multivariados foram aplicados, visando classificar os acessos em grupos: análise de agrupamentos hierárquica (AAH) e análise de componentes principais (ACP). A substituição da vegetação nativa por sistemas de cultivo convencional propiciou alterações nos atributos químicos do solo verificando-se variações anuais quanto à redução das concentrações dos atributos químicos avaliados nos tratamentos CP, S2, S4 e S6; as áreas de cana-de-açúcar S3 apresentaram maior dissimilaridade, o que indica certo grau de intervenção antrópica, proveniente da adição contínua de insumos e resíduos vegetais, enquanto as áreas S1, S5 e a Mata apresentaram elevada similaridade garantido a resiliência nas camadas superficiais. Os atributos inter-relacionados às reações ácido-base no solo (pH, P, Ca, H+Al, SB, T, V%, Mn e Zn) contribuiram com o primeiro componente principal das profundidades superficiais até 40 cm.

**Palavras-chave:** fertilidade do solo, análise multivariada, longo prazo

## ATTRIBUTES CHEMICALS IN YELLOW ULTISOL COHESION UNDER CANE SUGAR IN FARMING CHRONOSEQUENCE

**Abstract:** Changes in vegetation cover and land use changes promote the quantity and quality of soil chemical properties. In this context aimed to evaluate the chemical attributes of a yellow Argisol cohesive under sugarcane in chronosequence cultivation in the area of Pernambuco Forest, through multivariate statistical techniques, interrelating with geomorphological attributes. The areas studied have been managed in recent years with sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), with previous straw burning for harvesting by cutting performed manually. Soil sampling of a chronosequence of sugarcane cultivation was performed, composed of eight plots with different bioenergetic agrosystem deployment times of sugarcane: zero time (Mata, strictly speaking), one (CP) two (S1), three (S2), four (S3), five (S4), six (S5) and seven years of implementation of farming systems (S6). Deformed samples were collected and undeformed at depths of 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm. Which evaluated pH, MO, P, K, Ca, Mg, H+Al, Cu, Fe, Mn, Zn and calculated the sum of bases (SB), the total capacity of exchange cations (T), base saturation (V) and aluminum saturation (m). We used the interrelationship of these with the geomorphological attributes of elevation, slope, soil density and hydraulic conductivity. Two multivariate statistical methods were applied, aiming to classify the access groups: hierarchical cluster analysis (HCA) and principal component analysis (PCA). The replacement of native vegetation by conventional farming systems led to changes in soil chemical properties verifying annual variations in the reduction of concentrations of the chemical attributes evaluated in CP treatments, S2, S4 and S6; areas of sugarcane S3 showed greater dissimilarity, indicating some degree of human intervention, from the continuous addition of inputs and crop residues, while the S1 areas, S5 and Mata had high similarity guaranteed resilience in the surface layers. The interrelated attributes to acid-base reactions in the soil (pH, P, Ca, H+Al, SB, T, V%, Mn and Zn) contributed to the first principal component of surface depths up to 40cm.

**Keywords:** soil fertility, multivariate analysis, long-term



## INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas geram impactos diferenciados no solo em detrimento do manejo e uso praticados para obtenção de maiores produtividades. Assim, conhecer os atributos que influenciam em uma caracterização ambiental, bem como pesquisas de sustentabilidade de ecossistemas naturais e antropizados, é importante, uma vez que os dados obtidos servem de base para o monitoramento da estabilidade ou desequilíbrio desses sistemas (CARDOSO et al., 2011).

Em áreas com cultivos agrícolas, em razão de alguns processos que levam ao empobrecimento das características físicas, químicas e biológicas, provoca degradação do solo (SILVA et al. 2005), tal como a redução da fertilidade (FONSECA et al., 2007).

As propriedades químicas dos solos são significativamente modificadas com a retirada da vegetação natural e o cultivo, principalmente na camada arável, em decorrência da adição de corretivos e fertilizantes e de operações agrícolas. Essas alterações dependem de vários fatores, como a cultura implantada e o manejo utilizado, a classe e a fertilidade inicial do solo, o comportamento físico-químico de cada nutriente e suas interações com o meio (MARCHIORI JÚNIOR & MELO, 2000), além dos fatores de formação do solo, como a dinâmica da água no solo, que tem forte relação com relevo gerando fluxo de materiais (BURAK et al., 2012).

Ademais, as alterações nos teores de nutrientes do solo e o conhecimento da fertilidade dos solos são fatores primordiais para a obtenção de sucesso na atividade agrícola (FRAZÃO et al., 2008). Para verificar as alterações ocorridas no solo em virtude do uso e do manejo empregado, o correto seria submeter um solo a condições naturais, ou seja, sem interferência do homem, às atividades agrícolas que se pretende estudar e avaliar seus atributos em pesquisas de longa duração, porém, atender a essas condições nem sempre é fácil optando-se por realizar um comparativo entre amostras de solos cultivados com outras sob vegetação natural na mesma área.

O conhecimento das alterações nos atributos do solo causado pelo cultivo contínuo, fornece subsídios para a adoção de práticas de manejo que permitam incrementar o rendimento das culturas, a sustentabilidade contínua e a conservação dos ecossistemas (SILVA et al., 2015).

Neste sentido, com o uso de técnica da análise multivariada é possível explicar o máximo de intercorrelação entre as variáveis e descobrir quais delas contribuem mais para a caracterização e/ou alteração do solo (PRAGANA et al., 2012). Na análise

simultânea de muitas informações esta técnica se torna a melhor ferramenta, possibilitando a obtenção de dados e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da estatística univariada (FREITAS et al., 2014). Segundo Freitas et al. (2015a) o uso das técnicas de análise multivariada, de agrupamento e de componentes principais é eficiente para verificar as diferenças com base nos atributos químicos do solo em cada ambiente estudado, resultantes das diferenças do uso e do manejo.

O uso conjunto de técnicas multivariadas pode auxiliar na tomada de decisão do uso e manejo adequado do solo, baseando-se no comportamento dos seus atributos e indicar os atributos que sofrem maior alteração com a ação antrópica permitindo o estabelecimento de práticas adequadas de manejo do solo.

O conhecimento das alterações nos atributos químicos solo causadas pelo cultivo contínuo de monocultura intensiva em longo prazo, possibilita uma aproximação geral da dinâmica dos solos sob diferentes ciclos de cultivo em sistemas agrícolas e naturais podendo fornecer subsídios para a adoção de práticas de manejo que permitam incrementar o rendimento das culturas, garantindo a contínua sustentabilidade e a conservação dos ecossistemas (FREITAS et al., 2014).

O estudo dos atributos do solo ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e a duração das alterações provocadas por diferentes sistemas de manejo. Por serem sensíveis, esses atributos são importantes para estabelecer se houve degradação ou melhoria da qualidade do solo em relação a um sistema de manejo (REICHERT et al., 2009). Neste contexto, para identificar o potencial ou as limitações de funcionamento de um tipo de solo frente as modificações de sistemas, é preciso estabelecer sua qualidade de referência a qual se relaciona aos atributos do solo em estado natural, sem alterações antrópicas (MELO FILHO et al., 2004).

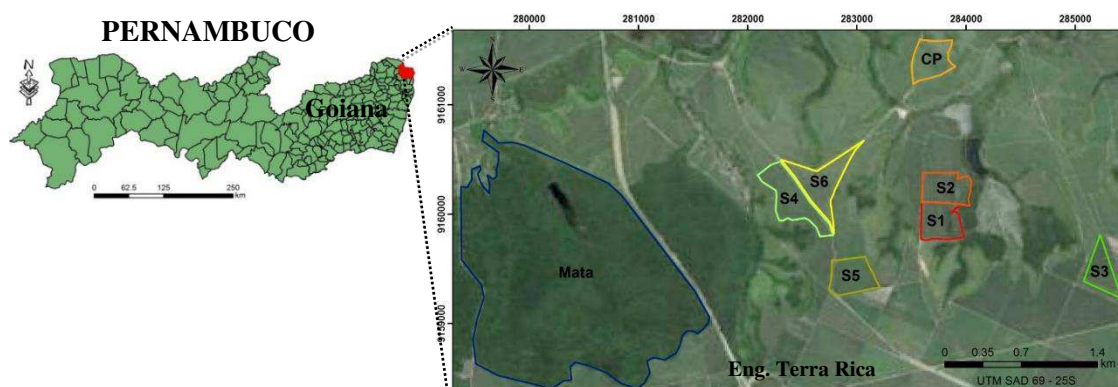
Assim, o objetivo foi avaliar os atributos químicos de um Argissolo Amarelo coeso solo, sob cana-de-açúcar em cronosequência de cultivo, na zona da Mata de Pernambuco, por meio de técnicas estatísticas multivariadas, inter-relacionando com atributos geomorfológicos.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Localização da área**

A área experimental está localizada na Usina Santa Teresa, Engenho Terra Rica, no município de Goiana, Zona da Mata Norte, Pernambuco, Brasil, nas coordenadas:

Latitude 07° 34' 25" S e Longitude 34° 55' 39" W e altitude 62 m (Figura 1), inserida na bacia hidrográfica do rio Goiana, onde todos os cursos d'água têm regime de escoamento perene e o padrão de drenagem é o dendrítico.



**Figura 1.** Localização geográfica do estado de Pernambuco, município de Goiana em destaque e MDE com a localização das áreas de estudo no Engenho Terra Rica. Mata – Mata preservada; CP – Cana Planta, S1 – Soca de 1º ano, S2 – Soca de 2º ano, S3 – Soca de 3º ano, S4 – Soca de 4º ano, S5 – Soca de 5º ano, S6 – Soca de 6º ano

O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Amarelo Coeso textura arenosa, de acordo com a classificação EMBRAPA (2013), o qual é característico na maioria dos solos da região canavieira do Nordeste.

O clima da região, segundo a Classificação Climática de Köppen-Geiger, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com temperaturas médias anuais variando em torno de 24 °C. O volume pluviométrico acumulado anual foi de 2.002 mm e precipitação média mensal de 166,83 mm, concentrados principalmente no inverno (CPRH, 2003).

As áreas a serem estudadas vêm sendo manejadas nos últimos anos com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), com queima prévia da palha para colheita, com corte realizado manualmente. A área vem sendo cultivada com cana-de-açúcar cultivar RB92579, com preparo mínimo, sendo realizado manejo convencional com apenas uma sulcação e reposição de 500 kg ha<sup>-1</sup> de N, P e K a lanço, anualmente. Próximo à área cultivada existe a presença de áreas de remanescente de mata nativa (Figura 1).

### **Amostragem das variáveis**

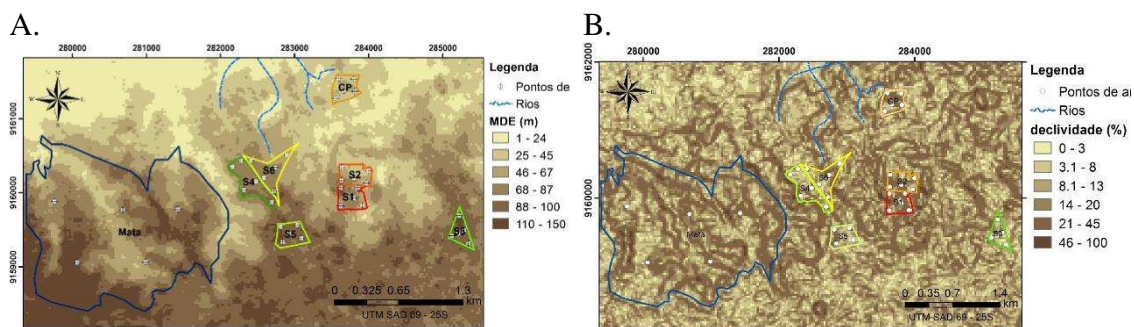
O corte da cana nas áreas escolhidas iniciou no mês de dezembro de 2013. Sendo que as coletas de solo foram realizadas em abril de 2014, nos dias de menor pluviosidade. Para avaliação dos atributos químicos do solo foram abertos perfis em locais que

representassem as condições do sistema de manejo adotado nas áreas, sendo realizada amostragem de solo de uma cronossequência de cultivo de cana-de-açúcar, em talhões situados na mesma situação topográfica. A cronossequência a ser estudada foi composta por oito talhões com diferentes tempos de implantação do agrossistema bioenergético de cana-de-açúcar: Tempo zero (Mata, strictu sensu), um (CP), dois (S1), três (S2), quatro (S3), cinco (S4), seis (S5) e sete anos de implantação dos sistemas de cultivo (S6).

Todas as amostras deformadas foram submetidas à caracterização química conforme EMBRAPA (2011) e para isto foram secadas, destorroadas, homogeneizadas e peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). Foram determinados o potencial Hidrogeniônico (pH) em  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup> (relação 1:2,5); fósforo (P) e potássio (K<sup>+</sup>), extraídos por Mehlich 1 e analisados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e Alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) trocáveis, extraídos por KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, sendo o  $\text{Al}^{3+}$  determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup> e  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  por espectrofotometria de absorção atômica; acidez potencial (H+Al) do solo, extraída por meio da solução de acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH 7,0, com posterior titulação com NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>, tendo-se determinado, ainda, os seguintes elementos: boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), e zinco (Zn). Com os resultados das análises foram calculadas a soma de bases (SB), a capacidade total de troca de cátions (T), a saturação por bases (V%).

A matéria orgânica (MO) foi determinada pelo método colorimétrico, oxidada a frio, agitando-se o solo em uma solução contendo dicromato de sódio e ácido sulfúrico. Na sequência, realizou-se a leitura da cor do íon Cr (III) reduzido pelo carbono orgânico, segundo metodologia do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). O carbono total foi determinado por oxidação a 900 °C em aparelho Total Organic Carbon Analyser, TOC-V (SEGNINI et al., 2008).

Para melhor visualização das formas do relevo na área de estudo foram avaliadas a declividade e a altitude, obtidos a partir de Modelo Digital de Elevação (Figura 2). Os valores atribuídos aos pixels foram obtidos dos planos de informação em formato raster com resolução de 1 m gerando informações quantitativas dos pontos georreferenciados.



**Figura 2.** Mapa geomorfológico da área de estudo em Goiana (PE): Modelo Digital de Elevação (A) e declividade (B)

A permeabilidade foi determinada mediante coleta de amostras indeformadas utilizadas para a obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado, depois dessas serem colocadas no permeômetro de carga constante (EMBRAPA, 2011). Posteriormente, realiza-se a classificação da condutividade hidráulica saturada do solo, utilizando os valores de referência  $K_{20}$  da Soil Survey (United State Department of Agriculture - USDA, 1993).

### **Análise multivariada**

Foram aplicados dois métodos estatísticos multivariados visando classificar os acessos em grupos: análise de agrupamentos hierárquico (AAH) e análise de componentes principais (ACP). Todas as análises multivariadas foram realizadas após a padronização das variáveis em que cada uma ficou com média 0 e variância unitária (1), conforme Freitas et al. (2015a).

Primeiramente, realizou-se o processamento da análise de agrupamento por método hierárquico, contida nos dados originais incluindo todas as variáveis explicativas do solo adotando-se a distância euclidiana como medida de semelhança entre as amostras e o método de Ward para discriminar a ligação de grupos, consistindo em adotar uma quantidade de grupos que melhor caracterizava a estrutura de grupos, após uma série de sucessivos agrupamentos em que os elementos são agregados. O resultado da análise foi apresentado em forma gráfica (dendrograma) que auxiliou na identificação dos agrupamentos (FREITAS et al., 2015b).

A análise dos componentes principais foi utilizada para explicar a estrutura de variâncias e covariâncias contidas nas variáveis originais, que resultam em um conjunto menor de combinações lineares ortogonais (Barros et al., 2002). A análise de componentes principais permitiu condensar a maior quantidade da informação original

em duas variáveis latentes ortogonais, denominadas componentes principais, que são combinações lineares das variáveis originais criadas com os dois maiores autovalores da matriz de covariância dos dados, reduzindo, desta forma, a dimensionalidade do conjunto de variáveis e facilitando a interpretação da independência entre elas, possibilitando a construção de gráficos biplot. O critério adotado para a escolha do número de componentes foi selecionar aquelas que apresentaram autovalores acima de 1, pois são as que geram componentes com quantidade relevante de informação das variáveis originais e conseguiram sintetizar uma variância acumulada acima de 70% (HAIR et al., 2005).

Na ACP, fatores (componentes principais) que respondem pela maior parte da variabilidade de todas as variáveis são identificados, decompondo-se a matriz de correlação ou covariância (CRUZ & REGAZZI, 2001), sendo utilizada no presente estudo, a matriz de correlação. A contribuição (loadings) dos atributos relacionados aos componentes principais (correlação entre atributos avaliados e os componentes principais) foi avaliada conforme o critério de seleção (CS) estabelecido por Ovalles e Collins (1988):

$$CS=0,5/ (CP_{\text{eigenvalue}})^{1/2} \quad (1)$$

Em que: CS é o valor do critério de seleção e o  $CP_{\text{eigenvalue}}$  é o autovalor do componente principal. Desta forma, o CS (Equação 1) tem sido utilizado para estabelecer valores a partir dos quais começa a existir uma contribuição da variável na variação explicada pelo componente principal (WAIREGI & ASTEN, 2012).

Com as componentes principais formadas realizaram-se análises de correlação de Pearson com os atributos de altitude, declividade e condutividade hidráulica.

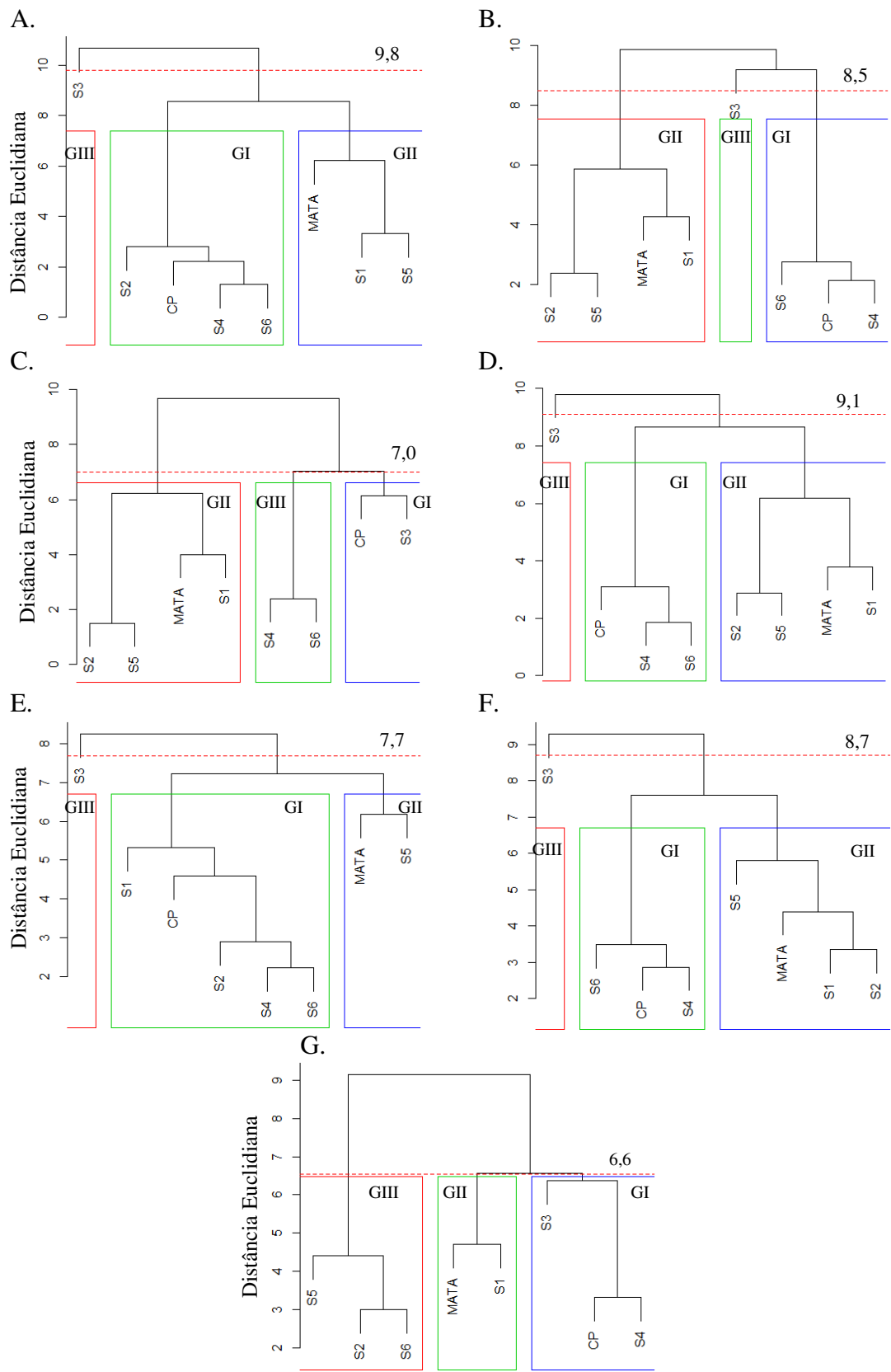
### **Análises dos dados**

Para as análises de dados foram utilizados a linguagem e o ambiente R, versão 3.2.3. (R. Development Core Team, 2015). Na execução dessas análises e da técnica de análise de componentes principais foram utilizadas funções princomp e prcomp.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Figura 3 podem ser observados os dendrogramas obtidos da matriz de dados padronizados, pela análise de agrupamento hierárquico com os atributos químicos do solo originais por profundidade, objetivando-se avaliar a semelhança das áreas, em que a variação expressiva nos valores de distância euclidiana entre os acessos, para o conjunto

de variáveis consideradas, torna possível fazer uma divisão de três grupos de parcelas homogêneas.



**Figura 3.** Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos com a formação de grupos com base na distância euclidiana dos atributos químicos do solo: 0-

5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm (D), 40-60 cm (E), 60-80 cm (F) e 80-100 cm (G). GI – Grupo 1, GII – Grupo 2 e G3 – Grupo 3

Observou-se, analisando as distintas profundidades que foram admitidos cortes na distância euclidiana variando de 6,6 (80-100 cm) a 9,8 (0-5 cm) que permitiram uma divisão clara de grupos. Em todas as profundidades, com exceção de 10-20 cm e 80-100 cm, que as áreas de cana-de-açúcar S3 apresentaram maior dissimilaridade, por possuírem a maior distância euclidiana. Verificou-se ainda que áreas de cana-de-açúcar S1 e S5 e a Mata apresentaram maior semelhança, devido à sua menor distância euclidiana.

Com exceção da camada de 40-60 cm, S1 permaneceu agrupado com a Mata, indicando provavelmente o menor efeito da lixiviação dos elementos aplicados na adubação de reposição, associado com a adsorção das frações de silte e argila a camada coesa do solo.

Esta separação dos pontos da Mata com a área cultivada salienta o fato de que o cultivo de cana-de-açúcar deve produzir uma modificação acentuada no solo em relação ao solo originalmente coberto por mata nativa. Quanto à similaridade de S1 e S5 e a Mata, sugere-se que o mesmo deve ser decorrente do processo de resiliência frente à ausência dos processos de mecanização e revolvimento do solo, tal qual incorporação de matéria orgânica proveniente de resíduos vegetais do corte do estágio de cana planta e quanto ao S5 devido à deposição contínua de cinzas e restos culturais provenientes da queimada para corte da palhada.

Segundo Freitas et al. (2015b) as diferenças são devidas às variações de fertilidade natural da mata e aquelas decorrentes de diferentes aportes de fertilizantes na cana-de-açúcar, além de ser influenciada pelo manejo do solo na implantação e na manutenção da cultura e também pelo uso de implementos agrícolas.

Essas diferenças de agrupamento resultaram, portanto, das diferenças observadas dos atributos, possibilitando uma análise mais generalizada da qualidade das áreas estudadas. Os atributos que promoveram a ausência de similaridade da Mata com as demais áreas de cana-de-açúcar, podem ser evidenciados nos resultados da análise de componentes principais (Tabela 1 e 2, Figura 4) permitindo caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação e diferenciação dos ambientes.

Segundo Burak et al. (2012) a ACP possibilita melhor avaliação de grupos de atributos inter-relacionadas no solo a partir da sua interpretação, distribuição espacial e correlação com atributos geomorfológicos. Na ACP, para as variáveis nas profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm, 20-40 cm e 40-60 cm foram avaliados as duas primeiras componentes



que explicaram acima de 70% da variabilidade total dos dados e tiveram autovalores maiores que 1 (Tabela 1 e 2), enquanto as demais profundidades foram avaliadas por três componentes.

Nas profundidades superficiais 0-5 cm a 20-40 cm verificou-se a presença de um grupo similar no primeiro componente principal (CP1), explicando-se, acima de 43% da variabilidade total dos dados e correlações com as variáveis pH, P, Ca, H+Al, SB, T, V, Mn e Zn (Tabela 1). A importância relativa ou influência de cada atributo químico em estudo sobre os componentes é dada pelas suas correlações com os componentes principais. O grupo de contribuição da variação de CP1 identifica a variação na área inerente às reações ácido-base no solo.

**Tabela 1.** Autovalores e autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (CP) e dos atributos químicos do solo nas camadas de 0 a 40 cm

Profundidade	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm			20-40 cm	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2
DP	2,821	2,19	2,632	2,038	2,543	1,754	1,714	2,659	2,231
VE	0,531	0,32	0,462	0,277	0,431	0,205	0,196	0,472	0,332
VA	0,531	0,851	0,462	0,739	0,431	0,636	0,832	0,472	0,803
MO	0,114	0,410*	0,1	-0,33	0,199	0,367	-0,268	0,012	0,419*
pH	0,300*	-0,193	-0,320*	0,155	-0,315*	-0,118	-0,242	0,319*	-0,166
P	0,312*	-0,148	-0,345*	-0,079	-0,254	-0,033	-0,316	0,338*	-0,012
K	0,043	0,205	0,055	-0,268	0,218	-0,016	-0,195	-0,071	0,318
Ca	0,346*	-0,071	-0,375*	-0,032	-0,320*	0,206	0,24	0,370*	0,000
Mg	0,227	0,302	-0,103	-0,277	0,005	0,352	-0,372	0,145	0,314
H+Al	-0,114	0,319	0,198	-0,339	0,321*	0,117	0,019	-0,193	0,326
SB	0,352*	-0,023	-0,370*	-0,093	-0,318*	0,241	0,203	0,367*	0,073
T	0,340*	0,052	-0,275	-0,298	-0,255	0,322	0,243	0,272	0,277
V	0,327*	-0,092	-0,330*	0,130	-0,358*	0,069	-0,108	0,336*	-0,103
B	0,129	0,407*	0,014	-0,419*	0,158	0,498*	0,041	-0,09	0,274
Cu	0,105	0,375*	-0,007	-0,295	0,124	-0,306	-0,375	0,061	0,342*
Fe	0,021	0,454*	0,131	-0,432*	0,263	0,382*	-0,163	-0,08	0,431*
Mn	0,342*	-0,084	-0,348*	-0,084	-0,283	0,112	-0,286	0,355*	0,045
Zn	0,349*	-0,032	-0,339*	-0,161	-0,245	0,06	-0,416*	0,343*	0,134

\* Correlações consideradas significativas na interpretação do componente principal, CP – Componente Principal, DP – Desvio Padrão (autovalor), VE – Variância Explicada e VA – Variância Acumulada

Ainda nas mesmas profundidades, observa-se no segundo componente principal (CP2) correspondendo a mais de 20 % da variância total dos dados, a contribuição da MO, Cu, B e Fe (Tabela 1). O grupo de atributos relacionado ao CP2 sugere a maior influência de componentes orgânicos em relação aos minerais na retenção de bases uma vez que indicam locais com menores teores de argila e maiores teores de areia grossa sobressaindo-se a contribuição da matéria orgânica, em virtude do solo ser predominante à textura arenosa.

O terceiro componente principal, existente na profundidade 10-20 cm explicou

19,6% da variância dos dados e pouco contribuiu para explicar a variabilidade dos atributos químicos e sua relação com os atributos do solo (Tabela 1) relacionando-se apenas com o Zn. Os componentes da matéria orgânica não tiveram correlações nas profundidades 5-10 cm e 10-20 cm acima do critério de seleção adotado devido, provavelmente, à diminuição da contribuição da matéria orgânica em profundidade.

Nas profundidades de 40-60 cm e 80-100 cm verificou-se a presença do grupo de atributos do solo no primeiro componente principal (CP1) o que explicou acima de 38% da variabilidade total dos dados e correlações com as variáveis pH, P, Ca, SB e V (Tabela 2), podendo ser interpretado novamente como resultante das reações de neutralização da acidez do solo em função da aplicação de corretivos, porém não havendo nenhum outro atributo do solo (matéria orgânica) inter-relacionado a esse grupo; enfim, o grupo de contribuição da variação de CP1 identifica a variação na área inerente às reações ácido-base no solo.

**Tabela 2.** Autovalores e autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (CP) e dos atributos químicos do solo das camadas de 40 a 100 cm

Profundidade	40-60 cm		60-80 cm			80-100 cm		
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
DP	2,408	2,203	2,465	2,074	1,528	2,483	1,837	1,679
VE	0,387	0,324	0,405	0,287	0,156	0,411	0,225	0,188
VA	0,387	0,71	0,405	0,692	0,848	0,411	0,636	0,824
MO	0,052	0,413*	0,02	0,353*	-0,088	-0,073	0,512*	-0,137
pH	-0,369*	-0,143	-0,353*	-0,214	-0,052	-0,378*	-0,027	-0,085
P	-0,305	0,194	-0,362*	0,180	-0,146	-0,199	0,377*	-0,258
K	0,022	0,257	0,081	0,202	0,575*	-0,003	0,398*	0,365
Ca	-0,408*	0,073	-0,392*	0,115	-0,054	-0,355*	-0,121	0,129
Mg	-0,262	0,151	-0,158	0,045	0,541*	-0,174	0,253	0,368
H+Al	0,32	0,223	0,265	0,227	-0,316	0,239	-0,07	-0,308
SB	-0,399*	0,105	-0,392*	0,120	0,013	-0,36	-0,03	0,219
T.	-0,046	0,405*	-0,298	0,279	-0,178	-0,23	-0,105	-0,014
V	-0,375*	-0,116	-0,319*	-0,147	0,332	-0,343*	0,061	0,304
B	0,162	0,308	0,23	0,193	0,136	0,241	0,229	0,228
Cu	0,061	0,214	0,042	0,367*	0,128	0,301	-0,022	0,281
Fe	0,091	0,322	0,095	0,368*	-0,052	0,174	0,429*	-0,094
Mn	-0,286	0,215	-0,279	0,280	-0,178	-0,152	0,3	-0,415*
Zn	-0,094	0,385*	0,055	0,437*	0,174	0,31	0,095	0,273

\* Correlações consideradas significativas na interpretação do componente principal, CP – Componente Principal, DP – Desvio Padrão (autovalor), VE – Variância Explicada e VA – Variância Acumulada

Ainda nas mesmas profundidades verifica-se, no segundo componente principal (CP2) correspondendo a mais de 22% da variância total dos dados, a contribuição da MO, T, Zn, Cu, Fe, P e K (Tabela 2), enquanto terceiro componente principal existente nas profundidades 60-80 cm e 80-100 cm explicou acima de 15% da variância dos dados e pouco contribuíram para explicar a variabilidade dos atributos químicos e sua relação

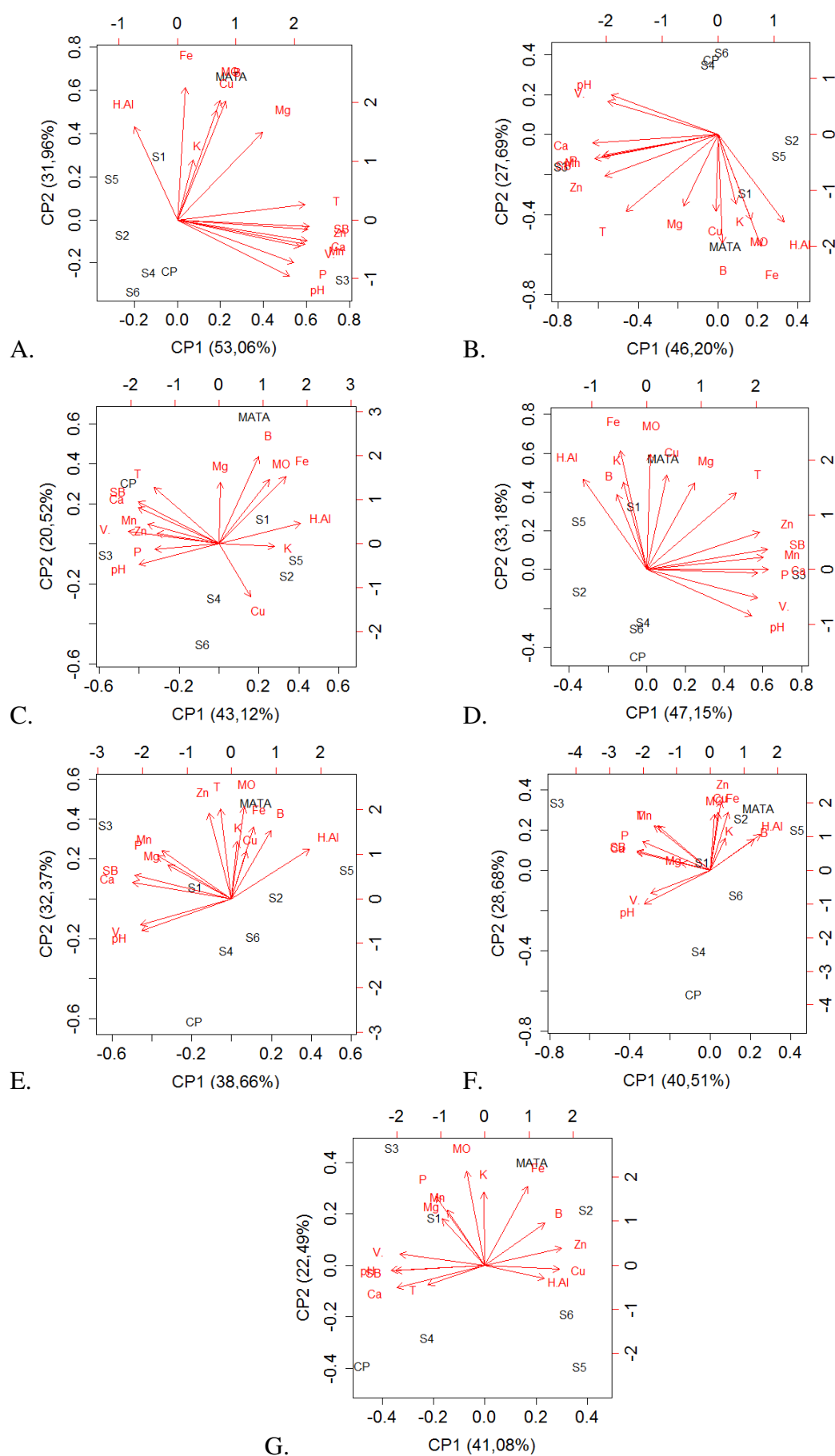
com os atributos do solo (Tabela 2) relacionando-os apenas com o K e Mg (60-80 cm) e Mn (80-100 cm).

A representação gráfica biplot (entre CP1 e CP2) (Figura 4) permitiu caracterizar as variáveis que mais se discriminaram na formação dos agrupamentos 1, 2 e 3. As variáveis mais fortemente correlacionadas com a área de Mata nas camadas mais superficiais até a profundidade 20-40 cm foram MO, Fe, Cu, Mg e B (Tabela 1 e Figura 4). Solos com mata apresentam maior teor de MO o que lhe confere maior fertilidade em que, segundo Morais et al. (2012), os maiores teores de MO em área de vegetação nativa são explicados em virtude do maior aporte de resíduos orgânicos. A maior relação com a MO também pode estar relacionada com o fato de se encontrar associada diretamente com a não interferência antrópica, sem o uso de implementos agrícolas e de tratos culturais, não degradando a estabilidade dos agregados do solo.

Segundo Campos et al. (2012), os valores de H+Al na área de cultivo S1, nas profundidades até 40 cm, foram maiores entre os ambientes provavelmente em consequência da maior lixiviação promovida pelo intenso regime hídrico associado às melhores condições de drenagem e ao recente revolvimento mecanizado promovendo a desagregação da camada do solo.

A maior relação de acidez potencial (H+Al) é devida à decomposição da MO e dos resíduos vegetais, o que leva à liberação de compostos orgânicos na superfície do solo favorecendo a formação de complexos orgânicos hidrossolúveis, entre Ca e Mg com ligantes orgânicos (MIYAZAWA et al., 1993), facilitando a descida desses cátions no perfil do solo (FRANCHINI et al., 1999), o que ocasiona a sua acidificação. Além disto, a acidez potencial se deve, nesta área, ao maior valor de H, o que se explica pelo maior teor de MO observado visto que a mesma apresenta vários grupos funcionais, especialmente os grupos carboxílicos e fenólicos que podem liberar o H que irá compor os íons envolvidos na capacidade de troca de cátions do solo (RANGEL & SILVA, 2007).

O ambiente cultivado com o ciclo S3 é caracterizado por apresentar forte correlação com Ca, P, SB, Mn, Zn, V e pH (Figura 4), no qual a maior influência dessas variáveis é caracterizada em virtude das aplicações contínuas de insumos que contribuíram para resultados mais elevados de bases trocáveis.



**Figura 4.** Biplot da análise de componentes principais (ACP) com base nas variáveis do solo nos diferentes tempos de manejo: 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm

(D), 40-60 cm (E), 60-80 cm (F) e 80-100 cm (G)

Parte da variação dos atributos na ACP que tiveram maior correlação com o relevo (Tabela 3) na profundidade de 5-10 cm, pôde ser explicada em CP1 e CP2 (73,9% da variância acumulada, Tabela 1) mediante a condutividade hidráulica; na profundidade de 10-20 cm pôde ser explicada em CP1 (43,1% da variância, Tabela 1) com a altitude.

**Tabela 3.** Coeficiente de correlação de Pearson entre componentes principais e os atributos geomorfológicos altitude, declividade e condutividade hidráulica do solo saturado (K20) nas camadas de 0 a 40 cm

	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm			20-40 cm	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2
Altitude	0,21	0,21	-0,20	-0,16	0,58*	0,19	-0,35	0,21	0,32
Declividade	-0,26	0,26	0,33	-0,49	0,42	0,49	0,19	-0,29	0,31
K20	-0,10	0,03	0,51*	0,50*	0,24	-0,18	0,07	-0,08	0,17

\* Correlações consideradas significativas na interpretação do componente principal

Visto que as demais componentes obtiveram baixos valores de correlação, este fato implica que outras fontes de variação (atividade microbiana, densidade de plantas, manejo adubação entre outros), muitas vezes de difícil distinção no solo, controlam a parte da variabilidade dos atributos químicos do solo não relacionado com o relevo corroborando com Burak et al. (2012).

A aplicação de adubos e corretivos na área estudada era realizada manualmente, aumentando a possibilidade de aplicação desuniforme e constituindo uma variabilidade oriunda do manejo (fator extrínseco). Parte dos nutrientes movimentados verticalmente (lixiviação) ocorre por vias que facilitam os fluxos preferenciais de água, tais como rachaduras, grandes canais e poros gerados pela biota e decomposição de material orgânico, estando de acordo com Burak et al. (2012).

O movimento horizontal de nutrientes via escoamento superficial é facilitado em maior declive, uma vez que a calagem e a adubação são aplicadas sem incorporação ao solo resultando em maior saturação de sítios de troca/adsorção em camadas superficiais, facilitando a presença desses nutrientes em solução e seu transporte via escoamento superficial. Em subsuperfície a influência do escoamento superficial na movimentação horizontal e redistribuição dos nutrientes na paisagem é limitada. Verifica-se, na Tabela 4, que o relevo tem relação com a distribuição dos atributos químicos e com os escores.

**Tabela 4.** Coeficiente de correlação de Pearson entre componentes principais e os atributos geomorfológicos altitude, declividade e condutividade hidráulica do solo saturado (K20) nas camadas de 40 a 100 cm

	40-60 cm		60-80 cm			80-100 cm		
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
Altitude	0,38	0,74*	0,06	0,53*	-0,30	0,69*	0,33	-0,23
Declividade	0,10	-0,04	0,14	0,49	0,50*	0,27	0,53	0,21
K20	0,42	0,22	-0,35	-0,49	-0,01	0,05	0,26	-0,23

\* Correlações consideradas significativas na interpretação do componente principal

## CONCLUSÕES

1. A substituição da vegetação nativa por sistemas de cultivo favorece reduções das concentrações dos atributos químicos do solo nos tratamentos cana planta, cana soca de 2º, 4º e 6º ano.
2. O tempo de implantação da cana soca de 3º ano apresenta maior dissimilaridade, o que indica certo grau de intervenção antrópica proveniente da adição contínua de insumos e resíduos vegetais, enquanto os tempos de implantação de cana soca de 1º e 5º anos e a Mata, apresentaram elevada similaridade garantido a resiliência nas camadas superficiais.
3. Com o uso da análise de componentes principais atributos inter-relacionados às reações ácido-base no solo (pH, P, Ca, H+Al, S.B., CTC, V, Mn e Zn) contribuem com o primeiro componente principal das profundidades superficiais até 40 cm.
4. A variabilidade dos componentes principais na profundidade de 5-10 cm foi fortemente relacionada com a condutividade hidráulica (fator intrínseco) resultando na sua lixiviação, enquanto, por outro lado, as demais camadas apresentaram aleatoriedade com exceção à CP1 na profundidade 10-20 cm, relacionando-se com a altitude.
5. Já na subsuperfície (nas profundidades de 40 a 100 cm) o relevo indicou forte relação com a distribuição dos componentes principais dos atributos químicos do solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. *Bragantia*, v. 71, n.4, p.538-547, 2012.

- CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; ALMEIDA, M. C. Toposequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazônica**, v.42, n.3, p.387–398, 2012.
- CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal sul-mato-grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 613 - 622, 2011.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2.ed. rev. Viçosa: UFV, 2001,390p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.
- FOSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R.; OLIVEIRA, G. C.; BALBINOS, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Vermelho Distrófico de cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 1, p. 22 - 30, 2007.
- FRAÃO, L. A.; PÍCCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 2, p. 641 - 648, 2008.
- FRANCHINI, J. C.; MIYASAWA, M.; PAVAN, M. A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.12, p. 2267-2276, 1999.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, V. M. Atributos químicos de latossolo vermelho submetido a diferentes manejos. **Revista Floresta**, v.45, n.2, p.229-240, 2015a.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, L. S. Técnicas multivariadas na avaliação de atributos de um Latossolo vermelho submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.1, p.17-26, 2015b.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C. Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v.57, n.3, p.224-33, 2014.

- MELO FILHO, J. F.; DEMATTÊ, J. A. M.; LIBARDI, P. L.; PORTELA, J. C. Comportamento espectral de um Latossolo Amarelo coeso argissólico em função de seu uso e manejo. **Magistra**, v. 16, n. 2, p. 105 - 112, 2004.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, n.3, p. 411-416, 1993.
- MORAIS, T. P. S.; PISSARRA, T. C. T.; REIS, F. C. Atributos físicos e matéria orgânica de um Argissolo Vermelho Amarelo em microbacia hidrográfica sob vegetação nativa, pastagem e cana-de-açúcar. **Enciclopédia Biosfera**, v.8, n.15, p.213-223, 2012.
- MRCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W. J. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1177-1182, 2000.
- PRAGANA, R. B.; RIBEIRO, M. R.; NÓBREGA, J. C. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; COSTA, J. A. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.v.36, n.5, p.1591-600, 2012.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n.6, p.1609-1623, 2007.
- REIHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 3, p. 310 - 319, 2009.
- SEGNINI, A.; SANTOS, L. M.; SILVA, W. T. L.; MARTIN-NETO, L. BORATO, C. E.; MELO, W. J.; BOLONHEZI, D. Estudo comparativo de métodos para a determinação da concentração de carbono em solos com altos teores de Fe (Latosolos). **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 94-97, 2008.
- SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, M. M. Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob sistemas de manejo na bacia do Alto do Rio Grande MG. **Ciência e agrotecnologia**, v.29, n.4, p.719-730, 2005.
- UNITED STATE DEPARTAMENT OF AGRICULTURE. **Soil survey manual: soil conservation service**. Washington, 1993. (Handbook, 18).
- WAIREGI, L.W.I.; VAN ASTEN, P.J.A. Norms for multivariate diagnosis of nutrient imbalance in arabica and robusta coffee in the east African highlands. **Experimental Agriculture**, v.48, n.3, p.448-460, 2012.



## **CAPÍTULO IV**

---

### **CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UM ARGISSOLO AMARELO COESO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES CICLOS DE CULTIVO**

## CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DE UM ARGISSOLO AMARELO COESO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES CICLOS DE CULTIVO

**Resumo:** As modificações físicas e hídricas do solo, em razão do cultivo contínuo a longo prazo, podem fornecer subsídios em prol da adoção de práticas de manejo que permitam incrementar o rendimento das culturas, garantindo a sustentabilidade e a conservação dos ecossistemas. O objetivo deste trabalho foi caracterizar e identificar, por meio de análises multivariadas, os atributos físicos-hídricos do solo que melhor representassem o comportamento dos diferentes ciclos de cultivo da cultura da Cana-de-açúcar em um Argissolo Amarelo coeso, em Goiana, Zona da Mata Norte, Pernambuco, Brasil. As áreas a serem estudadas vêm sendo manejadas nos últimos anos com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), com queima prévia da palha para colheita, com corte realizado manualmente. A amostragem de solo foi realizada em cronossequência de cultivo de cana-de-açúcar, composta por oito talhões com diferentes tempos de implantação do agrossistema bioenergético de cana-de-açúcar: Tempo zero (Mata, strictu sensu), um (CP), dois (S1), três (S2), quatro (S3), cinco (S4), seis (S5) e sete anos de implantação dos sistemas de cultivo (S6). Realizou-se coletas de amostras deformadas e não deformadas, realizadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Os atributos do solo avaliados foram: umidade volumétrica, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, condutividade hidráulica do solo saturado à 20°C, granulometria via frações de argila, silte e areia. Dois métodos estatísticos multivariados foram aplicados, visando classificar os acessos em grupos: análise de agrupamentos hierárquico (AAH) e análise de componentes principais (ACP). Com a análise de componentes principais, ocorreu redução de nove variáveis físico-hídricas do solo para apenas duas novas componentes, que foram porosidade e textura do solo, as quais explicaram mais de 70% da variação dos dados, nas distintas profundidades. A partir da profundidade 20-40 cm verificou-se semelhança da Mata com S4; os dois principais componentes que proporcionaram melhor explicação foram relacionados à textura, adensamento, porosidade e ao conteúdo de água do solo.

**Palavras-chave:** análise multivariada, manejo do solo, qualidade do solo, sustentabilidade agrícola

## CHARACTERIZATION PHYSICAL AND WATER OF A YELLOW ULTISOL COHESION GROWN WITH CANE SUGAR IN DIFFERENT CROP CYCLES

**Abstract:** The physical and hydrological changes in the soil, due to the long-term continuous cultivation can provide subsidies to promote the adoption of management practices for increasing crop yields, ensuring sustainability and conservation of ecosystems. The objective of this study was to characterize and identify, through multivariate analysis, physical-hydric soil attributes that best represent the behavior of the different cycles of cultivation of the culture of cane sugar in a yellow Ultisol cohesive in Goiana, Zone Mata Norte, Pernambuco, Brazil. The areas to be studied have been managed in recent years with sugarcane (*Saccharum officinarum L.*), with previous straw burning for harvesting by cutting performed manually. The soil sampling was conducted in chronosequence of sugarcane cultivation, composed of eight plots with different bioenergetic agrosystem deployment times of sugarcane: zero time (Mata, strictly speaking), one (CP) two (S1), three (S2), four (S3), five (S4), six (S5) and seven years of implementation of farming systems (S6). Held collections of samples deformed and not deformed, performed at depths of 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm. The attributes of this soil were: water content, bulk density, porosity, macro and micro, hydraulic conductivity of saturated soil at 20 ° C, particle size via clay, loam and sand. Two multivariate statistical methods were applied, aiming to classify the access groups: analysis of hierarchical groupings (AAH) and principal component analysis (PCA). With the principal component analysis, there was a reduction of nine physical and hydraulic soil variables to only two new components that were porosity and texture of the soil, which accounted for more than 70% of the data variation in the different depths.

**Keywords:** multivariate analysis, soil management, soil quality, agricultural sustainability

## INTRODUÇÃO

O solo é um sistema complexo, resultante da interação de fatores geológicos, topográficos e climáticos, entre outros que, juntos, conferem características e propriedades químicas e físicas que lhe são próprias, mesmo que, os sistemas agrícolas que se associam ao cultivo de monocultura contínua, ao uso de maquinários inadequados de preparo do solo resultam em rápida degradação do solo.

A formação de camadas compactadas diminui a atividade biológica e a macroporosidade no perfil do solo aumentando a densidade, o que proporciona maior resistência física à expansão radicular (JIMENEZ et al., 2008). Além disto, limita a permeabilidade e a disponibilidade de nutrientes e água (FREDDI et al., 2007).

Para se verificar a qualidade física do solo após sucessivos anos de cultivo frente aos sistemas de preparo e manejo do solo, pode-se utilizar as propriedades do solo: porosidade do solo (FIDALSKI et al., 2007b; CARNEIRO et al., 2009), densidade (MION et al., 2012), a resistência do solo à penetração (WEIRICH NETO et al., 2006; TAVARES FILHO & RIBON, 2008) e a permeabilidade (JOSÉ et al., 2013). Assim, quando o solo se encontra degradado ocorre redução da quantidade de água disponível e da taxa de difusão de oxigênio, tamanho e continuidade dos poros, além do aumento da resistência do solo à penetração e da densidade, passível de limitar o crescimento das plantas (ARAÚJO et al., 2004; CORTEZ et al., 2011a).

O manejo e a qualidade do solo possuem relação que pode ser avaliada pela alteração em suas propriedades físicas, químicas e biológicas (DORAN & PARKIN, 1994). Estudos que quantificam a qualidade do solo apresentam inúmeras variáveis, às vezes utilizadas nas estatísticas univariadas, o que pode dificultar as discussões dos resultados (FIDALSKI et al., 2007a).

Por ter grande número de variáveis envolvidas eleva-se, a dimensão do problema ao ser analisado por meio de métodos estatísticos univariados. Uma opção de análise para facilitar o trabalho com esses tipos de dados é pelo uso de análise multivariada (SILVA et al., 2010). Neste sentido, o uso de técnicas estatísticas contribui, facilitando a interpretação do comportamento dos atributos do solo, para melhorar o planejamento e o controle da tomada de decisão na execução das práticas de manejo.

Na análise simultânea de muitas informações a estatística multivariada se torna a melhor ferramenta possibilitando obter informações e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da análise estatística univariada (FREITAS et al., 2014).

Estudos de Cortez et al., 2011b; Santi et al., 2012; José et al., 2013; Freitas et al., 2014), têm aplicado técnicas multivariadas para avaliar as variáveis do solo e tem encontrado resultados satisfatórios na discriminação de agrupamentos e componentes.

De acordo com Cortez et al. (2011b) é possível descrever, com o emprego das técnicas multivariadas, a similaridade ou dissimilaridade de sistemas de irrigação buscando a máxima homogeneidade entre os indivíduos no grupo e máxima heterogeneidade entre os grupos e também descrever as variáveis da física do solo que explicam a maior variabilidade possível em um conjunto de dados, cuja finalidade é explicar a estrutura dos dados mediante processo matemático que preserva a maior parte das informações fornecida pelas variáveis originais (JOSÉ et al., 2013).

Com essas técnicas de análise multivariada é possível explicar o máximo de intercorrelação entre as variáveis e descobrir quais delas contribuem mais para a caracterização e/ou, alteração do solo (PRAGANA et al., 2012). Tais técnicas permitem que se faça ainda redução na dimensão de análises com múltiplas respostas com o objetivo de simplificar seu entendimento, sua visualização e interpretação, além de obter detalhes suficientes para representação dos resultados (BOGNOLA et al., 2011).

O agrossistema bioenergético foi selecionado para estudo por sua grande expressão econômica no Brasil e por estar em expansão na Região da Zona da Mata de Pernambuco, podendo contribuir para a racionalização do processo produtivo caso sejam aplicadas práticas de manejo conservacionista, visto que implicam em redução de custos operacionais, assegurando a manutenção da qualidade ambiental e sustentabilidade.

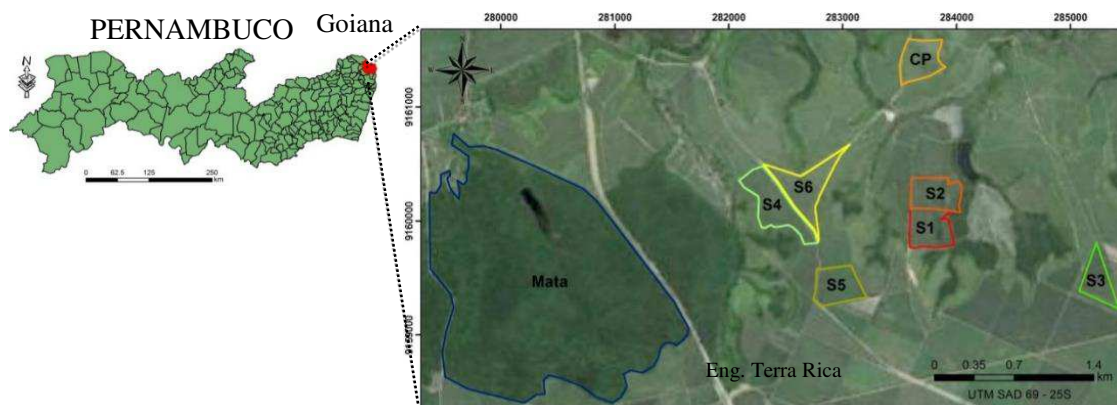
Entretanto, à medida que a área do agrossistema de cana-de-açúcar se expande, crescem também as preocupações em relação aos impactos dessa cultura no ambiente. As modificações físicas do solo, favorecidas pelo cultivo contínuo, podem fornecer subsídios em prol da adoção de práticas de manejo que permitam incrementar o rendimento das culturas garantindo a contínua sustentabilidade e a conservação dos ecossistemas.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar e identificar, por meio de análises multivariadas, os atributos físicos-hídricos do solo que melhor expliquem o comportamento dos diferentes ciclos de cultivo da cultura da Cana-de-açúcar em um Argissolo Amarelo Coeso, em Goiana, PE.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Localização da área**

A área experimental localizou-se na Usina Santa Teresa, Engenho Terra Rica, município de Goiana, Zona da Mata Norte, Pernambuco, Brasil, nas coordenadas: Latitude 07° 34' 25" S e Longitude 34° 55' 39" W e altitude 62 m (Figura 1), inserida na bacia hidrográfica do rio Goiana.



**Figura 1.** Localização geográfica do estado de Pernambuco, município de Goiana em destaque e localização das áreas de estudo no Engenho Terra Rica: Mata – Mata preservada; CP – Cana Planta, S1 – Soca de 1º ano, S2 – Soca de 2º ano, S3 – Soca de 3º ano, S4 – Soca de 4º ano, S5 – Soca de 5º ano, S6 – Soca de 6º ano

O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Amarelo Coeso textura arenosa, de acordo com a classificação EMBRAPA (2013), o qual é característico na maioria dos solos da região canavieira do Nordeste.

O clima da região, segundo a Classificação Climática de Köppen-Geiger, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com temperaturas médias anuais variando em torno de 24 °C. O volume pluviométrico acumulado anual foi de 2.002 mm e precipitação média mensal de 166,83 mm, concentrados principalmente no inverno (CPRH, 2003).

As áreas a serem estudadas vêm sendo manejadas nos últimos anos com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), com queima prévia da palha para colheita, com corte realizado manualmente. A área vem sendo cultivada com cana-de-açúcar cultivar RB92579, com preparo mínimo, cujo manejo convencional é realizado com apenas uma sulcação e reposição de 500 kg ha<sup>-1</sup> de N, P e K, a lanço, anualmente. Próximo da área cultivada há a presença de áreas de remanescente de mata (Figura 1).

### Amostragem das variáveis físico-hídricas

O corte da cana nas áreas escolhidas iniciou em dezembro de 2013. Sendo que as coletas de solo foram realizadas em abril de 2014, nos dias de menor pluviosidade.

Para avaliação dos atributos físicos e hídricos do solo foram abertos perfis em locais que representassem as condições do sistema de manejo adotado nas áreas, realizando-se amostragem de solo de uma cronosequência de cultivo de cana-de-açúcar, em talhões situados na mesma situação topográfica. A cronosequência a ser estudada foi composta por oito talhões com diferentes tempos de implantação do agrossistema bioenergético de cana-de-açúcar: Tempo zero (Mata, strictu sensu), um (CP), dois (S1), três (S2), quatro (S3), cinco (S4), seis (S5) e sete anos de implantação dos sistemas de cultivo (S6).

Foi realizado a coleta de amostras deformadas e não deformadas em diferentes profundidades demarcadas ao longo de todo o perfil, foram coletadas 5 amostras simples de solo nas 7 profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. As amostras foram coletadas com abertura de trincheiras na entrelinha da cultura e distribuídas aleatoriamente em cada tratamento.

Os atributos do solo avaliados foram: umidade volumétrica (UV), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (MMACP), microporosidade (MMICP), condutividade hidráulica do solo saturado a 20 °C (K20) e granulometria.

As amostras não deformadas foram retiradas com um amostrador de anéis, por meio de pressão mecânica. Com vista à determinação das massas das amostras, as mesmas foram secas em estufa a 105 °C durante 48 h, e pesadas para determinação da massa seca de sólidos e densidade do solo (Ds), de acordo com a metodologia proposta por EMBRAPA (2011). Posteriormente as essas amostras foram saturadas para determinação da porosidade total (PT) além da posterior determinação da condutividade hidráulica (K20), macro (MMACP) e microporosidade (MMICP) conforme metodologia proposta por Oliveira (1968).

A granulometria foi determinada pelo método da pipeta, conforme metodologia descrita EMBRAPA (2011), sendo as análises realizadas no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco e descrita pela EMBRAPA (2011).

### **Análise multivariada**

Foram aplicados dois métodos estatísticos multivariados visando classificar os acessos em grupos: análise de agrupamentos hierárquica e análise de componentes principais (ACP). Todas as análises multivariadas foram realizadas após a padronização

das variáveis em que cada uma ficou com média 0 e variância unitária (1), conforme Freitas et al. (2015b).

De início, realizou-se o processamento da análise de agrupamento por método hierárquico contida nos dados originais incluindo todas as variáveis explicativas do solo e se adotando a distância euclidiana como medida de semelhança entre as amostras e o método de Ward para discriminar a ligação de grupos, consistindo em adotar uma quantidade de grupos que melhor caracterizasse a estrutura de grupos, após uma série de agrupamentos sucessivos, aos quais os elementos são agregados. O resultado da análise foi apresentado em forma gráfica (dendrograma) que auxiliou na identificação dos agrupamentos.

A análise dos componentes principais foi utilizada para explicar a estrutura de variâncias e covariâncias contidas nas variáveis originais, que resultam em um conjunto menor de combinações lineares ortogonais, sendo extraídos em ordem decrescente (BARROS et al., 2002; SILVA et al., 2010). A análise de componentes principais permitiu condensar a maior quantidade de informações originais em duas variáveis latentes ortogonais, denominadas componentes principais, que são combinações lineares das variáveis originais criadas com os dois maiores autovalores da matriz de covariância dos dados, reduzindo, desta forma, a dimensionalidade do conjunto de variáveis e facilitando a interpretação da independência entre elas, possibilitando a construção de gráficos biplot.

Essas correlações foram classificadas de acordo com Coelho (2003), em que o critério para classificação dos autovetores (valores que representam o peso de cada caractere, em cada componente, e variam de -1 a +1) foi: valor absoluto  $<0,30$ , classificado como pouco significativo;  $0,30-0,40$ , considerado mediantemente significativo; e  $\geq 0,50$ , tido como altamente significativo. As variáveis que tiveram autovetores com peso  $\geq 0,50$  (altamente significativo).

O critério adotado para a escolha do número de componentes foi selecionar aquelas que apresentaram autovalores acima de 1, pois são as mesmas que geram componentes com quantidade relevante de informação das variáveis originais e conseguiram sintetizar uma variância acumulada acima de 70% (HAIR et al., 2005).

Para as análises de dados foram utilizados a linguagem e o ambiente R, versão 3.2.3. (R. Development Core Team, 2015). Na execução dessas análises e da técnica de análise de componentes principais foram utilizadas funções princomp e prcomp.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz de correlação das variáveis é apresentada na Tabela 1, as variáveis estudadas, com exceção da K20, apresentaram correlação superior a 0,5. Os coeficientes de correlação superiores a 0,5 identificaram forte correlação, conforme Andrade et al. (2007). O coeficiente de correlação entre PT e as variáveis UV e Ds foi superior a 0,8, considerado forte correlação, sendo que, na condição de alta Ds ocorreram os menores valores de PT e UV, corroborando com Silva et al. (2015). Constatou-se baixa correlação entre o grupo de variáveis relacionadas com a permeabilidade de água no solo, a Ds e as frações da granulometria.

**Tabela 1.** Matriz de correlação (r) entre as variáveis físico-hídricas do solo

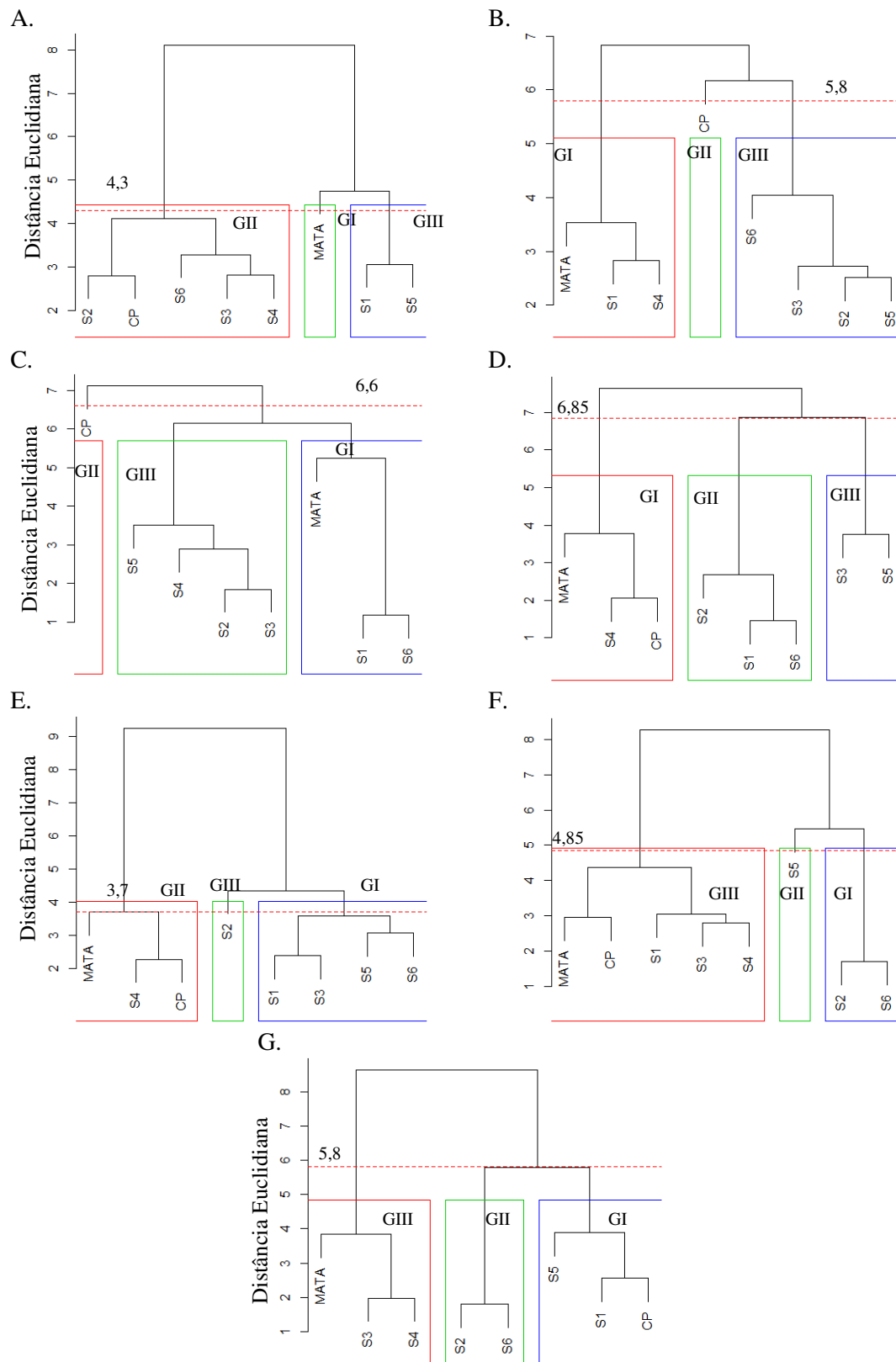
Variável	UV	Ds	MMICP	PT	MMACP	K20	Argila	Silte	Areia
UV	1,00								
Ds	-0,82*	1,00							
MMICP	0,29	-0,21	1,00						
PT	0,99*	-0,82*	0,29	1,00					
MMACP	0,45	-0,40	-0,73*	0,45	1,00				
K20	0,38	-0,38	-0,22	0,38	0,47	1,00			
Argila	0,02	-0,02	0,27	0,02	-0,24	-0,24	1,00		
Silte	-0,03	-0,11	0,05	-0,03	-0,06	-0,16	0,60*	1,00	
Areia	-0,01	0,05	-0,22	-0,01	0,20	0,24	-0,96*	-0,81*	1,00

\* Correlações consideradas significativas; UV - Umidade volumétrica; Ds - densidade do solo; PT - porosidade total; MMACP - macroporosidade; MMICP - microporosidade, K20 - condutividade hidráulica do solo saturado a 20°C, estimado pelo permeâmetro de carga constante

Na Figura 2 observa-se o dendrograma obtido da matriz de dados padronizados pela análise de agrupamento hierárquico, em que, cada vez que se obtém variação expressiva nos valores de distância euclidiana entre as variáveis para o conjunto, é considerada uma provável divisão de grupos dos talhões quanto aos atributos físico-hídricos do solo. Esta divisão demonstra a ordenação dos acessos segundo as características dos atributos do solo, enquanto nesta análise os diferentes tempos de implantação (CP, S1, S2, S3, S4, S5, S6, Mata) foram agrupadas com base no seu grau de semelhança, com o objetivo de classificá-las em grupos mais ou menos homogêneos.

Foram admitidos cortes na distância de ligação (Figura 2) que permitiram a divisão clara de três grupos com distâncias de corte variando de 3,7 (profundidade 40-60 cm) a 6,85 (profundidade 20-40 cm) indicando que com o uso conjunto dos atributos físicos e hídricos do solo foi possível ordenar os dados em três grupos, quanto às

características dos atributos do solo. Verifica-se, na Figura 2 com exceção da profundidade 0-5 cm, que a Mata apresentou condições similares às dos sistemas de cultivo de cana-de-açúcar, pela análise de agrupamento.



**Figura 2.** Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos com a formação de grupos por profundidade: 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm

(D), 40-60 cm (E), 60-80 cm (F) e 80-100 cm (G). GI – Grupo 1, GII – Grupo 2 e GIII – Grupo 3

Esta divisão em grupos, apresentada na Figura 2, evidencia um resultado muito importante, observando-se que a ordenação dos acessos ocorreu em razão dos atributos UV, Ds e PT, ou seja, aos parâmetros que remetem ao conteúdo de água no solo. No agrupamento 1 ficaram os acessos que possuíam os maiores valores de UV e menores valores de PT e Ds; no 2, os com valores intermediários dos atributos do solo de conteúdo de água no solo e no 3, os com menores valores de UV e maiores valores de PT e Ds dos atributos do solo (Tabela 2).

**Tabela 2.** Médias dos atributos físico-hídricos dos grupos formados por profundidade

Grupo	UV cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	Ds kg/dm <sup>3</sup>	MMICP cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	PT cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	MMACP cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	K20 m/h	Argila %	Silte %	Areia %
profundidade 0-5 cm									
1	0,50	1,25	0,229	0,369	0,140	0,023	13,59	5,41	80,99
2	0,42	1,57	0,316	0,421	0,105	0,042	8,87	1,67	89,46
3	0,35	1,65	0,229	0,403	0,174	0,010	12,54	6,58	80,89
Média	0,42	1,49	0,258	0,398	0,140	0,025	11,67	4,55	83,78
profundidade 5-10 cm									
1	0,45	1,50	0,273	0,445	0,172	0,020	7,82	0,62	91,56
2	0,42	1,49	0,247	0,417	0,169	0,036	12,57	2,75	84,67
3	0,39	1,61	0,292	0,385	0,093	0,022	10,00	2,36	87,64
Média	0,42	1,53	0,271	0,415	0,145	0,026	10,13	1,91	87,96
profundidade 10-20 cm									
1	0,39	1,58	0,245	0,386	0,142	0,031	13,14	4,43	82,44
2	0,38	1,65	0,271	0,378	0,107	0,026	7,87	1,07	91,06
3	0,36	1,67	0,238	0,354	0,117	0,020	9,92	1,99	88,10
Média	0,37	1,63	0,251	0,373	0,122	0,026	10,31	2,49	87,20
profundidade 20-40 cm									
1	0,41	1,57	0,232	0,405	0,173	0,025	10,02	1,92	88,05
2	0,38	1,64	0,246	0,384	0,138	0,044	12,43	2,38	85,19
3	0,37	1,61	0,214	0,369	0,155	0,030	10,79	3,48	85,73
Média	0,39	1,61	0,230	0,386	0,155	0,033	11,08	2,59	86,32
profundidade 40-60 cm									
1	0,38	1,64	0,302	0,382	0,080	0,019	13,33	3,81	82,87
2	0,37	1,59	0,282	0,366	0,084	0,022	10,83	2,24	86,93
3	0,36	1,70	0,261	0,355	0,094	0,016	13,71	2,85	83,43
Média	0,37	1,65	0,281	0,368	0,086	0,019	12,62	2,96	84,41
profundidade 60-80 cm									
1	0,39	1,60	0,268	0,385	0,118	0,013	13,05	3,70	83,26
2	0,38	1,62	0,264	0,378	0,114	0,029	15,46	5,49	79,05
3	0,37	1,63	0,217	0,373	0,155	0,023	13,22	3,50	83,28
Média	0,38	1,61	0,250	0,379	0,129	0,022	13,91	4,23	81,86
profundidade 80-100 cm									
1	0,39	1,56	0,320	0,390	0,070	0,017	15,92	3,67	80,41
2	0,39	1,61	0,306	0,389	0,083	0,018	14,28	3,74	81,99
3	0,35	1,67	0,297	0,352	0,054	0,009	12,61	2,75	84,64
Média	0,38	1,61	0,308	0,377	0,069	0,015	14,27	3,39	82,34

UV - Umidade volumétrica; Ds - densidade do solo; PT - porosidade total; MMACP - macroporosidade; MMICP - microporosidade, K20 - condutividade hidráulica do solo saturado a 20°C, estimado pelo permeâmetro de carga constante

Nas camadas mais superficiais com profundidade 5-10 cm e 10-20 cm ocorre similaridade da Mata com S1, indicando que após alterações iniciais do uso do solo, existe certa resiliência quanto à alguns atributos do solo, sendo que a partir da profundidade 20-40 cm observou-se que ainda ocorre similaridade da Mata com o S4; nesta comparação é possível observar as alterações de atributos do solo após a utilização agrícola verificando, assim, maior sustentabilidade da Mata.

Constatou-se também que os impactos provenientes pelo manejo da CP são destacados nas camadas superficiais 5-10 cm e 10-20 cm, visto que remetem a uma elevada variabilidade devido a fatores intrínsecos do solo e também ao manejo, proveniente da recente substituição da Mata, por Cana planta.

Em relação às médias dos atributos físicos verificou-se que o solo apresentou, em todos os agrupamentos, valores de  $D_s$ , abaixo do crítico para solos arenosos, Reichert et al. (2003), afirmaram que o valor crítico se situa em torno de  $1,75 \text{ kg dm}^{-3}$ , valor este próximo ao encontrado apenas no agrupamento 3 ( $1,70 \text{ kg.dm}^{-3}$ ) na profundidade 40-60 cm, podendo ser considerados altos, enquanto o agrupamento 1 (Mata) da camada superficial 0-5 cm, apresentou o menor valor de densidade; tal fato pode ser justificado pela presença de serrapilheira em decomposição, aliado à ação de espécies pioneiras concentradas em superfície o que pode ter contribuído para os menores resultados de densidade nesta camada.

A PT se encontra próxima à ideal, em que o solo ideal para a produção agrícola deve apresentar PT próxima a  $0,50 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$  (KIEHL, 1979). Verificou-se predomínio do volume de microporos nas distintas profundidades. Observou-se, ainda, grande variação nos valores de condutividade hidráulica no solo nos agrupamentos por profundidade, além da predominância da classe moderadamente alta ( $0,0036 < K_{20} < 0,036$ ) de acordo com a classificação da Soil Survey (United State Department of Agriculture - USDA, 1993); tal fato pode ser justificado pelo elevado teor de areia, ocorrendo valores específicos de condutividade classificados como alta, nas profundidades 0-5 cm e 20-40 cm no agrupamento 2, em que ambos remetem às áreas S2 e S6 (áreas agrícolas).

Observa-se a predominância de textura variando de areno-argiloso, franco-arenoso e arenoso franco argiloso, conforme classificação do triângulo textural (EMBRAPA, 1999). As maiores condutividades hidráulicas do solo observadas se devem, provavelmente, ao efeito da granulometria do solo com elevado teor de areia (Tabela 2), possivelmente associado ao baixo estoque de carbono, além do revolvimento do solo. O revolvimento favorece a rugosidade superficial do solo e, conseqüentemente,

a capacidade de infiltração de água no solo, por aumentar a proporção de poros responsáveis pela drenagem do solo.

Observou-se que ocorreu mobilidade da argila para a camada 40-60 cm, o que, segundo Silva & Cabeda (2006) pode ser causado por processos naturais provocando o adensamento desta faixa e em virtude, também, da ação antrópica na área; esses autores também afirmam, estudando um Argissolo Amarelo coeso cultivado com cana-de-açúcar, que o cultivo da cana pode alterar a organização da matriz do solo promovendo um arranjo mais compacto em áreas cultivadas sob sequeiro, irrigado e vinhaça, em relação à área de mata.

Na análise de componentes principais a partir de todos os atributos avaliados, foram extraídos os dois primeiros componentes. Esses componentes de forma acumulada explicaram a variância acima de 70% da variabilidade total dos dados (Tabelas 3 e 4). A partir dessa análise, foram observados em cada camada as variáveis que apresentaram escores altamente significativos ( $\geq 0,5$  em valor absoluto) e ainda foi considerado mediantemente significativo (0,30-0,40), quando não forem obtidos escores altos.

**Tabela 3.** Autovalores e autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (CP) e das variáveis físico-hídricas das camadas de 0 a 40cm

Profundidade	0-5cm		5-10cm		10-20cm		20-40cm	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
DP	2,016	1,543	1,982	1,694	2,212	1,633	2,154	1,642
VE	0,452	0,265	0,437	0,319	0,543	0,296	0,516	0,299
VA	0,452	0,716	0,437	0,756	0,543	0,840	0,516	0,815
UV	-0,121	0,584*	-0,470*	-0,188	-0,400	0,184	-0,296	-0,455*
Ds	-0,079	-0,546*	0,455	0,061	0,411*	-0,133	0,382	0,026
MMICP	-0,422	-0,189	0,074	-0,125	0,378	-0,127	0,119	-0,585*
PT	-0,191	-0,417	-0,475*	-0,166	-0,400	0,183	-0,270	-0,454
MMACP	0,342	-0,174	-0,424	-0,044	-0,423*	0,166	-0,425	0,233
K20	-0,275	0,290	-0,376	0,187	-0,260	-0,087	-0,181	-0,310
Argila	0,379	0,149	-0,082	0,536*	-0,117	-0,586*	0,411*	-0,238
Silte	0,445*	-0,123	-0,078	0,515	-0,270	-0,461	0,308	0,041
Areia	-0,480*	-0,013	0,088	-0,573*	0,187	0,555*	-0,432*	0,189

\* Correlações consideradas significativas na interpretação do componente principal, CP – Componente principal; DP – Desvio padrão; VE – Variância explicada; VA – Variância acumulada; UV - Umidade volumétrica; Ds - densidade do solo; PT - porosidade total; MMACP -macroporosidade; MMICP - microporosidade, K20 - condutividade hidráulica do solo saturado a 20°C, estimado pelo permeâmetro de carga constante

Isso mostra que, de 9 variáveis, passam-se a utilizar duas, havendo redução de dimensionalidade das variáveis originais, com perda de explicação de menos de 30% nas sete profundidades estudadas.

Na profundidade 0-5 cm o Silte e a Areia apresentaram o maior peso, contribuindo mais para a CP1, que reflete a maior correlação e variabilidade entre essas variáveis;

assim, há razões para denominar a primeira componente principal (CP1) de textura do solo ( $0,445*\text{Silte} - 0,481*\text{Areia}$ ) ocorrendo redução dos dados. O segundo componente principal se correlaciona com a umidade volumétrica e a densidade do solo ( $0,584*UV - 546*Ds$ ) denominada adensamento do solo, ocorrendo redução dos dados para uma nova variável.

Na profundidade 5-10 cm a Porosidade Total e a Umidade volumétrica constituem a CP1 ( $-0,470*UV - 0,475*PT$ ) foi denominada conteúdo de água no solo, já a CP2 se correlacionou com as frações de argila e areia ( $0,536*\text{Argila} - 0,573*\text{Areia}$ ), foi nomeada textura do solo. Na profundidade 10-20 cm a Densidade do solo e a macroporosidade ( $0,411*Ds - 0,423*MMACP$ ) foi denominada permeabilidade do solo, enquanto a CP2 foi constituída pela Argila e Areia ( $-0,586*\text{Argila} - 0,555*\text{Areia}$ ), textura do solo; na profundidade 20-40 cm a CP1 foi composta pela Argila e Areia ( $0,411*\text{Argila} - \text{Areia}*0,432$ ), nomeada textura do solo; já a CP2 foi formada pela umidade volumétrica e pela microporosidade ( $-0,455*UV - 0,585*MMICP$ ) denominada conteúdo de água do solo.

Na Tabela 4 pode-se averiguar que na profundidade 40-60 cm a CP1 se correlacionou com os atributos MMICP e Areia ( $-0,399*MMICP + 0,384*\text{Areia}$ ), denominado de armazenamento do solo; já a CP2 foi constituída pelos atributos macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado ( $0,458*MMACP + 0,547*K20$ ), denominada drenagem do solo; na profundidade 60-80 cm a CP1 se correlacionou com a umidade volumétrica e com a porosidade total ( $-0,428*UV - 0,429*PT$ ), conhecida como conteúdo de água no solo, enquanto para a CP2 as frações de porosidade do solo se relacionaram melhor ( $0,453*MMICP - 0,528*MMACP$ ). Na profundidade 80-100 cm a CP1 foi explicada pelos atributos umidade volumétrica e porosidade total ( $-0,407*UV - 0,408*PT$ ), enquanto a CP2 se correlacionou com a Argila e o Silte ( $0,433*\text{Argila} + 0,480*\text{Silte}$ ).

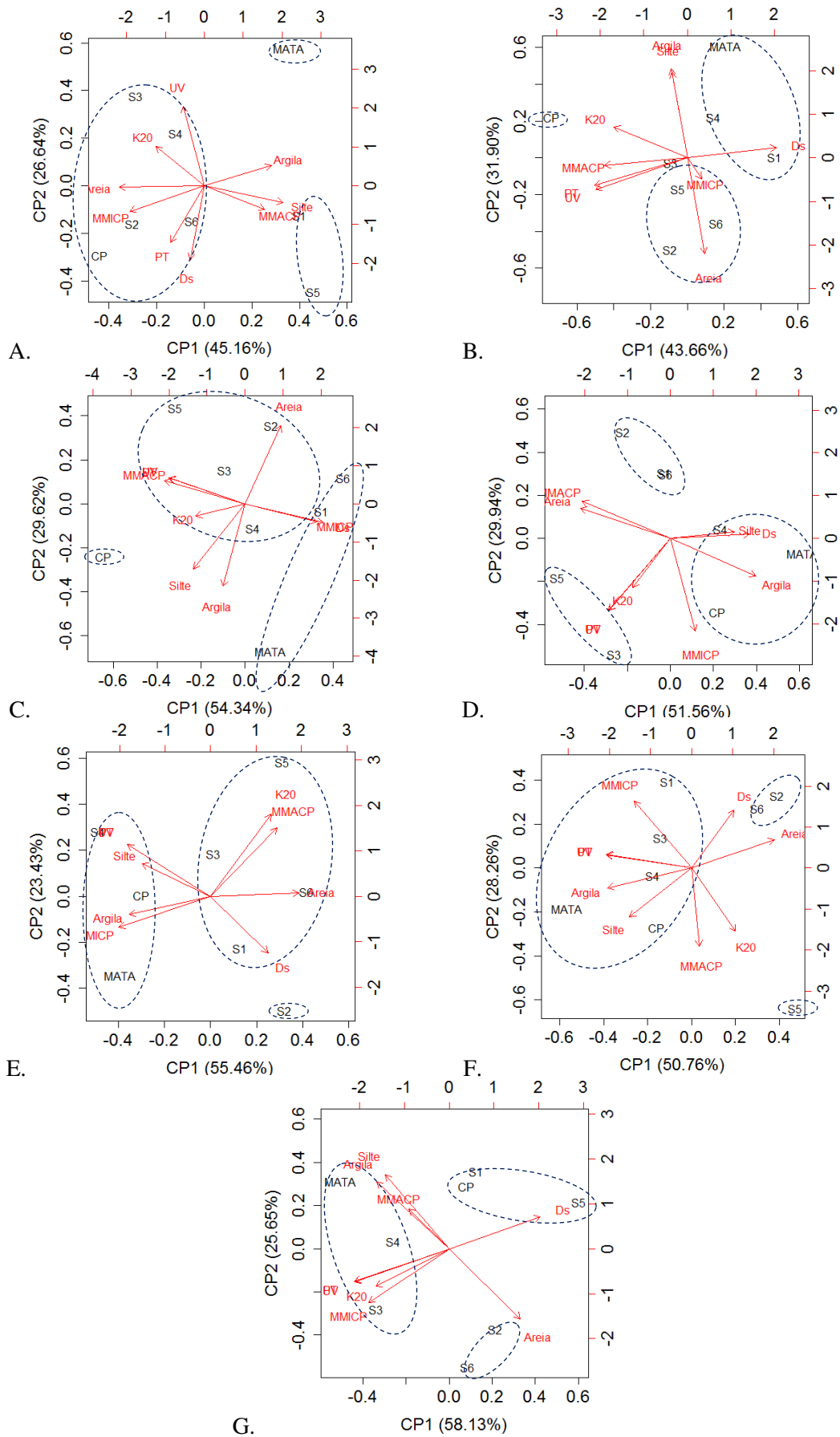
**Tabela 4.** Autovalores e autovetores da matriz de correlação dos componentes principais (CP) e das variáveis físico-hídricas das camadas de 40 a 100cm

Profundidade	40-60cm		60-80cm		80-100cm	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
DP	2,234	1,452	2,137	1,595	2,287	1,519
VE	0,555	0,234	0,508	0,283	0,581	0,257
VA	0,555	0,789	0,508	0,790	0,581	0,838
UV	-0,363	0,347	-0,428*	0,089	-0,407*	-0,213
Ds	0,250	-0,379	0,215	0,391	0,393	0,205
MMICP	-0,399*	-0,208	-0,289	0,453*	-0,346	-0,348
PT	-0,363	0,347	-0,429*	0,093	-0,408*	-0,209
MMACP	0,289	0,458*	0,039	-0,528*	-0,173	0,258
K20	0,263	0,547*	0,222	-0,427	-0,315	-0,242
Argila	-0,354	-0,122	-0,425	-0,134	-0,311	0,433*
Silte	-0,299	0,218	-0,313	-0,332	-0,274	0,480*
Areia	0,384*	0,022	0,417	0,191	-0,407	-0,213

\* Correlações consideradas significativas na interpretação do componente principal, CP – Componente principal; DP – Desvio padrão; VE – Variância explicada; VA – Variância acumulada; UV - Umidade volumétrica; Ds - densidade do solo; PT - porosidade total; MMACP - macroporosidade; MMICP - microporosidade, K20 - condutividade hidráulica do solo saturado a 20°C, estimado pelo permeâmetro de carga constante

Na Figura 3 observou-se a distribuição dos tempos de manejo do solo e dos componentes dos atributos físico-hídricos do solo. Ocorrendo a formação de três grupos classificados de acordo com as projeções dos componentes principais, que refletiram seu comportamento em relação aos fatores. Com base nas relações entre as variáveis verificou-se que, com exceção da profundidade 0-5 cm, a Ds tem sinal contrário ao de MMACP, K20, UV e PT, condizente com a variação dessas variáveis físico-hídricas, já que Ds varia exatamente no sentido inverso de PT e UV. Com o primeiro eixo da ACP explicou-se mais de 45% da variação dos dados em todas as profundidades, com exceção da profundidade 0-5 cm, com grande sobreposição dos efeitos entre PT e UV.

Ressalta-se que cada profundidade foi determinada por um conjunto de variáveis que melhor discriminaram a formação das componentes e seus respectivos agrupamentos. Constatou-se que a área de Mata esteve relacionada a elevada MMICP nas profundidades superiores a 10 cm (Figura 3), o que indica maior efeito da variável microporosidade sobre o agrupamento, de vez que, foi escolhida por ser um local sem manejo agrícola, sugerindo que esta é a área com maior efeito dos microporos. Tal fato pode ser justificado em virtude desses solos possuírem microagregados pela partícula de argila, o que lhes confere maior microporosidade, fato este oposto quando encontrados em solos arenosos: por possuírem partículas maiores apresentam espaço poroso constituído por poros de maior diâmetro (macroporos) tendo, assim, menor quantidade de poros totais encontrados nesses solos (FREITAS et al., 2014).



**Figura 3.** Análise de componentes principais das médias dos atributos dos solos por profundidade. 0-5 cm (A), 5-10 cm (B), 10-20 cm (C), 20-40 cm (D), 40-60 cm (E), 60-



80 cm (F) e 80-100 cm (G)

Nas profundidades 5-10 cm e 10-20 cm verificou-se que a CP se encontra mais próximo das variáveis K20, MMAPCP, UV e PT, indicando maior efeito nessas variáveis, sobre a porosidade, permeabilidade e condutividade hidráulica do solo, devido às recentes movimentações, à substituição do uso do solo e revolvimento da camada superficial do solo para implantação do cultivar.

No ambiente cultivado com cana-de-açúcar, independente da profundidade, foi possível verificar uma influência maior da Ds, corroborando com Freitas et al. (2012), devido ao evento desta área ser muito influenciada pelo manejo do solo na implantação e na manutenção da cultura, e também pelas práticas na colheita, tornando o solo mais compactado alterando, assim, sua densidade.

Neste sentido, solos com maior densidade apresentam diminuição da porosidade total, redução da permeabilidade e da infiltração de água e quebra dos agregados com aumento da resistência mecânica à penetração, ocasionando prejuízo ou comprometendo a qualidade física do solo (PEZARICO et al., 2013).

Freitas et al. (2014) observaram, estudando análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar, que as técnicas de análises multivariadas evidenciaram que os principais atributos para distinção dos ambientes forma a densidade do solo, a macro e a microporosidade, o manganês, o cobre e o magnésio, corroborando com os resultados encontrados neste trabalho.

A estatística multivariada possibilitou o estudo das variáveis na sua totalidade contribuindo para a análise em conjunto, melhorando a qualidade das interpretações (CORTEZ et al., 2011b). O uso das técnicas de multivariadas, análise de agrupamento e de componentes principais, foi eficiente para verificar as similaridades ou as diferenças com base nos atributos físicos do solo em cada ambiente estudado (FREITAS et al., 2012).

## CONCLUSÕES

1. A análise de componentes principais indica que os atributos do solo avaliados foram explicados, quanto à sua variação total, por duas componentes, em geral, discriminando mais de 70% da variabilidade por profundidade avaliada. Sendo S4 o tempo de cultivo que se verificou maior semelhança com a Mata na formação de grupos.

2. Utilizando a análise multivariada foi possível verificar quais os tempos de implantação de cultivo com maior dissimilaridade e quais os atributos físicos do solo que mais discriminaram; portanto são importantes, na seleção de quais os atributos físicos do solo devem ser avaliados por profundidade.
2. Verificou-se aleatoriedade em referência à distribuição dos agrupamentos pelos tempos de manejo da cronosequência, o que remete à elevada variabilidade na dissimilaridade nos atributos do solo.
1. Os componentes principais que proporcionaram melhor explicação foram relacionados à textura, adensamento, à porosidade e ao conteúdo de água do solo.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; GOMES, R. B.; LOBATO, F. A. O. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, v.37, n.6, p.1791-1797, 2007.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.2, p.337-345, 2004.
- BARROS, Z. X.; CAMPOS, S.; CARDOSO, L.; POLLO, R. A. Estatística multivariada e contraste ortogonal aplicados a variáveis do relevo. **Engenharia Agrícola**, v.22, n.2, p.249-257, 2002.
- BOGNOLA, I.A.; LINGNAU, C.; LAVORANTI, O. J.; STOLLE, L.; HIGA, A. R.; OLIVEIRA, E. B. Geoestatística integrada com estatística multivariada e geoprocessamento na definição de unidades de manejo para o Pinus taeda. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C., editores. **Agricultura de precisão: Um novo olhar**. São Carlos: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; 2011. p.227-31.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química e física de solos do Instituto Agrônômico**. Campinas: Instituto Agrônômico, 94p. 1986. (Boletim técnico, 106).
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n.1, p.147-157, 2009.

- COELHO A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: Curi N, Marques JJ, Guilherme LRG, Lima JM, Lopes AS, Alvarez V VH, editores. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2003. p.259-90.
- CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. S.; MOURA, R. D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n.4, p. 1207-1216, 2011a.
- CORTEZ, J.W.; FERNANDES, A. L. T.; SILVA, R. P.; CARVALHO FILHO, A.; FURLANI, C. E. A. Métodos multivariados na avaliação dos atributos físicos do solo na cafeicultura irrigada. **Revista Engenharia na agricultura**, v.19, n.2, p.132-140, 2011b.
- COSTA, F. S.; ALBUQUERQUER, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.3, p.527-535, 2003.
- CPRH – Companhia Pernambucana de Recursos Hídricos. **Diagnóstico sócio-ambiental do litoral norte de Pernambuco**. Recife. Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco, 214p, 2003.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (Special publication, 35).
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.<<http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>>. 3 Mar 2012.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério de Agricultura e do Abastecimento. p. 412. Brasília-DF, 1999.
- FREITAS L.; CASAGRANDE J. C.; OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C. Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v.57, n.3, p.224-33, 2014.

- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E. Análises multivariadas de atributos físicos em latossolo vermelho submetidos a diferentes manejos. **Enciclopédia Biosfera**, v.8, n.15; p. 126-139, 2012.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SCAPIM, C. A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.1, p.9-19, 2007a.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SILVA, Á. P. Qualidade física do solo em pomar de laranja no noroeste do Paraná com manejo da cobertura permanente na entrelinha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.3, p.423-433, 2007b.
- FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n.4, p. 627-636, 2007.
- HAIR, J.F.; ANDERSON, R.E.; TATHAM, R.L.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre, Bookman, 2005. 688p.
- JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, W. G.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; PIRES, F. R.; SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 116–121, 2008.
- JOSÉ, J. V.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; HONGYU, K.; PERBONI, A.; MARQUES, P. A. A.; DIAS, C. T. S.; COELHO, R. D. Análise multivariada e geoestatística de variáveis físico-hídricas de diferentes solos. **Water Resources and Irrigation Management**, v.2, n.3, p.121-9, 2013.
- MION, R. L.; NASCIMENTO, E. M. S.; SALES, F. A. L.; SILVA, S. F.; DUARTE, J. M. L.; SOUSA, B. M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, p. 2057-2066, 2012.
- Oliveira, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, n.1, p.197-200. 1986.
- PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 40- 47, 2013.
- PRAGANA, R. B.; RIBEIRO, M. R.; NÓBREGA, J. C. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; DA COSTA, J. A. Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na

- região do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.5, p.1591-600, 2012.
- R Development Core Team R. **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2015. URL <http://www.R-project.org>.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, n.1, p.29-48, 2003.
- SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; DELLA FLORA, L. P.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.9, p.1346-57, 2012.
- SILVA, E. N. S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; CORREA, A. R.; TOMAZ, P. K.; FERRAUDO, A. S. Variabilidade de atributos físicos e químicos do Solo e produção de feijoeiro cultivado em sistema de cultivo mínimo com irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.2, p.598-607, 2015.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geoestatística. **Revista Ceres**, v.59, n.2, p.271-277, 2012.
- SILVA, S.A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A.C.; TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.1, p.15-22, 2010.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Modificações na matriz de um Argissolo Amarelo coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.554-562, 2006.
- TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em relação ao número de amostras e ao tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 487-494, 2008.
- UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil survey manual: soil conservation service**. Washington, 1993. (Handbook, 18).
- VALENTIN, J.L. **Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000. 117p.
- WEIRICH NETO, P. H; BORGHI, E.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; NEWES, W. L. C..Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.36, n.4, p.1186-1192, 2006.

## **CAPÍTULO V**

---

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição da vegetação de Mata por sistemas de cultivo de cana-de-açúcar com queima da palhada para colheita manual promoveu diminuição de cerca de 50% nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total do solo. Os diferentes ciclos de manejo da cana-de-açúcar a longo prazo não são agrupados com a área de Mata, ao se considerar os estoques de carbono e nitrogênio, desta forma, o tempo de implantação do agrossistema (até 7 anos) ainda não foi suficiente para se equiparar aos estoques da Mata.

O uso das técnicas multivariadas mostrou-se eficiente na distinção de ambientes sobre os diferentes tempos de implantação dos ciclos de cultivo da cana-de-açúcar estudados a longo prazo, agrupando os distintos tempos de manejo quanto aos atributos físico-hídricos e químicos do solo, o que remete a importância de estudos de sustentabilidade do solo a longo prazo.

A técnica de análise de componentes principais possibilitou averiguar correlação entre os estoques de carbono orgânico e nitrogênio total com os atributos físicos avaliados de declividade do relevo e a densidade do solo, tal como a influência de cada variável sobre a distribuição destes.

A partir do ciclo de cultivo da cana planta verificou-se alterações quanto os atributos físico-hídricos e químicos do solo avaliados, principalmente nas camadas superficiais de 0-40 cm. Este fato pode estar relacionado com a mobilização do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas, aliado as práticas da queima da palhada, além do aporte de material que fica em cima do solo e posteriormente é agregado mediante revolvimento, desta forma acelerando a decomposição das cinzas incorporadas.

Após os sete anos de avaliação dos cultivos observou-se que as características do solo tenderam gradativamente a retornar as condições iniciais de Mata, mediante ausência de mobilização e revolvimento do solo como pode-se observar na soca de 5º e 4º ano, principalmente em camadas de 60 a 100 cm de profundidade, para as propriedades químicas e físico-hídricas, respectivamente.

Todas as profundidades de solo analisadas foram fundamentais para identificar a susceptibilidade dos atributos físico-hídricos e químicos do solo frente aos impactos da cronossequência dos tempos de implantação do cultivo da cana-de-açúcar sobre queima da palhada para corte manual.

A estatística multivariada através das técnicas de agrupamento hierárquico e de análise de componentes principais possibilitou determinar os agrupamentos, em virtude

da similaridade dos atributos avaliados, além de identificar e reduzir as variáveis, elencando as que exerceram maior influência sobre a caracterização do ambiente, indicando ser uma ferramenta importante para estabelecer estratégias de manejo do solo que visem a sustentabilidade do agrossistema e, conseqüentemente, o aumento dos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total ao longo do tempo.

Nas áreas mantidas sob cultivo tradicional, devem ser adotadas práticas conservacionistas para acelerar o processo de recuperação dessas áreas, tal como o manejo sem o emprego da técnica da queima para despalha, podendo aumentar a produtividade das culturas e da biomassa e incrementar os estoques de matéria orgânica no solo, pelo aporte de resíduo vegetal. É provável que o acúmulo de palhada em longo prazo resulte em alterações no sistema de manejo da cultura, com lenta e gradual redução da exigência de adubação com a manutenção e aumento da fertilidade do solo.