

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

LEANDRO REIS COSTA SANTOS

**IMPACTO DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE A
DINÂMICA DO CARBONO EM SOLO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Recife

2017

Leandro Reis Costa Santos
Engenheiro Agrônomo

**Impacto do cultivo da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono em solo do
Semiárido brasileiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Agronomia - Ciências do Solo.

Orientadora: Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas

RECIFE/PE

2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S237i Santos, Leandro Reis Costa
Impacto do cultivo da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono em solo do semiárido brasileiro / Leandro Reis Costa Santos. – 2017.
78 f. : il.

Orientadora: Ana Dolores Santiago de Freitas.
Coorientador: Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2017.
Inclui referências.

1. Caatinga 2. Dióxido de carbono 3. Efeito estufa 4. Isótopo 13C 5. Isótopo 15N 6. Matéria orgânica do solo I. Freitas, Ana Dolores Santiago de, orient. II. Sampaio, Everardo Valadares de Sá Barretto, coorient. III. Título

CDD 631.4

LEANDRO REIS COSTA SANTOS

**Impacto do cultivo da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono em solo do
Semiárido brasileiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciências do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Ciências do Solo.

Aprovada em 27 de agosto de 2017

Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas
Orientadora
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Dra. Carolina Etienne de Rosália e Silva Santos
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais, Maria José e Reizinho, por sempre acreditarem e me apoiarem em todas as minhas decisões, e também pelo amor, carinho e preocupação em mim depositados.

Às minhas irmãs, Lays e Lanna, pelo apoio e cumplicidade, e a minha amada sobrinha Mariana, que com sua inocência de criança me proporcionou tranquilidade em dias difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que em sua plena bondade sempre me guardou e me proporcionou oportunidades de evoluir nos diversos aspectos.

Agradeço a minha orientadora Dra. Ana Dolores Santiago de Freitas, por me receber de braços abertos como seu discípulo, pelos conhecimentos transmitidos, pelas conversas, risadas e conselhos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela disponibilização da bolsa de estudo. Também aos meus coorientadores Dr. Rômulo Menezes, que financiou parte de minha pesquisa, e Dr. Everardo Sampaio, pelos conhecimentos a mim passados.

Aos meus amigos do grupo de pesquisa de Fixação Biológica de Nitrogênio nos Trópicos, em especial Aleksandro Silva, pelo apoio no período da coleta do material, e a Vinicius Silva. Aos meus amigos Adriana Bezerra, Thaís Assunção, Evaniele Costa, Jefrejan Rezende, Joelma Rezende, Rita de Cássia, David Lucas, Felipe Martins e demais, que facilitaram minha adaptação em Recife.

Aos professores da pós-graduação, que investiram tempo e paciência para me transmitir seus conhecimentos. Aos técnicos dos laboratórios, em especial ao Pedro, que muito me ajudou. Aos alunos de iniciação científica, Andressa, Pablo e Estefani pela ajuda.

A professora Carolina Etienne, pelas conversas e conselhos.

A secretária da pós-graduação Socorro, por sempre estar disposta a me ajudar na parte burocrática ou simplesmente pelas conversas e conselhos.

Aos integrantes que compõem a equipe do Laboratório de Isótopos Estáveis (LABISE) da UFPE, por serem receptivos e atenciosos durante minha breve passagem pelo laboratório.

Ao Dr. Plínio Carmargo, do Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Energia Nuclear da Agricultura (CENA) da USP, pela viabilização das análises isotópicas.

Agradeço também a Fazenda AGROVALE e toda sua equipe, pelo apoio e investimento de pessoal e material para a realização desse trabalho, a Paulo Pedro, que proporcionou o estreitamento das relações da fazenda com a UFRPE, e a Argemiro.

A todos, meu muito obrigado!

*Ele respondeu: "Porque a fé que
você têm é pequena. Eu asseguro que,
se você tiverem fé do tamanho de um
grão de mostarda, poderão dizer a este
monte: 'Vá daqui para lá', e ele irá. Nada
será impossível para você.*

Mateus, 17:20.

Impacto do cultivo da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono em solo do Semiárido brasileiro

RESUMO

A mudança no uso da terra promove alteração nos estoques de carbono (C) do solo, com reflexo na emissão de dióxido de carbono (CO₂), agravando o efeito estufa. A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp), por sua importância no agronegócio brasileiro e grande área cultivada, apresenta importante papel na dinâmica do C no solo. É pouco conhecido o impacto do cultivo da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do C em solos onde as condições climáticas favorecem a rápida degradação da matéria orgânica do solo (MOS), como as áreas do Semiárido brasileiro. Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a dinâmica do carbono em solo do Semiárido brasileiro cultivado com cana-de-açúcar irrigada após a remoção da caatinga. Os objetivos específicos foram: 1) determinar as características químicas e físicas do solo em áreas de caatinga e em áreas com diferentes tempos de cultivo de cana-de-açúcar; 2) quantificar os estoques de carbono e de nitrogênio totais dos solos das diferentes áreas; 3) determinar a origem (vegetação nativa ou cana-de-açúcar) do C estocado ao longo dos perfis dos solos dessas áreas e, 4) e determinar o tempo de residência média (TRM) do carbono orgânico originário da caatinga no solo cultivado com cana-de-açúcar. As áreas localizam-se na Fazenda AGROVALE, no município de Juazeiro, Bahia, Brasil, nas seguintes situações: 1) vegetação nativa (caatinga) virgem, 2) áreas com implantação do cultivo de cana-de-açúcar há 10 anos; 3) áreas com implantação do cultivo de cana-de-açúcar há 20 anos e 4) áreas com implantação do cultivo de cana-de-açúcar há 30 anos. Todas as áreas têm Vertissolos e as agrícolas com manejos similares. Foram abertas três trincheiras em cada área, até a profundidade de 100 cm ou até se chegar à rocha. Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, para a caracterização química, física e isotópica. Também foram coletadas plantas e serapilheira, para a caracterização isotópica. O cultivo de cana-de-açúcar não promoveu alteração nas propriedades físicas do solo, todavia foram observadas alterações em algumas propriedades químicas, como a redução do sódio e da condutividade elétrica. O cultivo da cana por 30 anos promoveu um expressivo aumento nas quantidades de C nesses solos, com um incremento de aproximadamente 84,4 Mg ha⁻¹ quando considerada apenas a profundidade de 0-60 cm. O tempo de residência média do C nessas áreas é relativamente baixo, chegando a ser 18,9 anos na camada de 0-10 e de 82 anos na camada de 40-60 cm. Essa rápida degradação do C fica clara ao ser observada a contribuição das duas diferentes fontes do C para o estoque das áreas cultivadas. Houve enriquecimento de ¹³C nas áreas cultivadas, resultando em mais de 90% de C proveniente de plantas com ciclo fotossintético C₄ nas camadas superficiais. Além disso, verificou-se também que a mudança do uso da terra promoveu o enriquecimento do solo em ¹⁵N e nitrogênio (N) total. Portanto, a conversão de caatinga em cultivo de cana irrigado promove o aumento dos estoques de C e N e, enriquecimento de ¹³C e ¹⁵N.

PALAVRAS CHAVE: Caatinga. Dióxido de carbono. Efeito estufa. Isótopo ¹³C. Isótopo ¹⁵N. Matéria orgânica do solo.

Impact of sugarcane cultivation on the dynamics of carbon in Brazilian Semiarid soil

ABSTRACT

The change in land use promotes changes in carbon stocks (C) of the soil, reflecting the emission of carbon dioxide (CO₂), aggravating the greenhouse effect. Sugarcane (*Saccharum spp*), because of its importance in Brazilian agribusiness and large cultivated area, plays an important role in soil C dynamics. The impact of sugarcane cultivation on C dynamics in soils where climatic conditions favor the rapid degradation of soil organic matter (SOM), such as Brazilian semi-arid areas, is little known. The objective of this work was to evaluate the dynamics of carbon in Brazilian semi-arid soils cultivated with irrigated sugar cane after the removal of the caatinga. The specific objectives were: 1) to determine the chemical and physical characteristics of the soil in areas of caatinga and in areas with different times of cultivation of sugarcane; 2) quantify the total carbon and nitrogen stocks of the soils of the different areas; 3) to determine the origin (native vegetation or sugar cane) of the C stocked along the soil profiles of these areas and, 4) to determine the average residence time (TRM) of the organic carbon originating from the caatinga in the soil cultivated with sugar cane. The areas are located in the Farm AGROVALE, in the municipality of Juazeiro, Bahia, Brazil, in the following situations: 1) native vegetation (caatinga) virgin, 2) areas with implantation of the sugarcane cultivation 10 years ago; 3) areas with implantation of the sugarcane cultivation 20 years ago and 4) areas with implantation of sugarcane cultivation for 30 years. All areas have Vertisols and similar farms. Three trenches were opened in each area, to the depth of 100 cm or until reaching the rock. Deformed and undisturbed samples were collected in the 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm layers for the chemical, physical and isotopic characterization. Plants and litter were also collected for isotopic characterization. The cultivation of sugarcane did not promote changes in the physical properties of the soil, however, changes in some chemical properties were observed, such as sodium and electrical conductivity reduction. Cane cultivation for 30 years promoted a significant increase in the amount of C in these soils, with an increase of approximately 84.4 Mg ha⁻¹ when only the depth of 0-60 cm was considered. The average residence time of C in these areas is relatively low, reaching 18.9 years in the 0-10 layer and 82 years in the 40-60 cm layer. This rapid degradation of C becomes clear when the contribution of the two different C sources to the stock of cultivated areas is observed. There was enrichment of ¹³C in the cultivated areas, resulting in more than 90% of C coming from plants with C₄ photosynthetic cycle in the superficial layers. In addition, it was also verified that land use change promoted soil enrichment in ¹⁵N and total nitrogen (N). Therefore, conversion of caatinga to irrigated cane cultivation promotes the increase of C and N stocks and enrichment of ¹³C and ¹⁵N.

Keywords: Caatinga. Carbon dioxide. Greenhouse effect. ¹³C Isotope. ¹⁵N Isotope. Soil organic matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (AGROVALE), em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	40
Figura 2: Pontos das coletas das amostras nas áreas com diferentes tempos de cultivos na Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (AGROVALE), em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	42
Figura 3: Concentrações de C do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	54
Figura 4: Abundância natural do $\delta^{13}\text{C}$, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	57
Figura 5: Proporção de carbono derivado da caatinga anterior e da cana-de-açúcar cultivado por 10, 20 e 30 anos em Vertissolo, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	60
Figura 6: Dinâmica do carbono total (Ct) do solo, do C derivado da caatinga (Cdm) e da cana-de-açúcar (Cdc) cultivada por 10, 20 e 30 anos em Vertissolo, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	61
Figura 7: Concentrações de N do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	63
Figura 8: Abundância natural do ^{15}N , em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	65

Figura 9: Relação C:N, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produtividade de colmos da cana-de-açúcar em áreas com diferentes tempos de cultivo na Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (AGROVALE), em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	43
Tabela 2: Caracterização física, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	50
Tabela 3: Caracterização química do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	52
Tabela 4: Estoques de C do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	55
Tabela 5: Concentrações de C e N e proporções de ^{13}C e ^{15}N em partes das plantas de cana-de-açúcar, de árvores e da serapilheira em áreas de caatinga.....	58
Tabela 6. Tempo de residência média do carbono (TRM) orgânico derivado da caatinga em Vertissolo, cultivado com cana-de-açúcar por 30 anos, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	62
Tabela 7: Estoques de N do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

AGROVALE	Agroindústria do Vale do São Francisco
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
Ds	Densidade do Solo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FBN	Fixação Biológica de Nitrogênio
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MO	Matéria Orgânica
MOS	Matéria Orgânica do Solo
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PDB	Pee Dee Belemnite
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
TRM	Tempo de Residência Média

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Carbono
δ	Delta
CO ₂	Dióxido de Carbono
Gt	Gigatonelada
°C	Graus Celsius
ha	Hectare
¹³ C	Isótopo Carbono 13
¹⁵ N	Isótopo Nitrogênio 15
Mg	Megagrama
CH ₄	Metano
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
ppm	Partes por milhão
Pg	Pentagrama
‰	Permil
t	Tonelada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1. Hipóteses	26
1.2. Objetivo geral	26
1.3. Objetivos específicos	26
2. REVISÃO DE LITERATURA	27
2.1. A cultura da cana-de-açúcar	27
2.2. Ciclo global do carbono, compartimentos e estoques	28
2.3. Dinâmica do carbono no solo	32
2.4. Técnicas isotópicas no estudo da mudança do uso da terra.....	34
2.5. O sistema fotossintético e a eficiência na utilização do dióxido de carbono (CO ₂) pelas plantas	36
2.6 O nitrogênio do solo	36
2.7. O Bioma Caatinga	38
3. MATERIAL E MÉTODOS	40
3.1. Localização e caracterização da área	40
3.2. Amostragem e análises do solo e da planta.....	44
3.3. Cálculo do estoque do carbono	47
3.5. Cálculo do tempo de residência média do carbono.....	48
3.6. Análises estatísticas	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1. Caracterização física e química do solo	49
4.2. Concentrações e estoque de C	53
4.3. Sinais isotópicos e origem do C	56
4.4. Nitrogênio do solo.	62
5. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus derivados, cultivando em milhões de hectares distribuídos em todas as regiões. É uma cultura economicamente importante para o país por ter um grande peso no mercado interno e externo, além de ser responsável por empregar uma grande quantidade de brasileiros distribuídos em todo o seu processo produtivo.

Por ser uma gramínea tropical, a cana-de-açúcar possui o metabolismo fotossintético C₄, no qual o primeiro produto da fotossíntese é um composto de 4 carbonos. As plantas que apresentam esse tipo de metabolismo possuem grande afinidade com o dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, alta eficiência fotossintética e de utilização de água, além de potencial de alta produção de biomassa. Essas características conferem um grande potencial para utilização da cana-de-açúcar como cultura energética, tornando-a matéria-prima ideal para produção de etanol e outros biomateriais. A produção de etanol é uma importante alternativa na substituição aos combustíveis fósseis porque, além de emitir menos gases poluentes, ainda captura o CO₂, permanecendo uma parte desse estocado no solo devido ao expressivo sistema radicular da cana-de-açúcar. Por essas características, possui um papel de grande relevância no cenário mundial em relação à captura de CO₂ atmosférico e seus efeitos sobre o clima.

O carbono pode ser estocado em diversos compartimentos, sendo eles os oceanos, o solo, a atmosfera e a biota. O solo é o segundo maior dentre esses compartimentos e o que mais tem sofrido com a ação antrópica, provocando alteração nos estoques de C. As atividades agrícolas são as principais responsáveis pelas alterações dos estoques de C no solo. O Brasil é um dos maiores emissores de CO₂, não pela queima de combustíveis não-renováveis, mais sim, pelas atividades agrícolas e o desmatamento de florestas.

A mudança do uso da terra afeta a quantidade e a qualidade do C estocado no solo, podendo em alguns casos aumentar a quantidade de C estocado e, em outros casos, diminuir. Quando a mudança de uso da terra é pela substituição de uma cobertura vegetal dominada por plantas C₃ por uma cobertura dominada por plantas C₄, ou vice-versa, é possível determinar a origem e a proporção desse C (vegetação

C3 ou vegetação C4), por meio da técnica da abundância natural do isótopo ^{13}C . Com isso, é possível calcular o tempo de residência média (TRM) desse C no solo. Estudos desse tipo ainda são escassos em nível mundial, e ainda mais no Brasil. Dentre todos os biomas brasileiros, a Caatinga é o que apresenta uma das menores representatividades nessas pesquisas.

1.1. Hipóteses

Para a realização desta pesquisa foi levantada a hipótese que a conversão da mata em cultivos de cana-de-açúcar promove: (1) um aumento no estoque de C do solo ao longo do tempo; (2) um aumento da participação do C proveniente da cana-de-açúcar em relação ao C proveniente da caatinga, com consequente enriquecimento do isótopo ^{13}C ; e (3) o tempo de residência médio (TRM) do C originário da mata é menor nas camadas superficiais do solo e aumenta em profundidade.

1.2. Objetivo geral

Avaliar a dinâmica de carbono orgânico em solo do Semiárido brasileiro cultivado com cana-de-açúcar irrigada após a remoção da vegetação nativa (caatinga).

1.3. Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram: determinar as características químicas e físicas do solo em áreas com cobertura vegetal de caatinga e em áreas com diferentes tempos de cultivo de cana-de-açúcar irrigada; quantificar os estoques de carbono e de nitrogênio total dos solos das diferentes áreas; determinar a origem (vegetação nativa ou cana-de-açúcar) do C estocado ao longo dos perfis dos solos dessas áreas; e determinar o tempo de residência média (TRM) do carbono orgânico originário da caatinga no solo com cultivado com cana-de-açúcar.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) é uma gramínea semiperene que expressa máximo desenvolvimento em solos com boa aeração, boa drenagem e, de preferência, com profundidade superior a um metro. Após o plantio, a cultura possibilita sucessivos ciclos: o primeiro é chamado de cana planta, e os demais são chamados de cana soca, que é a cana proveniente da rebrota das soqueiras (CONAB, 2014). A quantidade de ciclos da cana soca depende da eficiência do manejo adotado pelo produtor, no entanto, com os cortes sucessivos a cultura tende a diminuir a sua produção de forma gradativa, chegando ao ponto de ser necessária a renovação do canavial (CONAB, 2014).

A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil no ano de 1532, com uma ótima adaptação às condições climáticas e ambientais, permitindo, assim, ao país, uma posição de destaque no cenário mundial de produção da cultura e de seus derivados. Atualmente, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, seguido pela Índia e China, com uma estimativa de área plantada para a safra 2017/18 de 8.838.500 hectares e uma produção de 647.600.000 toneladas. Além disso, o país é também o maior produtor mundial de açúcar e etanol proveniente da cultura, sendo responsável por 50 % do açúcar comercializado no mundo (CONAB, 2017). Ainda segundo dados da CONAB (2017), o setor sucroalcooleiro representou, no ano de 2016, o terceiro lugar no valor dos produtos exportados pelo agronegócio brasileiro, com vendas de US\$ 11,34 bilhões, o que representou um aumento de 32,9% em relação aos US\$ 8,5 bilhões alcançados em 2015.

Segundo o primeiro levantamento da safra da CONAB (2017) referente a safra 2017/18, as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar são o Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil, representando 65,14%, 21,02% e 7,07% respectivamente, da produção nacional. O Estado de São Paulo destaca-se como o maior produtor nacional, com uma produção estimada em 352 milhões toneladas, o que representa 54,38 % da produção nacional. Esse valor é bem superior à produção total da região Nordeste, que é de 45 milhões toneladas (RUDORFF et al., 2010; CONAB, 2017).

A cana-de-açúcar possui metabolismo fotossintético C4, ou seja, é muito eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em até 100 mg de CO₂ fixado por dm² de área foliar por hora, chegando a acumular o dobro de biomassa de uma planta C3, como a soja (ALENCAR, 2012). Essa característica confere uma grande importância como cultura energética, para produção de etanol, principalmente depois da crise do petróleo.

Devido à sua eficiência na produção do etanol, a cana-de-açúcar é uma das alternativas viáveis para mitigar as emissões de gases causadores do efeito estufa devidas à queima dos combustíveis fósseis e, com isso, a cultura tem um papel ambiental muito importante (RUDORFF et al., 2010). Para cada unidade de energia fóssil consumida durante o processo produtivo, são geradas nove unidades de energia renovável na forma de etanol, e quando o etanol é utilizado em substituição à gasolina brasileira, o etanol reduz em aproximadamente 76 % todo o CO₂ emitido por um veículo que usa gasolina, considerando a mesma distância (EMBRAPA, 2009).

Os resíduos das usinas de beneficiamento da cana podem ser utilizados em benefício da própria indústria sucroalcooleira, como o bagaço, que é utilizado como fonte de energia para os processos da usina, e a vinhaça e a torta de filtro, que podem e devem ser utilizadas como fertilizante natural (SANTOS et al., 2010; ALMEIDA JÚNIOR et al., 2011; ZOLIN et al., 2011; SILVA; BONO; PEREIRA, 2014), proporcionando redução dos gastos com fertilizantes minerais. Além disso, as áreas cultivadas contribuem com a captura do CO₂ atmosférico para ser utilizado no crescimento da planta.

2.2. Ciclo global do carbono, compartimentos e estoques

A atmosfera é composta por vários gases, sendo os principais o nitrogênio (78 %) e o oxigênio (21 %); os demais gases juntos somam 1%, e constituem os chamados gases traços. Nessa parcela, estão os gases que têm em sua composição o carbono (C), sendo os principais o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), com 0,039 % e 0,0014 %, respectivamente, da composição da atmosfera (CORDEIRO et al., 2011).

Além de estar presente na atmosfera, o CO₂ pode ser capturado e armazenado em outros importantes compartimentos, ou sumidouros, que são os oceanos, o solo e a biota (IPCC, 2000). Segundo o Global Carbon Project (2010), o solo e oceanos são os principais sumidouros de CO₂, tendo removido da atmosfera cerca de 57 % (ou 5,3 Pg C por ano) de todo o CO₂ emitido a partir de atividades humanas entre os anos de 1958 a 2008. Durante este período, o tamanho dos sumidouros naturais cresceu, mas provavelmente a um ritmo mais lento do que as emissões, embora ocorra uma grande variabilidade de ano para ano (Global Carbon Project, 2010).

Estima-se que os estoques de C nos oceanos, solo, atmosfera e biota, sejam de aproximadamente 38.000, 1.500, 790 e 650 Pg de C, respectivamente. O solo é o segundo maior reservatório de C do mundo, ficando atrás somente dos oceanos (HORWATH, 2008). As quantidades de C estocadas no solo dependem diretamente dos teores e da qualidade da matéria orgânica adicionada, a da taxa de decomposição que é determinada pela interação entre o clima, atributos do solo e uso e manejo de suas terras. Em sistemas naturais, o clima e o solo são os principais determinantes dos balanços de C entre decomposição e produção; já em ambientes antropizados, o manejo do solo é o principal fator que interfere nesse balanço (FIDALGO et al., 2007).

Estima-se que a quantidade de C estocada no solo de todo o globo até um metro de profundidade esteja em torno de 1.576 Pg, distribuídos em uma área de 12,8 bilhões de hectares, dos quais, aproximadamente 506 Pg em solos dos trópicos (ESWARAN; BERG; REICH, 1993; BATJES, 2014). Ao se considerar apenas os primeiros 30 cm da superficiais do solo, esse estoque de C é de 800 Pg (CERRI et al., 2006), valor próximo ao armazenado na atmosfera. Estima-se que cerca da metade de todo o C estocado no solo – aproximadamente 787 Pg – esteja em solos de floresta (DIXON et al., 1994), já nas áreas sob pastagens o estoque gira em torno de 500 Pg (SCHARPENSEEL, 1997), e em áreas agrícolas, 170 Pg de C (PAUSTIAN et al., 2000).

No entanto, é difícil se ter um valor mais exato das quantidades de carbono total estocado nos solos em escala continental ou global, por conta de uma série de fatores como o conhecimento limitado da extensão de diferentes tipos de solo; a disponibilidade limitada de dados confiáveis, completos e uniformes para esses solos; a considerável variação espacial no teor de carbono, pedregosidade e densidade

aparente de solos que foram classificados de forma semelhante; e os efeitos do clima, material de origem, vegetação e uso do solo (BATJES, 2014).

A quantidade total de carbono presente na Terra é determinada pelo balanço entre a decomposição e a produção primária, sendo que, nesta, o carbono na forma de CO₂ é capturado pelas plantas e ele volta na forma CO₂ para a atmosfera como resultado da decomposição (SCHILESINGER, 1997). Por ano, a fotossíntese das plantas terrestres capta aproximadamente 120 Pg de C da atmosfera, em contrapartida, uma quantidade similar de carbono é liberada para a atmosfera, por meio da respiração dos ecossistemas. Os oceanos por sua vez, capturam algo em torno de 92 Pg C ano⁻¹ e liberam 90,6 Pg C ano⁻¹ através das trocas físico-químicas do CO₂ que ocorrem na superfície do mar e através da fotossíntese e respiração dos organismos marinhos (LUO; ZHOU, 2006).

As medições das concentrações de CO₂ na atmosfera foram iniciadas em 1975, em locais próximos ao vulcão Muana Loa (Havaí) e no Polo Sul, época em que a concentração do gás em questão era em torno de 270 ppm (MARTINELLI et al., 2009; NOAA, 2016). Recentemente, em março de 2015, o National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) divulgou valores referentes à concentração de CO₂ na atmosfera em escala global, que atingiu a impressionante marca de 400 ppm, valor alcançado pela primeira vez desde as primeiras medições. Valores altos de CO₂ estão associados às atividades antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento de florestas e atividades agrícolas, entre outras.

O efeito estufa é uma propriedade natural da atmosfera terrestre composta por uma camada de gases. Através desta camada, a energia solar de comprimento de onda muito curta ultrapassa a atmosfera terrestre sem que haja a interação com os gases que a compõem. Essa energia, ao atingir a superfície terrestre é refletida para a atmosfera com um comprimento de onda mais longo (radiação infravermelha) que interage parcialmente com os gases do efeito estufa naquela camada. Uma parte dessa irradiação volta para espaço e a outra é absorvida na atmosfera, tendo como consequência o aumento da temperatura do ar. Este processo é o que permite que a temperatura média da Terra seja em torno de 15° C e, sem ele, a temperatura média do planeta seria em torno de -18° C (CERRI; CERRI, 2007; SILVA; PAULA, 2009).

Com as ações antrópicas, tem se verificado uma crescente elevação das emissões e concentrações dos gases de efeito estufa na atmosfera. Isso é evidenciado logo após a primeira revolução industrial, no início do século XIX, e trouxe como consequência maior interação com a radiação infravermelha refletida pela Terra e consequente aumento da temperatura do ar. Esse aumento é denominado de aquecimento global, que provoca mudanças climáticas, tais como distribuição irregular das chuvas, aumento ou diminuição de temperaturas da atmosfera, elevação do nível do mar, entre outros (CERRI; CERRI, 2007).

Segundo o IPCC (2014), as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa desde a era pré-industrial têm provocado grandes aumentos nas concentrações atmosféricas de CO₂, CH₄ e N₂O. Entre 1750 e 2011, as emissões de CO₂ antropogênicas acumuladas para a atmosfera foram 2.040 ± 310 Gt CO₂. Cerca de 40% dessas emissões permaneceram na atmosfera (880 ± 35 Gt CO₂); o resto foi removido e armazenado em terra (em plantas e solos) e no oceano. O oceano capturou cerca de 30% do CO₂ antropogênico emitido, causando a acidificação do oceano. Cerca de metade das emissões de CO₂ antropogênicas entre 1750 e 2011 ocorreram nos últimos 40 anos.

Segundo Cerri e Cerri (2007), as emissões dos gases causadores do efeito estufa no Brasil são diferentes das do restante do mundo. Cerca de 75% de todo o CO₂ emitido no país são oriundos de práticas agrícolas, como revolvimento do solo e desmatamento, e os outros 25% são oriundos da queima de combustíveis fósseis.

É provável que mais da metade do aumento observado na temperatura média global da superfície terrestre nos anos de 1951 a 2010 tenha sido causada pelo aumento antropogênico das concentrações de gases de efeito estufa e outras forças antropogênicas em conjunto. As influências antropogênicas provavelmente afetaram o ciclo global da água desde 1960 e contribuíram para o recuo das geleiras desde a década de 1960 e para o aumento da fusão superficial da camada de gelo da Groelândia desde 1993. Estima-se que até 2100 grande parte desse gelo tenha derretido resultando no aumento do nível do mar de 3 a 4 m (OVERPECK et al., 2006). Estas ações ainda contribuíram para a perda de gelo do mar do Ártico desde 1979 e provavelmente para o aumento da temperatura dos oceanos e para o aumento médio global do nível do mar observado desde a década de 1970. Essas várias alterações

têm como resultado eventos extremos da natureza, como ondas de calor, secas, inundações, ciclones e incêndios florestais, revelando assim, a vulnerabilidade dos ecossistemas (IPCC, 2014).

Nas culturas agrícolas, os efeitos das mudanças climáticas podem ser favoráveis (maiores produtividades, redução dos ciclos das culturas) (SICHER; BUNCE, 1999; SCHAPENDONK et al., 2000) ou desfavoráveis (menor produtividade, aumento do ciclo da cultura, maior incidência de pragas) (FAGUNDES et al., 2010), dependendo da região e da espécie cultivada, sendo a precipitação, temperatura e concentração de CO₂ os principais fatores responsáveis por estes resultados. Estudos sobre os efeitos da chamada “fertilização de CO₂” mostram que poderá ocorrer aumento na produção primária líquida da maioria das culturas, isso como resultado da redução fisiológica das culturas (BAZZAZ; FAJER, 1992), o que resultaria em uma maior incorporação de CO₂ no solo pelos sistemas radiculares (GOUDRIAAN; UNSWORTH, 1990; SOMBROEK; NACHTERGAELE; HEBEL, 1993).

Sales et al. (2015) realizando análises de projeções para a precipitação e temperatura para a região nordeste do Brasil, concluíram que poderá ocorrer redução em médio e longo prazo da precipitação pluviométrica no inverno e primavera austral, aumento de precipitação nos meses de verão e aumento da temperatura durante o século XXI, principalmente nas regiões mais afastadas da costa nordestina.

2.3. Dinâmica do carbono no solo

Diversos são os fatores que afetam o armazenamento do carbono no solo. Quando a alteração do carbono no solo leva um grande período de tempo, os fatores responsáveis por essa mudança são principalmente os climáticos, geológicos e formadores do solo (ADAMS et al., 1990), já quando essa alteração se faz em um curto período de tempo, os fatores relacionados são a alteração de vegetação ou sucessão e as mudanças no uso da terra (BATJES, 2014).

A conversão de sistemas naturais de florestas em sistemas agrícolas provoca alterações na fertilidade do solo, na estrutura do solo e na matéria orgânica do solo (MOS) (KREMEN; MILES, 2012). Diversos estudos mostram diminuição progressiva nas concentrações da fração húmica do solo quando ocorre a substituição de um

sistema natural por um agrícola. Essas alterações geralmente estão relacionadas ao manejo convencional do solo que expõem a MOS a ação de micro-organismos decompositores (SIX; JASTROW, 2006; BENITES et al., 2010; SLEUTEL et al., 2010). Por outro lado, há trabalhos que mostram que o conteúdo de carbono orgânico do solo aumenta com a remoção da mata em substituição por culturas agrícolas, principalmente pastagens (SALTON et al., 2011; LEITE et al., 2013; CAMPOS et al., 2016).

Fidalgo et al. (2007), avaliando dados de 1764 perfis de solo dos diferentes biomas brasileiros, com diferentes usos, disponível pelo sistema SIGSOLOS da Embrapa, estimaram que o estoque de carbono dos solos brasileiros é de aproximadamente 32,32 Pg de C. Ainda segundo esses autores, avaliando dados de 248 perfis de diferentes tipos de solos do bioma Caatinga, os estoques de C em áreas antropizadas desse bioma é de 3,14 kg m⁻² e em áreas nativas o estoque é de 3,92 kg m⁻², ficando claro que houve uma redução no estoque ao se alterar o uso do solo.

Souza, Prezotti e Martins (2012) contabilizando o estoque de carbono de diversas unidades de solos, em uma área experimental de 10 anos com agricultura orgânica no estado do Espírito Santo, observou acréscimo de carbono no sistema, que se elevou de 34,57 t ha⁻¹ para 58,19 t ha⁻¹, esse carbono adicionado correspondendo a 86,62 t ha⁻¹ de CO₂. Já Müller, Weber e Scaramuzza (2012), avaliando a entrada de carbono em um Argissolo no nordeste de Brasil sob diferentes sistemas (floresta, agrosilvopastoril, agrofloresta com 5 e 8 anos de uso e pastagem) de uso da terra, observaram que a área sem a ação antrópica (floresta) foi a que apresentou maior quantidade de carbono orgânico total, e a pastagem foi a que apresentou menor quantidade.

A MOS apresenta grande influência sobre as propriedades químicas, físicas e biológicas, em especial nos solos tropicais e, por isso, ela é considerada como um componente essencial para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (BRAIDA et al., 2011). Durante o processo de decomposição de resíduos de vegetais e animais pode haver acúmulo de MOS, como parte do ciclo global do carbono (ALVES et al., 2005).

A quantidade de carbono orgânico diminui de acordo com a profundidade do solo e com a substituição de floresta por cultivos com gramíneas ocorre uma diminuição gradativa ao longo dos anos de cultivo dos teores de carbono proveniente

da mata em substituição ao C derivado da gramínea (GATTO et al., 2010; MENDONÇA et al., 2010; COSTA JUNIOR et al., 2011a). Entretanto, o manejo adequado dessas áreas pode possibilitar a manutenção dos teores de carbono e a melhoria da característica física dos agregados do solo, devido ao sistema radicular agressivo e denso das gramíneas, principalmente em superfície (CHIODEROLI et al., 2012; BARBOSA; LIMA, 2013).

2.4. Técnicas isotópicas no estudo da mudança do uso da terra

O C ocorre na natureza em três formas isotópicas, sendo duas estáveis, que são o ^{12}C (mais leve) e o ^{13}C (mais pesado), correspondentes a 98,89 % e 1,11 % do C da atmosfera, e uma, o ^{14}C , que é radiativa, com concentração $< 10^{-10}$ %. Como este tem meia vida bastante grande, de 5730 anos, é utilizado como importante meio para a datação da existência de organismos durante a história. A utilização do isótopo ^{13}C é um bom indicador do tipo de vegetação existente ou que tenha ocorrido em uma determinada área, pelo fato da quantidade de $\delta^{13}\text{C}$ (delta ^{13}C) presente nos resíduos vegetais ser diferente de acordo com o ciclo fotossintético de cada espécie (MARTINELLI et al., 2009).

Os métodos isotópicos mais utilizados para o estudo da dinâmica do carbono orgânico no solo são basicamente dois: a marcação artificial (nesse método realiza-se artificialmente o enriquecimento ou o empobrecimento de átomos de ^{13}C ou ^{14}C) e o método da variação da abundância natural. No método da variação da abundância natural, nenhum elemento é artificialmente marcado, e o princípio deste método baseia-se nas diferenças das quantidades de cada isótopo que ocorrem naturalmente a partir do fracionamento que ele sofre durante os processos físicos, químicos e biológicos da natureza (ANDREUX et al., 1990), sendo que o principal processo é a fotossíntese. Esse método caracteriza-se por ser mais barato e simples, quando comparado ao método da marcação artificial (ALVES et al., 2005).

A realização das análises da composição isotópica de C dá-se a partir da medição da relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ das amostras em relação (expressa em termos de diferença de $\delta^{13}\text{C}$ em relação ao padrão) ao padrão internacional, que é uma rocha calcária encontrada em uma formação geológica denominada Pee Dee, presente na

Carolina do Norte, nos Estados Unidos da América, cuja abreviação é PDB (Pee Dee Belemnite). O PDB tem uma relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (R) de 0,01124, e como as variações dos valores são muito pequenos, elas são expressas em partes permil, ‰ (ALVES et al., 2005).

O uso da técnica da abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ possibilita o conhecimento da origem da vegetação que compõe o estoque do carbono orgânico do solo, desde que estas apresentem ciclos fotossintéticos diferentes (C3 ou C4). Quando um determinado ecossistema sofre alteração no tipo de composição vegetativa de plantas C4 para C3, ou vice-versa, o valor do $\delta^{13}\text{C}$ da composição das plantas, da respiração das raízes e da rizosfera é diferente da composição da matéria orgânica antiga do solo (LUO; ZHOU, 2006; MILLARD et al., 2008; PATERSON; MIDWOOD; MILLARD, 2009)

Pessenda et al. (2005), buscando a reconstrução paleoambiental do holoceno no nordeste do Brasil, mostraram que o uso dos isótopos de carbono são bons indicadores para o conhecimento da composição da vegetação há milhares de anos atrás e a sua mudança ao longo do tempo, deixando evidentes as mudanças climáticas sofridas na região e a resposta da vegetação a essas mudanças.

Loss et al. (2014) avaliando a abundância natural do $\delta^{13}\text{C}$ no perfil do solo com diferentes sistemas de uso do solo com rotação de culturas nos sistemas integração lavoura pecuária (milho+braquiária/feijão/algodão/soja) e plantio direto (girassol/milheto/soja/milho) no cerrado goiano, constataram que a substituição da vegetação natural pelas culturas dos sistemas agrícolas provocou mudanças no sinal $\delta^{13}\text{C}$ após 17 anos de cultivo, comprovando o incremento do C das gramíneas cultivadas em substituição ao derivado da mata.

Diversos são os processos que ocorrem no solo que promovem discriminação de um isótopo em detrimento de outro, podendo-se destacar a respiração das raízes, a rizodeposição, a absorção de compostos das plantas pelos micro-organismos, respiração microbiana, humificação ou estabilização dos compostos orgânicos e outros processos que são indiretamente relevantes, como o transporte de fotoassimilados da parte aérea das plantas para suas raízes (WERTH; KUZIAKOV, 2010).

2.5. O sistema fotossintético e a eficiência na utilização do dióxido de carbono (CO₂) pelas plantas

A fotossíntese é o processo biológico mais importante da natureza. Nesse processo, os organismos utilizam a energia solar para sintetizar os seus carboidratos a partir da água e do CO₂ da atmosfera, ocorrendo a liberação de oxigênio (O₂) como subproduto da reação. Os ciclos fotossintéticos das plantas podem ser C3 (o primeiro produto é um carboidrato contendo 3 carbonos, 3-fosfoglicerato), C4 (tem como produto um carboidrato contendo 4 carbonos, oxalacetato) ou o Metabolismo Ácido das Crassuláceas - CAM ou MAC no qual a forma de captação de CO₂ é semelhante à do metabolismo C4, no entanto, difere temporalmente (TAIZ; ZEIGER, 2006).

As plantas que apresentam o ciclo fotossintético C3 fixam o CO₂ atmosférico através da enzima RUBISCO (ribulose bifosfato carboxilase/oxigenase), enquanto as plantas do ciclo C4 contam com o processo enzimático de fixação do CO₂ da enzima PEP carboxilase (fosfoenolpiruvato carboxilase) (TAIZ; ZEIGER, 2006). A PEP carboxilase tem maior afinidade pelo CO₂, que a RUBISCO, resultando em maior discriminação desta em relação ao ¹³C que ao ¹²C. Com isso, as plantas que têm o ciclo C3 são mais deficientes em ¹³C do que as plantas do ciclo C4. Já as plantas CAM (ou MAC) apresentam valores de δ¹³C intermediários, entre as dos outros dois ciclos (MARTINELLI et al., 2009).

As plantas com o ciclo fotossintético C3 têm valores de δ¹³C tipicamente variando entre -24 ‰ e -38 ‰, já as plantas do ciclo C4 os valores variam entre -11 ‰ e -15 ‰, evidenciando a discriminação isotópica, durante a fotossíntese, dos átomos de ¹³C pelas plantas do tipo C3 em relação às plantas do tipo C4 (MARTINELLI et al., 2009).

2.6 O nitrogênio do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é a principal responsável pelo estoque de N no solo e os ciclos de C e N são estreitamente relacionados (FREITAS et al. 2015). Embora não possa ser considerado um bom traçador dos processos envolvidos na

ciclagem do N, os sinais de ^{15}N do solo e da vegetação têm se revelado uma ferramenta muito útil para compreender a dinâmica do N, funcionando como integralizadores de todos os processos biogeoquímicos atuantes nos ecossistemas (ROBINSON, 2001). A maior parte dos processos que resultam na perda de N dos solos (nitrificação, volatilização de amônia e desnitrificação) discriminam contra o ^{15}N , levando o enriquecimento isotópico do ecossistema (HANDLEY; SCRIMGEOUR, 1997). Embora esse conceito seja mais aplicado a ecossistemas nativos (florestas primárias) do que a sistemas com cultivos, nos quais as entradas de N são maiores e os processos de ciclagem de N são bastante impactados, resultados apontam que a intensidade do manejo resulta em maiores valores de ^{15}N nos solos (STEVENSON et al., 2010). Dessa forma, medidas do $\delta^{15}\text{N}$, associadas a medidas do $\delta^{13}\text{C}$, contribuem para a compreensão da dinâmica da vegetação na mudança do uso da terra (MENDONÇA et al., 2010).

Os isótopos de N mais utilizados em estudos ambientais são o ^{14}N e ^{15}N . As técnicas isotópicas empregadas também são a marcação artificial e a abundância natural. A caracterização isotópica do N da atmosfera é tida como referência para o estudo da dinâmica do nitrogênio, apresentando a seguinte composição isotópica: 99,6337% de átomos de ^{14}N e 0,3663% de átomos de ^{15}N (JUNK; SVEC, 1958). Devido as pequenas discriminações sofridas pelo isótopo mais pesado durante os processos que o N sofre no sistema solo-planta (mineralização, imobilização, nitrificação e desnitrificação) é possível se observar pequenas variações nas concentrações dos isótopos, tornando o ^{15}N mais enriquecido no solo e nas plantas do que na atmosfera (SHEARER; KOHL; CHIEN, 1978; MARIOTTI et al., 1982).

Durante a fixação biológica de nitrogênio (FBN), as bactérias realizam a quebra do N_2 atmosférico e o disponibilizam para as plantas na forma absorvível. Isso acontece sem a necessidade de gasto de grandes quantidades de energia e pressão, ao contrário do que ocorre durante a fixação industrial ou espontânea. Ao fazer uso do N_2 atmosférico pelas bactérias, os compostos nitrogenados fixados passam a ter uma característica similar à fonte isotópica, e associada a discriminação do isótopo ^{15}N durante a fixação, torna esses compostos cada vez mais empobrecidos desse átomo. As plantas que fazem uso do N proveniente da FBN também tornam-se mais empobrecidas do átomo de ^{15}N , diferentemente do que ocorre com àquelas que fazem uso do N disponível no solo (ALVES et al., 2005).

2.7. O Bioma Caatinga

A Caatinga é um bioma situado no Semiárido do nordeste e parte do sudeste brasileiro. Sua área é de aproximadamente 900.000 km² e está presente em nove estados: Piauí, Pernambuco, Bahia, Ceará, Paraíba, Alagoas, Rio Grande do Norte, Sergipe e Minas Gerais. O nome caatinga é de origem Tupi-Guarani e significa “mata branca”, isso por conta da característica da sua vegetação que, durante a estação seca, perde as folhas, permanecendo na paisagem apenas os troncos esbranquiçados das árvores e arbustos (EMBRAPA, 2007; LOPES et al., 2016).

Segundo Andrade-Lima (1981), a caatinga pode ser classificada em sete tipos de comunidades baseadas no tipo de vegetação, fisionomia, localidade e substrato: Floresta de caatinga alta; Floresta de caatinga média; Floresta de caatinga baixa; Caatinga arbustiva alta a baixa; Caatinga arbustiva aberta baixa; Floresta ciliar e Floresta de caatinga média.

O clima dessa região tem características específicas, com temperaturas médias anuais acima de 20 °C, mas que podem chegar a 40 °C, precipitações entre 280 mm e 800 mm por ano, com chuvas concentradas durante poucos meses do ano, e evapotranspiração em torno de 2000 mm, valor bem superior à precipitação, causando assim um déficit hídrico (ARAÚJO, 2011). A vegetação da Caatinga pode ser caracterizada como floresta arbórea e arbustiva, com predomínio de árvores e arbustos baixos, muitos dos quais apresentam espinhos, microfilia e algumas características xerofíticas (LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003).

O cultivo de cana-de-açúcar no Semiárido ainda é pouco expressivo frente a produção nacional, devido principalmente as condições de aridez. Cultivos de pequena escala são encontrados em diversos municípios da região. Em Pernambuco, por exemplo, de acordo com o banco de dados do IBGE (2010), existem 16 municípios no Sertão e 18 municípios no Agreste que produzem cana, com utilização de irrigação ou com produtividades bastante limitadas quando em condições de sequeiro. Entretanto, fatores como a alta disponibilidade luminosa, estabilidade climática e baixa incidência de problemas fitossanitários são condições que favorecem o cultivo da cana na região.

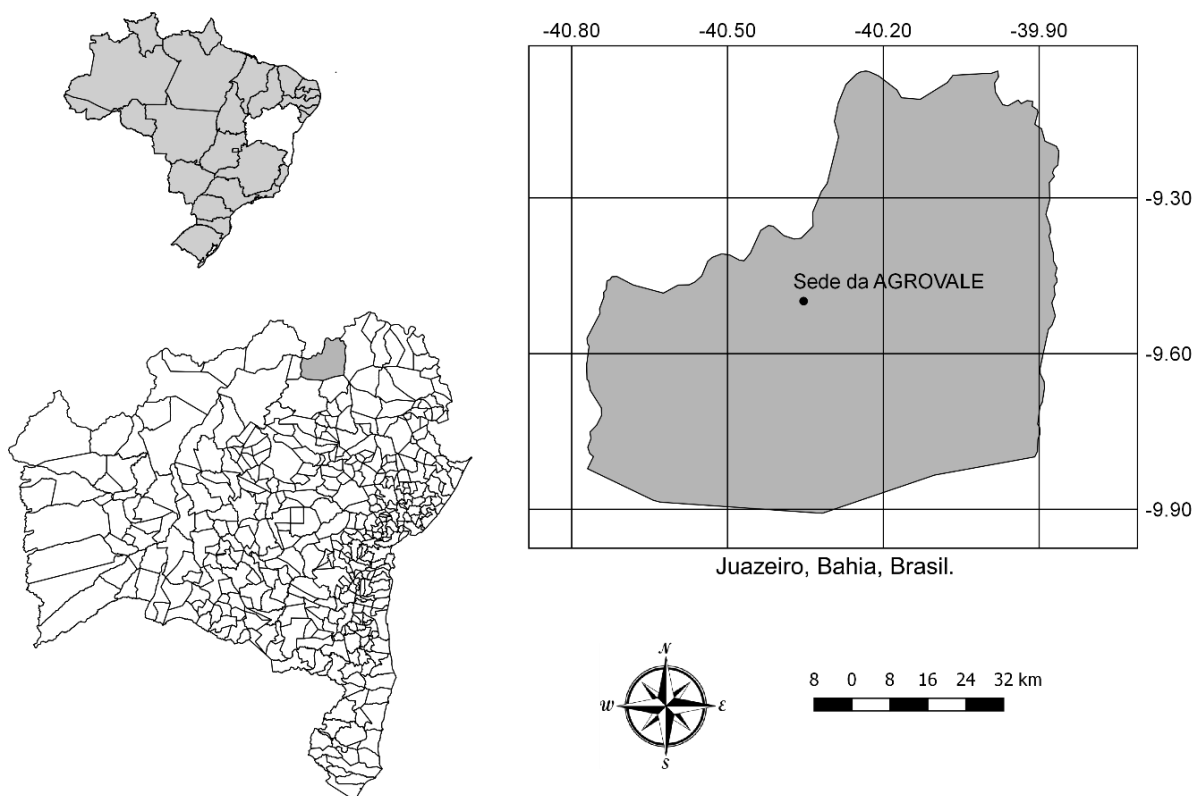
No Submédio do Vale do São Francisco, especificamente no município de Juazeiro, BA, a cana-de-açúcar tem apresentado desempenho relevante em relação a outras áreas de cultivo no país, em decorrência da utilização de tecnologias de irrigação no sistema de produção. Nesta região existem em torno de 18 mil hectares de cana-de-açúcar irrigada com produtividade média igual a 92 t ha^{-1} , superior ao rendimento médio estadual ($78,99 \text{ t ha}^{-1}$), nacional ($73,27 \text{ t ha}^{-1}$) e da principal região produtora (Sudeste) da cultura no país, que foi de $77,07 \text{ t ha}^{-1}$ (CONAB, 2017).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e caracterização da área

O estudo foi conduzido na Agroindústria do Vale do São Francisco (AGROVALE), situada na região do Sub-Médio São Francisco, município de Juazeiro, Sertão da Bahia, Nordeste do Brasil ($9^{\circ}25' S$ e $39^{\circ}39'W$) (Figura 1). A Agrovale é uma empresa produtora de açúcar, etanol e bioenergia, cuja fundação aconteceu em 19/09/1972 e teve sua primeira safra em 1980. Para instalação das áreas cultivadas, grande parte da vegetação nativa foi substituída pela cana-de-açúcar, em diferentes épocas.

Figura 1. Localização da Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (AGROVALE), em Juazeiro, Bahia, Brasil



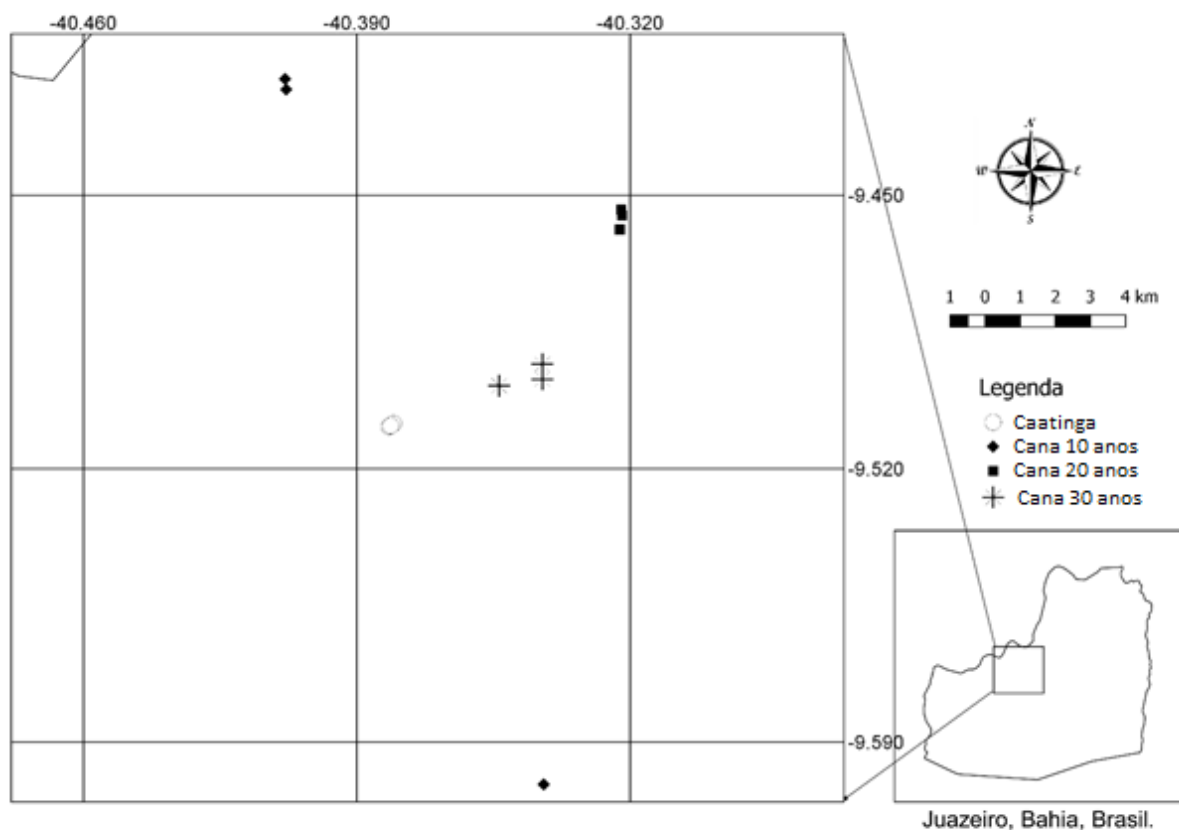
A vegetação nativa da região é caracterizada como Caatinga arbustiva aberta baixa (ANDRADE-LIMA, 1981). O clima é semiárido quente (BSwh), com temperatura

média superior a 18 °C, com chuvas de verão e período seco bem definido de inverno (KÖPPEN), precipitação média de 400 mm e média de evapotranspiração anual de 2000 mm. A altitude em relação ao nível do mar fica em torno de 370 m. Os solos da área são classificados como Vertissolos, Cambissolos e Argissolos, sendo suas representatividades equivalentes a 57%, 35% e 8%, respectivamente.

Para a realização do presente trabalho, foram selecionadas áreas com solos classificados como Vertissolos, de características visualmente semelhantes, e com históricos de uso bem estabelecidos, definidas de acordo com consulta à equipe técnica da Usina e com base na data da remoção da vegetação nativa (corte raso) e implantação do canavial. Todas as áreas com cultivo de cana-de-açúcar são irrigadas sendo 63% por gravidade, 31% por gotejo subsuperficial e 6% por pivô central. Essas áreas compreenderam as seguintes situações: 1) vegetação nativa (caatinga) sem histórico de corte raso para instalação de cultivo, 2) remoção da vegetação nativa e implantação do cultivo de cana-de-açúcar há 10 anos; 3) remoção da vegetação nativa e implantação do cultivo de cana-de-açúcar há 20 anos e 4) remoção da vegetação nativa e implantação do cultivo de cana-de-açúcar há 30 anos.

Para cada uma das situações com cultivo de cana (10, 20 e 30 anos de substituição da vegetação nativa), foram escolhidas duas áreas espacialmente separadas, denominadas pela Usina como talhões, com o mesmo tempo de substituição da vegetação nativa. As áreas com 10 anos de cultivo são localizadas nos talhões denominados de Grécia e Caetés, as com 20 anos, nos talhões denominados de Petrolândia e Gravatá e os talhões com 30 anos são denominados de João Pessoa e Juazeiro. Esses talhões, que apresentam cultivos anuais e sucessivos de cana desde a remoção da caatinga nas diferentes épocas, tem áreas que variam entre 50 e 98 ha e estão distanciados entre si entre 0,16 e 21 km (Figura 2). Foi possível selecionar apenas uma área de vegetação nativa em que não houve ação antrópica, distante aproximadamente 3,8 km do talhão mais próximo (João Pessoa).

Figura 2. Pontos das coletas das amostras nas áreas com diferentes tempos de cultivos na Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (AGROVALE), em Juazeiro, Bahia, Brasil



O manejo do solo nas áreas cultivadas (aração e gradagem) é realizado sempre que se faz a renovação do canavial e não se aplica vinhaça ou torta de filtro. A irrigação é suspensa 30 dias antes do corte da cana, que é colhida após ser queimada. As principais variedades utilizadas são a VAT 90-212, RB 92-579, RB 96-1003, RB 01-2046 e SP79-1011. As produtividades anuais em cada área estão na Tabela 1.

Tabela 1. Produtividade de colmos da cana-de-açúcar em áreas com diferentes tempos de cultivo na Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (AGROVALE), em Juazeiro, Bahia, Brasil

Safrano/ano	Talhões/tempo de cultivo					
	Caetés	Grécia	Petrolândia	Gravatá	João Pessoa	Juazeiro
	----- 10 anos ----		----- 20 anos -----		----- 30 anos -----	
t ha ⁻¹						
1981	-	-	-	-	-	111,67
1982	-	-	-	-	-	91,38
1983	-	-	-	-	105,77	57,51
1984	-	-	-	-	132,88	107,47
1985	-	-	-	-	91,00	110,00
1986	-	-	-	-	67,42	76,48
1987	-	-	-	-	112,00	64,00
1988	-	-	-	-	96,00	-
1989	-	-	-	-	98,00	98,00
1990	-	-	-	-	70,00	72,00
1991	-	-	-	-	88,00	90,00
1992	-	-	-	-	80,00	80,00
1993	-	-	-	-	66,00	73,00
1994	-	-	-	-	65,00	130,00
1995	-	-	-	-	97,00	112,00
1996	-	-	-	-	83,00	106,00
1997	-	-	141,00	127,00	71,00	95,00
1998	-	-	117,00	92,00	87,00	100,00
1999	-	-	103,00	91,00	85,00	92,00
2000	-	-	93,00	84,00	71,00	80,00
2001	-	-	78,00	70,00	78,00	87,00
2002	-	-	80,00	76,00	92,00	89,00
2003	-	-	82,00	83,00	114,00	111,00
2004	-	-	124,00	96,00	89,00	83,00
2005	-	-	124,00	77,00	92,00	88,00
2006	182,00	142,00	112,00	87,00	83,00	88,00
2007	123,00	87,00	101,00	64,00	79,00	76,00
2008	99,39	80,04	79,40	-	67,43	70,35
2009	79,76	68,60	79,62	129,18	105,83	111,82
2010	74,98	102,49	75,10	68,31	72,93	84,73
2011	73,92	90,82	58,97	65,71	68,93	86,47
2012	66,98	67,62	55,39	-	55,74	67,56
2013	99,25	60,41	124,64	100,46	-	65,74
2014	88,48	-	89,31	96,90	118,94	106,80
2015	86,15	137,25	93,07	180,26	89,30	102,47
2016	-	101,55	-	-	-	-
Média	97,39	93,77	95,28	93,40	86,63	90,13

Os números em negrito representam a renovação do canavial naquele ano, sempre sendo instalada uma variedade de cana diferente da anterior.

3.2. Amostragem e análises do solo e da planta

O solo foi amostrado em agosto de 2016. Para cada histórico de uso (caatinga ou os diferentes tempos de cultivo da cana-de-açúcar) foram abertas três trincheiras (1,0 m x 1,2 m x 1,5 m), até 100 cm de profundidade ou até a camada de impedimento (rocha). Nas áreas com cultivos, duas trincheiras foram alocadas em um mesmo talhão (Caetés, Petrolândia e Juazeiro) e a terceira trincheira no outro talhão (Grécia, Gravatá e João Pessoa) com o mesmo tempo de cultivo. Nos talhões em que foram abertas duas trincheiras, elas foram alocadas em distâncias que variaram entre 302 e 560 m, de acordo com as condições encontradas em cada talhão. Por se tratar de um Vertissolo irrigado, foi necessário selecionar pontos com de umidade no solo, para possibilitar a abertura da trincheira e a extração e manutenção das amostras indeformadas. Todas as trincheiras foram abertas a partir de 10 m de distância da primeira linha de cultivo, para se evitar o efeito de borda. Todas as trincheiras sob vegetação nativa foram abertas dentro do mesmo remanescente de caatinga, único disponível nas proximidades com o mesmo tipo de solo e com ausência de interferência antrópica, em pontos escolhidos de maneira aleatória, a mais de 10 m da borda do fragmento e com distâncias de 52,6 a 91,8 m entre elas.

Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Nas áreas de cana foi possível chegar à profundidade previamente determinada em todas as trincheiras, já nas áreas de caatinga apenas em uma das trincheiras foi possível se chegar a 100 cm de profundidade, para as outras duas só foi possível se chegar a 60 cm, por haver impedimento mecânico devido à presença de rocha. Nas áreas de cana, as amostras foram coletadas sempre a 10 cm da linha de plantio. Em cada camada de cada trincheira foram coletadas amostras indeformadas (torrões), para a determinação da densidade do solo (D_s), e amostras deformadas, para a realização da caracterização química, granulométrica e análises isotópicas.

Com auxílio de um canivete, foram coletados 3 torrões por camada de cada trincheira, para se obter uma média. Esta ação foi adotada para se reduzir um possível erro na determinação da densidade do solo devido a algum tipo de compactação, seja na coleta, manuseio e/ou transporte, por ser um solo muito plástico e devido às condições das áreas amostradas, que estavam muito úmidas. Uma vez coletado, cada torrão foi envolvido com papel filme, identificado e envolvido com uma grossa camada

de papel bolha. Aqueles que apresentaram maior plasticidade devido ao elevado teor de umidade foram deixados expostos ao ar por 24 horas para secar parcialmente, e só em seguida foi realizado o processo de embalagem anteriormente descrito. Uma vez embaladas, as amostras foram dispostas em 3 camadas dentro de caixas plásticas e, entre estas camadas, foram colocadas diversas camadas de papel bolha, a fim de proporcionar a manutenção da estrutura dos torrões durante o transporte, até a chegada ao laboratório.

Em laboratório, os torrões foram desembalados e expostos ao ar para aclimatização com o ambiente. A densidade do solo foi determinada pelo Método do Torrão Parafinado de acordo com a metodologia recomendada pela Embrapa (2011). As amostras deformadas foram postas para secar ao ar, destorroadas e passadas por uma peneira de 2 mm de abertura para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), sendo, em seguida, pesadas e acondicionadas em recipientes plásticos devidamente identificados. A fração maior que 2 mm de cada amostra também foi pesada e guardada. A análise granulométrica foi determinada pelo método do densímetro de acordo com Almeida et al. (2012), sendo utilizado como dispersante das argilas 50 mL da solução de hexametáfosfato de sódio 1 mol L^{-1} tamponado com carbonato de sódio (calgon). Foram determinados o pH em água (1:2,5) e a condutividade elétrica do extrato da pasta saturada, de acordo com a metodologia da Embrapa (2011). Os cátions trocáveis foram extraídos com acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7,0. Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados por espectrometria de absorção atômica, K^{+} e Na^{+} por fotometria de emissão de chama, sendo todos expressos em mmolc kg^{-1} (THOMAS, 1982). Como o pH das amostras analisadas era superior a 5,5, não fez necessário se determinar Al^{3+} . O P foi determinado pela metodologia de Olsen, sendo utilizado como extrator o bicarbonato de sódio $0,5 \text{ mol/L}$ a pH 8,5 (Olsen et al., 1954), sendo expresso em mg kg^{-1} . A soma $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ (acetato de cálcio, pH 7), foi determinada usando-se a metodologia da Embrapa (2011).

Subamostras do material peneirado a 2 mm foram moídas em almofariz até passar por peneira de 0,10 mm, para determinação dos teores totais de C e N (%), em analisador elementar, e das abundâncias naturais dos isótopos ^{13}C e ^{15}N , por espectrometria de massa. Por problemas operacionais, essas determinações foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis (LABISE) do Departamento de

Geologia da Universidade Federal de Pernambuco e também no Laboratório de Ecologia Isotópica (CENA-USP).

No LABISE, as amostras foram tratadas com HCl 1M, para retirada de possíveis depósitos de carbonatos, secas e pesadas em cápsulas de estanho em uma balança analítica Metler (precisão de 0,00001g). Em seguida, estas cápsulas foram introduzidas em analisador de combustão elemental (COSTECH) e queimadas a 1020 °C em colunas contendo CrO, e transferidas para outras colunas contendo Cu²⁺, a 650 °C, para liberação de CO₂ que foi então separado por cromatografia de troca iônica. A composição elemental e isotópica do gas CO₂ foram analisadas em um espectrômetro de massa Thermofinnigan Delta V Advantage.

No Laboratório de Ecologia Isotópica (CENA), as amostras não foram previamente tratadas com HCl. De maneira análoga, foram colocadas em cápsulas e inseridas em um espectrômetro de massa ThermoQuest-Finnigan Delta Plus (Finnigan-MAT; CA, USA) com interface com um Analisador Elemental (Carlo Erba model 1110; Milan, Italy) para obtenção das concentrações totais (%) e das razões isotópicas de N e C. As razões isotópicas foram determinadas em relação aos padrões internacionais reconhecidos. Materiais de referência (atropina, extrato de levedura e padrão de solo no. 502 – 308, LECO Corporation) foram incluídos em todas as corridas analíticas.

As abundâncias isotópicas foram expressas em unidades de “delta” (δ), que representa o desvio, permil (‰), em relação aos padrões, das razões entre as massas dos isótopos pesados e leves contidos na amostra:

$$\delta = \left(\frac{R_{amostra}}{R_{padr\tilde{a}o}} - 1 \right) \times 1000$$

Em que: R_{amostra} e R_{padrão} são as razões ¹⁵N:¹⁴N e ¹³C:¹²C da amostra, sendo o N₂ atmosférico o padrão de N e o Pee Dee Belemnite o padrão do C.

Análises isotópicas e elementares também foram feitas em amostras de parte aérea e raízes da cana-de-açúcar e de espécies florestais, bem como na serapilheira da mata. Esses materiais foram secos em estufa a 60°C, finamente moídos e

encaminhados para análises. A quantidade de serapilheira presente na superfície do solo sob mata foi determinada, coletando-se cinco repetições de 0,25 m².

3.3. Cálculo do estoque do carbono

A densidade do solo foi utilizada para calcular a massa de solo de cada camada avaliada e, em seguida, a quantidade de C em cada profundidade. As amostras deformadas foram pesadas e a fração maior que 2 mm também foi pesada para se determinar a sua proporção em relação a TFSA. Isso foi necessário para se determinar a quantidade de solo na camada para posterior ajuste dos cálculos dos estoques de C no solo.

Para a comparação do estoque de carbono no solo sob vegetação nativa e sob cultivo da cana-de-açúcar, foi necessário realizar um ajuste nas quantidades de solo até as profundidades avaliadas. Este processo se fez necessário para corrigir o efeito da compactação do solo causada pelo cultivo e tráfego de máquinas (ELLERT; BETTANY, 1995). Acredita-se que a compactação do solo é decorrente das operações mecânicas e mais acentuada nas camadas superficiais. Assim, o estoque de carbono foi calculado de acordo com a correção baseado em Carvalho et al. (2009):

$$EstC = \frac{Cs * Ds * \left(\frac{Dref}{Ds} * e\right)}{10}$$

Em que, EstC = estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg.ha⁻¹); Cs = teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g.kg⁻¹); Ds = densidade aparente do solo na profundidade amostrada (kg.dm⁻³); Dref = densidade do solo para profundidade amostrada na área de referência (kg.dm⁻³); e = espessura da camada considerada (cm).

3.4. Cálculo do carbono derivado da floresta e da cana-de-açúcar

Equações de balanço de massa foram utilizadas para calcular a contribuição de distintas fontes (C3 ou C4) para um compartimento ou fluxo de carbono misto

(BERNOUX et al., 1998). A partir destas equações, chega-se à equação de mistura estrita que foi utilizada, a qual relaciona a fração do C de uma fonte B de um determinado reservatório com δ :

$$f = \frac{(\delta T - \delta_{refA})}{(\delta_{vegB} - \delta_{refA})}$$

Em que, f é a fração do C da fonte B (no presente caso, a contribuição do C da cana-de-açúcar (C4) para a MOS); δT , composição isotópica deste reservatório (δ do solo sob cana); $\delta_{ref A}$, composição isotópica do carbono na área de referência (δ do solo sob caatinga); $\delta_{veg B}$, composição isotópica da vegetação B (δ da vegetação cana (parte aérea e raízes)).

A proporção do C derivado da Caatinga (C_{dc}) foi obtida pela equação:

$$C_{dc} = 1 - f$$

3.5. Cálculo do tempo de residência média do carbono

Com os dados de $\delta^{13}C$ foi calculado o tempo de residência média do carbono derivado da caatinga. A ciclagem de um elemento é geralmente quantificada como o seu tempo de residência média (TRM) ou sua meia-vida ($T_{1/2}$). O TRM de um elemento em um reservatório é definido como o tempo médio que o elemento reside no reservatório no estado de equilíbrio ou o tempo médio requerido para renovar completamente o conteúdo do reservatório no estado de equilíbrio (SIX; JASTROW, 2006). O TRM foi calculado para o C da área com 30 anos de cultivo. A equação que utilizada foi:

$$TRM = \frac{-t}{\ln \left(\frac{C_t}{C_0} \right)}$$

Em que: t é o tempo de conversão da área de caatinga para cana, ou seja, 30 anos; C_t , o conteúdo de carbono remanescente do original acumulado sob a caatinga (C_3) no solo sob cana com 30 anos; e C_0 , o conteúdo do carbono do solo sob caatinga.

3.6. Análises estatísticas

Em função das semelhanças entre as áreas amostradas, do ponto de vista de posição na paisagem, classe de solo e textura, o delineamento experimental foi considerado como inteiramente casualizado. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e a comparação das médias realizada pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, com o programa Sisvar. Análises de regressão foram feitas para avaliar o efeito do tempo de cultivo da cana sobre o C do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização física e química do solo

A densidade do solo (D_s) aumenta de acordo com o aumento da profundidade e foi similar nas mesmas profundidades dos diferentes tempos, não diferenciando estatisticamente (Tabela 2). Lyra, Ribeiro e Rodrigues (1995), ao realizarem a caracterização química e física de Vertissolos de áreas de três projetos de irrigação na região do Baixo Médio do São Francisco, também verificaram o aumento gradual da densidade de acordo com o aumento da profundidade. No entanto, os valores da D_s determinados por estes autores foram inferiores aos encontrados no presente estudo. Já Marques et al. (2014), ao caracterizar três tipos de Vertissolos da Ilha de Fernando de Noronha, obtiveram valores da D_s elevados para o Vertissolo Háplico sálico gleissólico, similares aos encontrados neste estudo, atribuindo esse valor à elevada dispersão das argilas naquele perfil.

Os teores de argila estão acima de 35%, evidenciando uma das características dos Vertissolos, que é apresentar no mínimo 30% dessa fração (DUDAL; ESWARAN, 1988). De acordo com o diagrama textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (FERREIRA, 2010), os solos das áreas com os tempos de 0 e 20 anos de cultivo são classificados como argilosos, já os dos tempos 10 e 30 são considerados como francos argilosos.

Tabela 2. Caracterização física, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil

Camadas cm	Ds g cm ⁻³	Areia ----- % -----	Silte	Argila
Caatinga				
0-10	1,77	20,67 b	18,88	60,45 a
10-20	1,82	28,67 bc	23,50	47,83
20-40	1,86	40,00	18,07	41,93
40-60	1,89	27,33	24,23	48,44
60-80	1,90	38,00	20,40	41,60
80-100	1,90	40,00	17,34	42,66
Cana 10 anos				
0-10	1,64	39,33 a	20,92	39,75 b
10-20	1,71	38,67 ab	20,74	40,59
20-40	1,87	42,00	20,67	37,33
40-60	1,88	42,67	19,95	37,39
60-80	1,92	43,33	21,15	35,52
80-100	1,93	43,33	18,09	38,58
Cana 20 anos				
0-10	1,81	28,00 ab	22,01	49,99 ab
10-20	1,93	26,67 c	21,39	51,95
20-40	1,87	33,33	25,00	41,67
40-60	1,92	38,00	23,19	38,81
60-80	1,93	38,00	27,19	34,81
80-100	1,94	36,67	23,27	40,06
Cana 30 anos				
0-10	1,73	42,67 a	22,07	35,26 b
10-20	1,77	40,67 a	21,44	37,89
20-40	1,91	40,00	20,56	39,44
40-60	1,93	42,00	20,29	37,71
60-80	1,98	37,33	26,47	36,20
80-100	1,92	44,00	18,47	37,53

Médias seguidas de mesmas letras, dentro de cada profundidade, não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os valores de pH são bastante elevados (Tabela 3), devido à formação desse solo sobre rocha calcária. Tais valores corroboram o estudo desenvolvido por Lima (2014) em um perfil de solo no município de Juazeiro, BA. Como os valores de pH foram elevados, suspeitou-se que esses solos fossem afetados por salinidade levando em consideração também as condições climáticas da região (baixas precipitações e

elevada evaporação). A condutividade elétrica (CE) do extrato da pasta saturada. Verificou-se que a área de mata de caatinga tem problema de salinidade em subsuperfície (abaixo de 40 cm de profundidade), com CE maior que $4,0 \text{ dS m}^{-1}$, o que não foi verificado nas camadas mais superficiais. Esse fato pode ter ocorrido por conta da camada de rocha abaixo de 60 cm de profundidade, que pode ter ocasionado acúmulo de sais pela lixiviação. Já nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar não foi observado problema de salinidade. Essa condição é atribuída à intensa irrigação a que as áreas são submetidas durante todo o ciclo da cultura, associada a abertura de canais de drenagem no perímetro dos talhões, que permitia que o excesso de água saia ao chegar na rocha em subsuperfície, possivelmente acarretando em lavagem desses sais no perfil.

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} também foram elevados e, assim como o pH, são justificados pelas condições de formação do solo. Não foi observada presença de Al^{3+} . Na maior parte das camadas o $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ foi zero, sendo que os valores diferentes estão relacionados ao H^{+} ligado covalentemente. Esse comportamento já era esperado, pois é o que ocorre em condições de solos alcalinos.

Todas as áreas de cana-de-açúcar tiveram baixos teores de K^{+} (Tabela 3). Esse elemento tem uma grande mobilidade no solo e, possivelmente, também foi perdido pelo processo de lixiviação. A intensidade desta movimentação depende de diversos fatores, dentre eles o tipo de solo, a textura (NEVES; ERNANI; SIMONETE, 2009), o regime hídrico, a solubilidade da fonte do elemento e a capacidade de troca catiônica (CTC) (ROSOLEM et al., 2006; DUARTE; PEREIRA; KORNDÖRFER, 2013). Os valores de P extraível foram muito baixos, o que pode ser atribuído à grande disponibilidade de Ca^{2+} associado ao pH elevado, que propicia a reação do P com o Ca^{2+} , formando compostos pouco solúveis (SAMPLE; SOPER; RACZ, 1980).

Tabela 3. Caracterização química do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil

Camadas	pH (água)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺ (pH 7)	P	CE
cm		----- mmolc kg ⁻¹ -----						mg kg ⁻¹	dS m ⁻¹
Caatinga									
0-10	7,81	130,57	16,16	0,96	2,83	0,00	0,01	1,47 b	0,46
10-20	8,01	153,11 ab	20,49 a	0,48	1,20	0,00	0,01	0,80 b	0,84
20-40	8,39	191,32	32,56	0,21	4,19	0,00	0,01	0,68	2,60
40-60	8,82	205,63	41,68	0,21	6,39 a	0,00	0,00	0,60	5,77 a
60-80	9,07	78,80	18,46	0,12	5,71	0,00	0,00	0,65	2,42
80-100	8,62	338,01	22,43	0,38	10,79	0,00	0,00	0,67	7,14
Cana 10 anos									
0-10	7,14	248,72	8,93	1,19	0,44	0,00	0,01	1,22 b	0,40
10-20	7,53	220,49 ab	7,61 b	0,49	0,52	0,00	0,01	0,78 b	0,44
20-40	8,37	278,51	7,13	0,28	0,81	0,00	0,01	0,49	0,29
40-60	7,89	272,25	7,05	0,22	1,22 b	0,00	0,01	0,52	0,34 b
60-80	8,10	243,43	7,40	0,23	2,09	0,00	0,01	0,83	0,45
80-100	8,19	246,22	7,12	0,23	2,93	0,00	0,00	0,71	0,59
Cana 20 anos									
0-10	7,11	120,91	14,35	0,45	0,80	0,00	0,01	11,29 a	0,67
10-20	7,13	91,61 b	13,3 ab	0,21	0,88	0,00	0,01	9,26 a	0,47
20-40	7,78	105,36	17,06	0,19	1,40	0,00	0,00	1,37	0,31
40-60	7,59	128,18	26,78	0,15	2,02 b	0,00	0,00	1,04	0,46 b
60-80	8,36	200,42	29,85	0,11	2,77	0,00	0,00	0,61	0,55
80-100	8,43	198,04	30,83	0,11	3,01	0,00	0,00	1,01	0,62
Cana 30 anos									
0-10	8,44	364,37	11,98	0,78	1,09	0,00	0,00	1,31 b	0,50
10-20	8,88	352,14 a	9,11 ab	0,52	0,75	0,00	0,00	1,85 b	0,36
20-40	8,75	354,17	20,76	0,35	0,84	0,00	0,00	0,75	0,38
40-60	8,72	325,35	18,11	0,21	1,09 b	0,00	0,00	0,55	0,76 ab
60-80	8,85	322,94	8,84	0,19	2,15	0,00	0,00	0,51	0,50
80-100	8,36	334,66	10,15	0,19	3,24	0,00	0,00	0,56	0,51

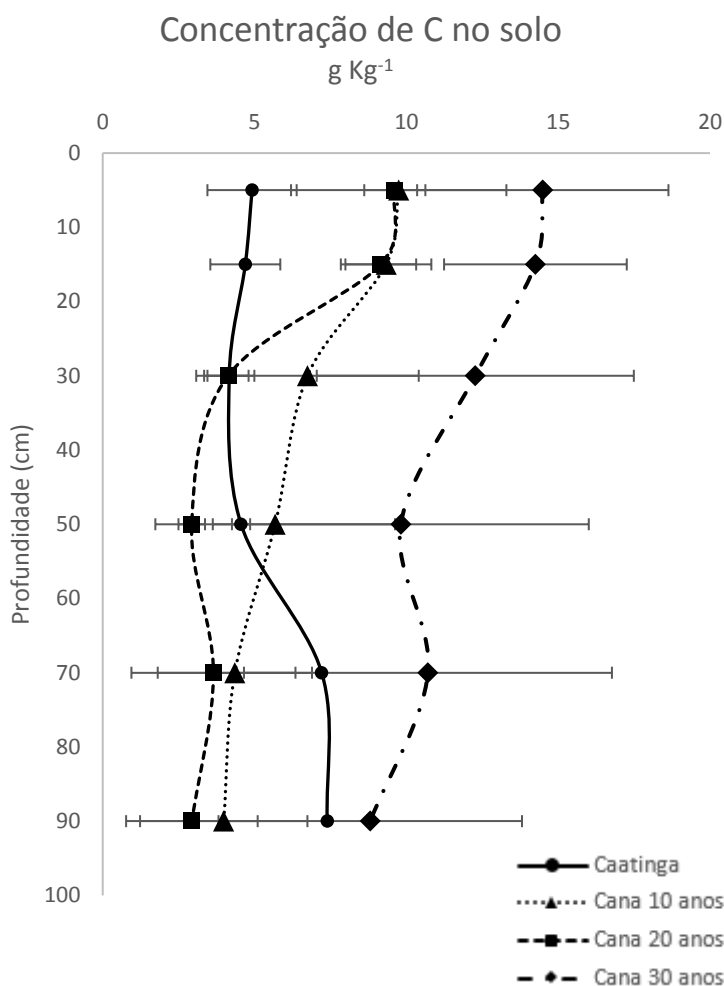
Médias seguidas de mesmas letras, dentro de cada profundidade, não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05).

4.2. Concentrações e estoque de C

O teor de C aumenta com a mudança da vegetação de caatinga para a cultura agrícola, principalmente em superfície (Figura 3). O maior período de cultivo (30 anos) resultou na maior concentração de C no solo, tanto em superfície quanto em subsuperfície. Tal resultado contrasta com o encontrado por diversos autores, que observaram redução significativa da concentração de C em solos submetidos a mudança de cobertura vegetal de mata para culturas agrícolas, atribuída às técnicas de manejo convencionais do solo que propiciam a degradação da matéria orgânica (DEL GALDO et al., 2003; JANTALIA et al., 2007; SLEUTEL et al., 2010; MELLO IVO, 2012).

Embora a cana-de-açúcar seja colhida queimada, os níveis de produtividade de colmo (Tabela 1) estão associados a grandes quantidades de biomassa subterrânea (raízes e caules). Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) estimaram a biomassa subterrânea da cana-de-açúcar em $6,5 \text{ Mg ha}^{-1}$. Já Albuquerque (2015) estimou que a quantidade dessa biomassa foi de $9,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, ressaltando que o acúmulo de biomassa radicular varia em relação ao ciclo da cultura, tipo de solo e as condições climáticas. Por outro lado, a produção anual de biomassa radicular em áreas de caatinga pode variar de $18,4$ a $33,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ (ALBUQUERQUE et al., 2015). Na região de Petrolina-PE Lima Júnior et al. (2014), estimam que a biomassa radicular seja de aproximadamente 30 Mg ha^{-1} de massa seca, com um estoque de C equivalente a 15 Mg ha^{-1} .

Figura 3. Concentrações de C do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil



De maneira geral, a mudança do uso da terra promoveu aumento nos estoques de C (Tabela 4) sendo os maiores valores encontrados nas camadas superficiais (0 – 40 cm). Isso é justificado pelo maior aporte de material orgânico ao solo cultivado, com a participação do expressivo sistema radicular da cana-de-açúcar que é mais desenvolvido logo nos primeiros 40 cm de solo, diminuindo assim a contribuição da cana no estoque de C em profundidade, tal fato também foi relatado por Costa et al. (2009), Araújo et al. (2011) e Campos et al. (2016).

Tabela 4. Estoques de C do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil

Canada cm	Caatinga	Cana 10 anos	Cana 20 anos	Cana 30 anos
Mg ha ⁻¹				
0 - 10	8,7 (±2,6) b	17,2 (±6,3) ab	17 (±1,8) ab	25,6 (±7,3) a
10 - 20	8,5 (±2,1) b	17 (±2,7) b	16,7 (2,1) b	25,9 (±5,5) a
20 - 40	15,5 (±3,1) b	25 (±13,6) ab	15,4 (±2,5) b	45,7 (±19,4) a
40 - 60	17,3 (±1,1)	21,5 (±15)	11,1 (±1,7)	37,2 (±23,5)
Subtotal	50	80,8	61,1	134,4
60 - 80	27,4	16,5	13,9	40,7
80 - 100	28,1	15,1	11,2	33,5
TOTAL	105,5	112,5	81,5	208,6

Médias, seguidas de mesmas letras, em cada intervalo de profundidade, não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O aumento gradual do estoque de C com o passar dos anos ocorreu logo nas primeiras camadas (0-10 e 10-20 cm), sendo os tempos 10 e 20 anos estatisticamente iguais e superiores à caatinga, para a mesma profundidade. Ainda segundo a tendência crescente de acúmulo de C no solo, o cultivo por 30 anos resultou nos maiores estoques, considerando as mesmas profundidades.

Nas camadas mais profundas (20-40 e 40-60 cm) houve um aumento no estoque de C já com 10 anos de cultivo em comparação a caatinga, porém, na cana 20 anos o estoque decresceu sem, no entanto, diferir estatisticamente dos outros tempos de cultivo. Após 30 anos o acúmulo de C nessa profundidade foi significativamente superior dos demais tempos.

As somas dos estoques de C evidenciam que o cultivo de cana-de-açúcar tem promovido incrementos consideráveis de C nas áreas de cultivo, chegando a ter um acréscimo de 84,4 Mg ha⁻¹ de C com o maior tempo de cultivo e considerando apenas até a profundidade de 60 cm, já que o solo da caatinga esteve limitado a essa profundidade (Tabela 4). Considerando até 1 m de profundidade, o acréscimo é de aproximadamente 100 Mg ha⁻¹. A quantidade de C estocada na camada de 0 – 60 cm foi de 134,4 Mg ha⁻¹, e quando considerado todo o perfil (0 – 100 cm) foi de 208,6 Mg

ha⁻¹ de C com 30 anos de cultivo. Diversos autores constataram que quando ocorre a substituição da mata por gramíneas, as quantidades do estoque de C no solo tendem a se manter semelhantes ou até mesmo superar os valores nas áreas de mata (COSTA et al., 2009; ARAÚJO et al., 2011; SALTON et al., 2011; CAMPOS et al., 2016).

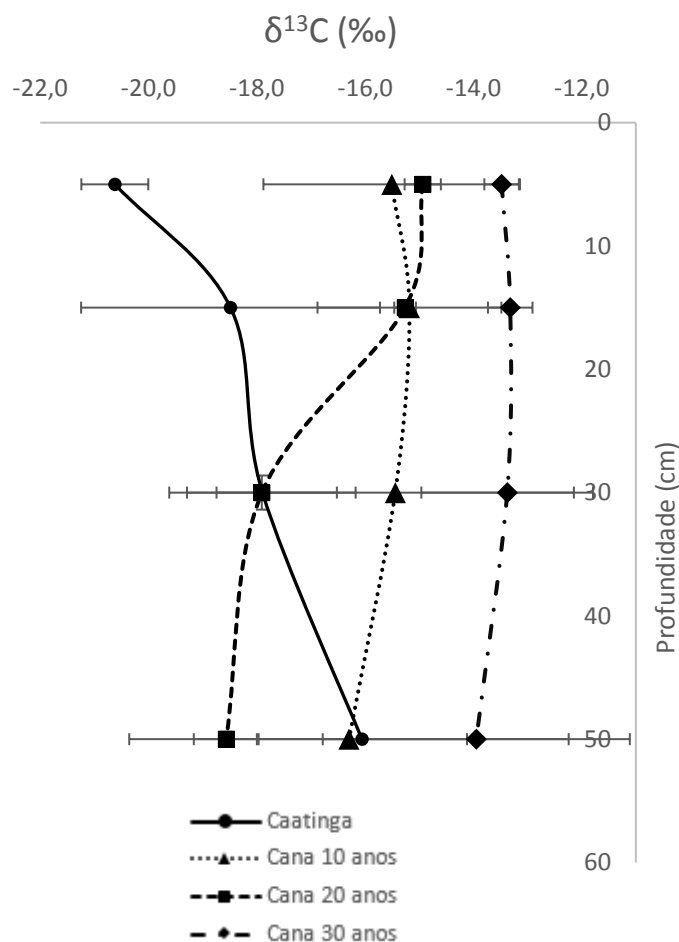
Comparando os dados obtidos neste estudo com os relatados por Fidalgo et al. (2007), pode-se notar que os estoques encontrados nessas áreas e nessas condições são elevados. Tais autores, estimaram que o estoque de C dos Vertissolos do Brasil seria em torno de 90 milhões de Mg, o que equivaleria a 51 Mg ha⁻¹ quando considerado a área que essa classe de solo representou no estudo desses autores. Todavia, são estoques imprecisos, já que não tiveram padronização, das profundidades amostradas.

Em diversas áreas nos biomas Cerrado, Mata Atlântica e Pampa, a mudança de uso da terra promoveu a redução dos estoques de C no solo principalmente nas camadas superficiais (ASSAD et al., 2013). Nos sistemas agropecuários, a redução do estoque de C no solo foi de 7,5 Mg ha⁻¹ na camada 0-10 cm e 11,6 Mg ha⁻¹ na camada 0-30cm, semelhantes às reduções com a conversão do uso da terra pela instalação de pastagem (7,5 e 11 Mg ha⁻¹, respectivamente). Quando a comparação foi feita em relação a 60 cm de profundidade, também não houve diferenças significativas nas diferentes formas de uso do solo.

4.3. Sinais isotópicos e origem do C

Houve incrementos do sinal isotópico $\delta^{13}\text{C}$ nas camadas superficiais com o decorrer do tempo de cultivo (Figura 4). Este aumento deriva da incorporação de matéria orgânica derivada da cana-de-açúcar que apresenta o ciclo fotossintético C4 (Tabela 5), mais enriquecido $\delta^{13}\text{C}$ que as do ciclo C3, que provavelmente predominavam nas áreas de caatinga.

Figura 4. Abundância natural do $\delta^{13}\text{C}$, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil



Diversos são os trabalhos que mostram que quando ocorre a substituição de plantas do ciclo C3 por C4, a participação do C no estoque proveniente desta nova espécie aumenta gradativamente, de acordo com o enriquecimento do $\delta^{13}\text{C}$ nessas áreas (ARAÚJO et al., 2011; ASSAD et al., 2013; LOSS et al., 2014).

Houve um comportamento incomum no $\delta^{13}\text{C}$ do solo da área de caatinga (tempo 0) em profundidade (Figura 4). Na camada mais superficial (0-10), o valor de $\delta^{13}\text{C}$ foi próximo ao de plantas do ciclo C3 (valores entre -24 ‰ e -38 ‰, MARTINELLI et al., 2009) e próximo aos valores observados nas folhas, raízes e serapilheira da caatinga (Tabela 5). Porém, em profundidade, o comportamento foi alterado, sendo o

valor do $\delta^{13}\text{C}$ cada vez maior, caracterizando área com predomínio de plantas C4, chegando à -16,1 ‰ na camada de 40 a 60 cm. Tal situação não é condizente com a caracterização do $\delta^{13}\text{C}$ da mata e da serapilheira (Tabela 5) presente no local, pois estas, apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ característicos de plantas do ciclo fotossintético C3. Uma das possíveis explicações para esse resultado é a presença de gramíneas nativas no local. No entanto, por se acreditar que a produção de biomassa destas é baixa, a participação delas no sinal isotópico também seria baixa. Outra possível explicação é a área já ter tido algum tipo de plantio de pastagem no passado, fugindo do conhecimento da equipe da fazenda, que erroneamente, acredita que a caatinga está na área há muitos anos.

Tabela 5. Concentrações de C e N e proporções de ^{13}C e ^{15}N em partes das plantas de cana-de-açúcar, de árvores e da serapilheira em áreas de caatinga

	$\delta^{15}\text{N}$	N	$\delta^{13}\text{C}$	C
	‰	%	‰	%
Cana				
Folha	7,06 ($\pm 1,94$)	0,67 ($\pm 0,36$)	-13,14 ($\pm 0,55$)	40,01 ($\pm 4,41$)
Raiz	6,56 ($\pm 1,35$)	0,67 ($\pm 0,38$)	-12,75 ($\pm 0,38$)	39,39 ($\pm 7,04$)
Planta	6,81 ($\pm 1,64$)	0,67 ($\pm 0,36$)	-12,94 ($\pm 0,5$)	39,70 ($\pm 5,71$)
Caatinga				
Folha	5,59 ($\pm 2,27$)	0,94 ($\pm 0,61$)	-27,00 ($\pm 0,64$)	39,09 ($\pm 8,16$)
Raiz	5,62 ($\pm 3,22$)	1,17 ($\pm 0,63$)	-27,96 ($\pm 0,77$)	40,07 ($\pm 5,13$)
Planta	5,61 ($\pm 2,49$)	1,06 ($\pm 0,57$)	-27,48 ($\pm 0,82$)	39,58 ($\pm 6,12$)
Serapilheira	3,7 ($\pm 2,23$)	1,3 ($\pm 0,12$)	-27,48 ($\pm 0,59$)	38,02 ($\pm 2,38$)

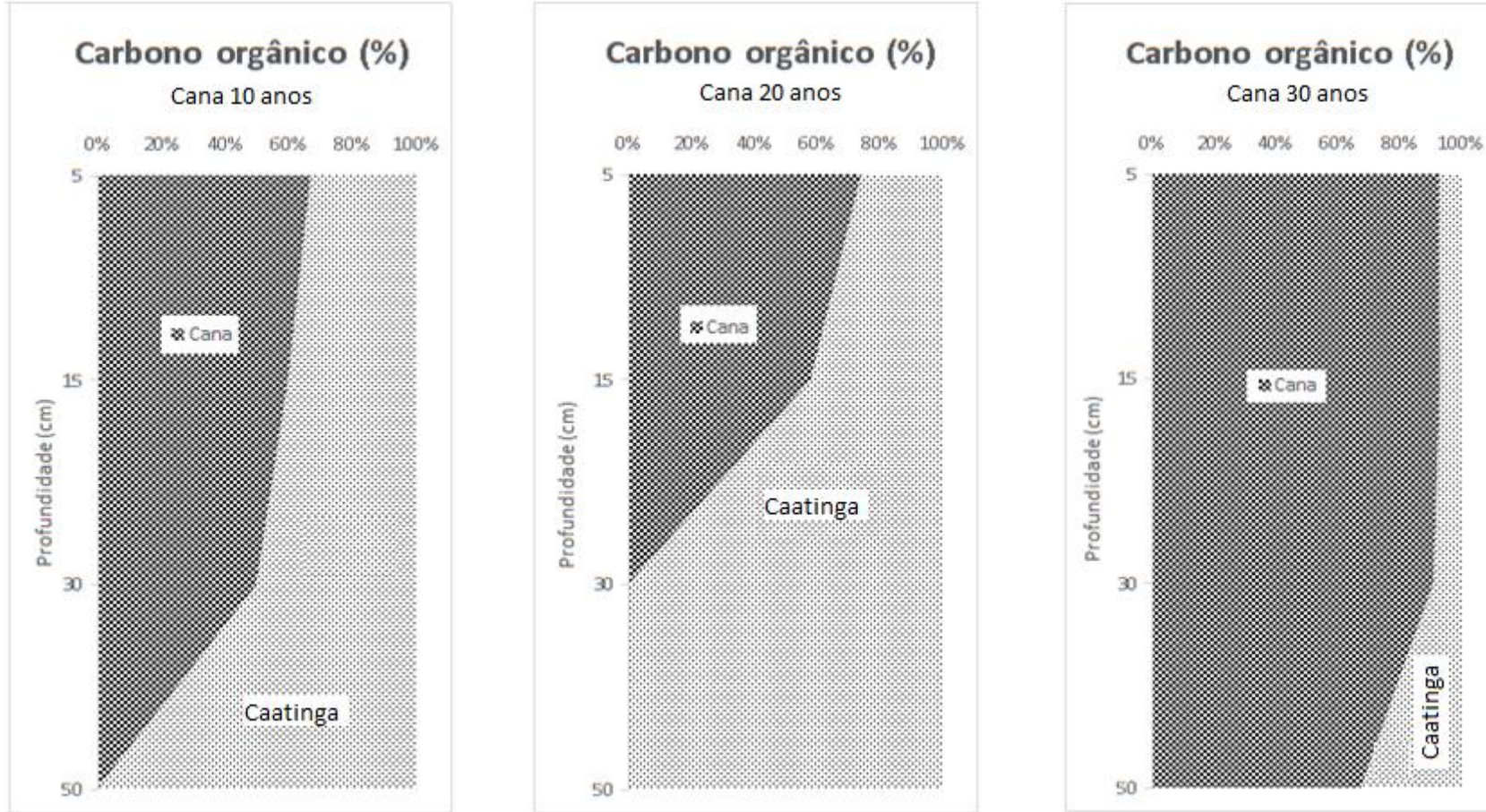
O estoque de serapilheira na mata nativa no período da amostragem foi estimado em 7,6 Mg ha⁻¹. Os poucos os trabalhos que estimam a produção de serrapilheira no bioma Caatinga relatam em média 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em matéria seca, podendo chegar a 9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ dependendo das condições climáticas e da composição da vegetação (SAMPAIO; SILVA, 1996; DANTAS, 2003; SANTOS et al., 2011).

Frente as condições ambientais desse Bioma, a serapilheira é uma parte importante do processo de ciclagem de nutrientes, favorecendo o fluxo de energia no sistema (VITAL et al., 2004). Serve também de abrigo para macro e micro invertebrados, armazena grande quantidade de sementes que possibilita a renovação das populações, retém água e diminui o impacto direto da gota de chuva (SILVA et al., 2006; SILVA, 2009).

O C derivado da cana já tem participação expressiva no estoque de C do solo, após 10 anos de cultivo da cana, sendo mais acentuada na camada de 0 - 40 cm, chegando a mais de 50%. Com 20 anos de cultivo de cana, a participação do C proveniente da cana supera os 50% de C estocado logo nas primeiras camadas (0 – 20 cm), porém com menor participação nas camadas mais profundas (20 – 60 cm) que na área cultivada há 10 anos. Nas áreas com 30 anos de cultivo de cana, praticamente todo o C armazenado no perfil do solo é originário da cana, representando mais de 90 % de todo o estoque. Fica claro que a maior participação da cana no estoque de C se dá principalmente nas camadas mais superficiais, devido a características das raízes dessa cultura.

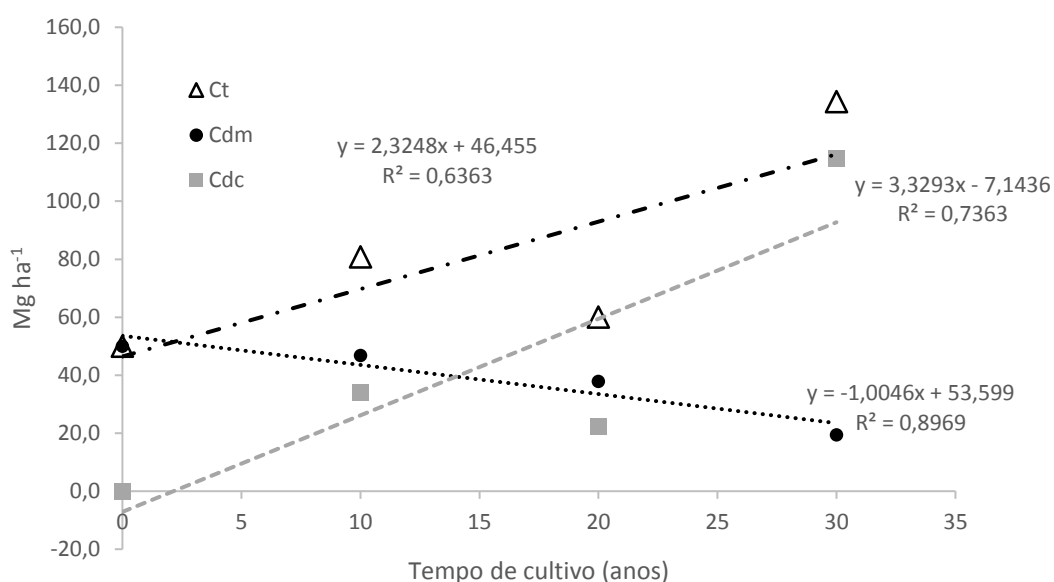
Diferentemente do ocorrido nesse trabalho, Costa et al. (2009), observaram que em áreas de Argissolo Amarelo plantada com pastagem há 28 no Sul da Bahia, mais de 62% do C ainda era oriundo da mata, anterior a pastagem.

Figura 5. Proporção de carbono derivado da caatinga anterior e da cana-de-açúcar cultivado por 10, 20 e 30 anos em Vertissolo, em Juazeiro, Bahia, Brasil



A participação do C proveniente das plantas C3 (Cdm) reduziu-se consideravelmente com o decorrer dos anos (Figura 6), enquanto a participação das plantas C4 (Cdc) aumentam de forma gradativa, assim como, os teores de C total (Ct) estocados no solo, até a profundidade de 60 cm.

Figura 6: Dinâmica do carbono total (Ct) do solo, do C derivado da caatinga (Cdm) e da cana-de-açúcar (Cdc) cultivada por 10, 20 e 30 anos em Vertissolo, em Juazeiro, Bahia, Brasil



O tempo de residência média (TRM) do C é o tempo necessário para que metade do C original (provenientes de plantas C3) seja substituído pelo C da cultura instalada (plantas C4). Esse cálculo é feito em relação ao maior tempo de cultivo (30 anos). Nas camadas 0-10, 10 – 20 e 20 – 40 mais da metade do C da mata foi substituído pelo C da cana já nos primeiros 22 anos de cultivo (Tabela 6). Já na camada de 40 – 60 cm são necessários 82 anos de cultivo para que metade do C proveniente da mata seja substituído pelo C adicionado pela cana-de-açúcar.

Considerando principalmente as camadas superficiais, esses teores são bem mais baixos que os encontrados em outras regiões. Por exemplo, os TRM do C da mata em Argissolos dos tabuleiros costeiros de Alagoas, cultivados com cana-de-

açúcar, situaram-se entre 20,1 e 28,8 anos, nas camadas de 0 a 30 cm; e de 43,7 anos na camada de 30 a 60 cm (MELO IVO, 2012). Já o TRM do C da floresta em Latossolos de São Paulo cultivados com cana-de-açúcar foram bem mais altos (CERRI, 1986), demonstrando a influência de fatores como clima, vegetação, tipo de solo (textura, estrutura, mineralogia) e práticas de manejo sobre o TRM.

A região do Submédio São Francisco é caracterizada por temperaturas médias anuais que podem atingir 27 °C, além de alta incidência de insolação ultravioleta, condições que condicionam rápida degradação da matéria orgânica do solo (PARTON et al., 2007; KING; BRANDT; ADAIR, 2012). Nos cultivos irrigados, o aumento da disponibilidade de água no solo pode acelerar ainda mais as taxas de decomposição (LEE et al., 2014).

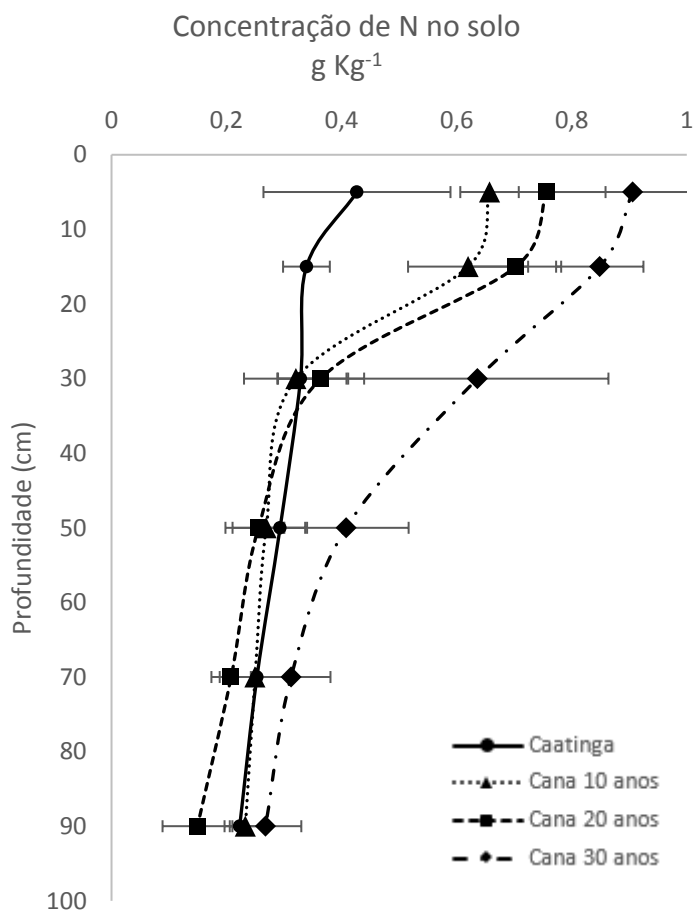
Tabela 6. Tempo de residência média do carbono (TRM) orgânico derivado da caatinga em Vertissolo, cultivado com cana-de-açúcar por 30 anos, em Juazeiro, Bahia, Brasil

Profundidade (cm)	Tempo (anos)
0 – 10	18,94
10 – 20	18,96
20 – 40	22,07
40 - 60	82,01

4.4. Nitrogênio do solo.

As concentrações de N no solo aumentaram gradativamente com os tempos de cultivo de cana-de-açúcar (Figura 7). Esse incremento foi mais expressivo nas camadas superficiais do solo, reduzindo-se em profundidade e chegando a concentrações similares à encontrados nas áreas de caatinga já na profundidade de 30 cm, com cultivos por 10 e 20 anos.

Figura 7. Concentrações de N do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil



A mudança do uso da terra para a implantação da atividade agrícola promoveu de forma crescente o incremento de nitrogênio no solo ao longo do tempo, principalmente nas camadas superficiais (Tabela 7). Estes incrementos podem estar associados à adubação com fertilizantes nitrogenados. Além disso, pode haver entrada de N pelo processo de fixação biológica de nitrogênio por bactérias endofíticas associadas à cana-de-açúcar. São fortes as evidências de que diversas das variedades de cana-de-açúcar plantadas no país são capazes de obter parte do N acumulado em sua biomassa por meio da FBN, embora em proporções bastante variáveis (URQUIAGA et al., 2012; BAPTISTA et al., 2014). Como as informações disponíveis não cobrem grande parte da diversidade de genótipos de cana-de-açúcar

utilizados e de condições ambientais das diferentes regiões produtoras, não se pode estimar os aportes anuais de N nas áreas estudadas, mas em geral esses valores são estimados entre 20% e 40% do N das plantas (URQUIAGA; CRUZ; BODDEY, 1992; URQUIAGA et al., 2012; BAPTISTA et al., 2014). A decomposição de restos culturais contendo N proveniente da atmosfera, principalmente das partes subterrâneas, já que a cana é colhida queimada, passa a compor a matéria orgânica do solo.

Tabela 7. Estoques de N do solo, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil

Camada (cm)	Kg ha ⁻¹			
	Caatinga	Cana 10 anos	Cana 20 anos	Cana 30 anos
0 -10	687,5b	946,6ab	1124,1ab	1363,9a
10 – 20	573b	835ab	1121,2a	1147,8a
20 - 40	2266,4ab	1945,1b	1954,5ab	3801a
40 - 60	2009,7	1678	1687,1	2549,5
60 - 80	1786,6	1582,4	1431,6	1777,2
80 - 100	1615,1	1545,4	1022,4	1670,1
TOTAL	8938,4	8532,6	8340,9	12309,4

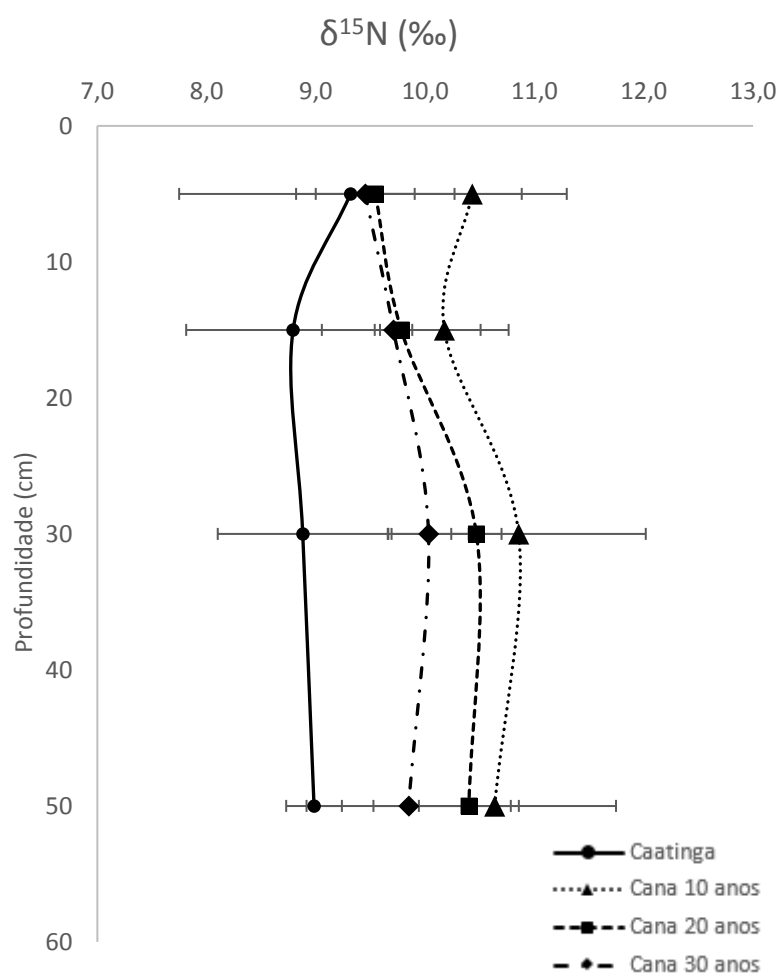
Médias, seguidas de mesmas letras, em cada intervalo de profundidade, não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

As áreas cultivadas estão mais enriquecidas com ¹⁵N do que a área de caatinga em todo o perfil, sendo as camadas mais profundas levemente mais enriquecidas (Figura 8), corroborando os resultados de Loss et al. (2014) e Costa Junior et al. (2011b).

O enriquecimento de ¹⁵N no solo pode ser atribuído à deposição de material orgânico em superfície (LOSS et al., 2014). Os processos de mineralização, nitrificação, desnitrificação e volatilização de compostos nitrogenados estão associados a discriminação do isótopo de nitrogênio mais pesado (¹⁵N), assim os processos de perda de N do solo resultam em enriquecimento isotópico da matéria orgânica (HÖGBERG, 1997; BUSTAMANTE et al., 2004). Nadelhoffer e Fry (1994)

relataram que, em geral, ecossistemas transformados são normalmente mais enriquecidos em ^{15}N do que áreas de mata nativa.

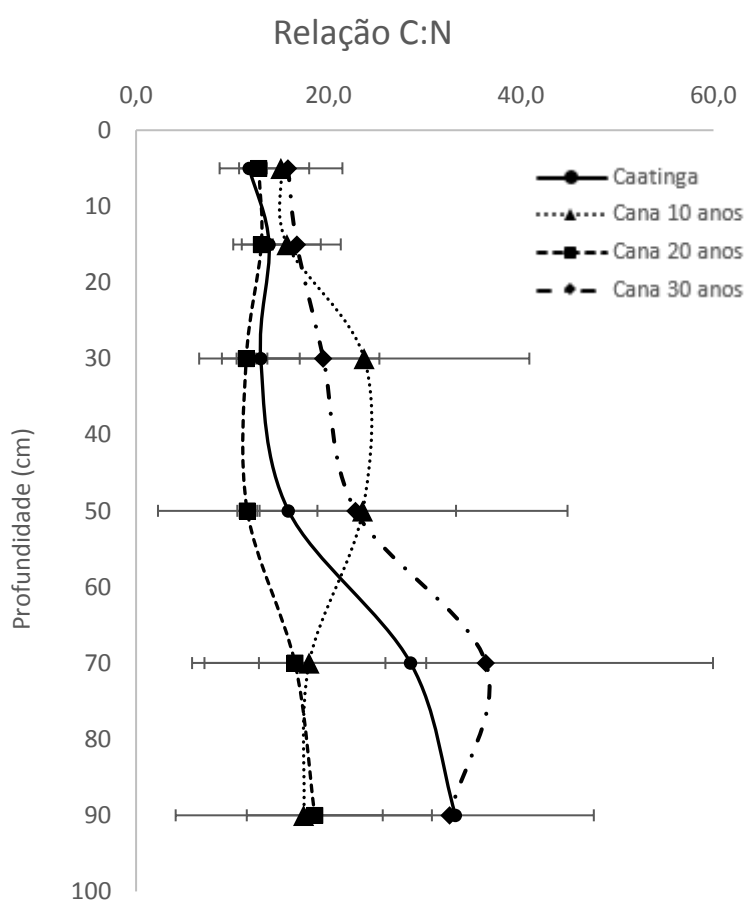
Figura 8. Abundância natural do $\delta^{15}\text{N}$, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil



A relação aumentou com a profundidade do solo em todos os períodos de cultivo da cana-de-açúcar (Figura 9), indicando que a matéria orgânica nas camadas superficiais tem um maior grau de degradação do que as das camadas mais profundas

do solo. Esses resultados não foram condizentes com as encontradas por Batjes (2014) no mesmo tipo de solo.

Figura 9. Relação C:N, em diferentes profundidades de um Vertissolo em áreas de caatinga e cultivados por 10, 20 e 30 anos com cana-de-açúcar, em Juazeiro, Bahia, Brasil



Nas camadas superficiais, a relação C:N variou entre 11 e 16, valor próximo ao encontrado por Freitas et al. (2015) em solos de diversos ecossistemas de Pernambuco (16) e semelhante aos valores reportados para solos de diversas regiões do mundo (BATJES, 1996), corroborando que os ciclos de C e N são estreitamente relacionados e estão em equilíbrio nos solos de todas as áreas estudadas.

5. CONCLUSÃO

A mudança do uso da terra, com remoção da caatinga e instalação de cultivos de cana-de-açúcar em áreas de Vertissolos irrigados no Semiárido, promove aumento do estoque de C e de N no solo. Esse incremento é devido ao aporte de biomassa da cana, como evidenciado pelo aumento nos teores do $\delta^{13}\text{C}$ do solo ao longo dos anos. O TRM do C é menor que o observado em solos de outras regiões produtoras de cana-de-açúcar, e é crescente com a profundidade do solo, chegando a ser aproximadamente 82 anos na última camada avaliada (40 – 60 cm).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J.M.; FAURE, H.; FAURE-DENARD, L.; MCGLADE, J.M.; WOODWARD, F.I. Increases in terrestrial carbon storage from the Last Glacial maximum to the present. **Nature**, London, v. 348, p.711–714, 1990.

ALBUQUERQUE, E.R.G.M. **Biomassa de raízes em áreas com diferentes usos da terra e tipos de solos**. 2015. 134 p. Tese (Doutorado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Biologia, Recife, 2015.

ALBUQUERQUE, E.R.G.M.; SAMPAIO, E.V.S.B.; PAREYN, F.G.C.; ARAÚJO, E.L. Root biomass under stem bases and at different distances from trees. **Journal of Arid Environments**, London, v. 116, p. 82-88, 2015.

ALENCAR, K. **Análise do balanço entre demanda por etanol e oferta de cana-de-açúcar no Brasil**. 49 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

ALMEIDA JÚNIOR, A.B.; NASCIMENTO, C.W.A.; SOBRAL, M.F.; SILVA, F.B.V.; GOMES, W.A. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1004–1013, 2011.

ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; JANTALIA, C.P.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. In: AQUINO, A.M.; ASSIS, R.L., eds. **Processos biológicos no sistema solo-planta: Ferramentas para uma agricultura sustentável**. Brasília, Embrapa-SCT, p.343-350, 2005.

ANDRADE-LIMA, D. The Caatingas dominium. **Revista Brasileira de Botânica** 4, São Paulo, p.149-163, 1981.

ANDREUX, F.; CERRI, C.; VOSE, P.B.; VITORELLO, V.A. Potential of stable isotope, ^{15}N and ^{13}C , methods for determining input and turnover in soils. (Ed.) **Nutrient cycling in terrestrial ecosystems: field methods, application and interpretation**. p. 259-275, 1990.

ARAÚJO, E.A.; KER, J.C.; MENDONÇA, E.S.; SILVA, I.R.; OLIVEIRA, E.K. Impacto da conversão floresta pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Acta Amazonica**, Manaus, v.41, n. 1, p. 103 – 114, 2011.

ARAÚJO, S.M.S. A região semiárida do Nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica – Revista Científica da FASETE**, Paulo Afonso, Ano 5, n.5, p. 89-98, 2011.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; MARTINS, S.C.; GROppo, J.D.; SALGADO, P.R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E.E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; CAMARGO, P.B.; MARTINELLI, L.A. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey.

Biogeosciences, Gottingen, v. 10, p. 6141–6160, 2013.

BAPTISTA, R.B.; MORAIS, R.F.; LEITE, J.M.; SCHULTZ, N.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Variations in the ¹⁵N natural abundance of plant-available N with soil depth: Their influence on estimates of contributions of biological N₂ fixation to sugar cane. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 73, p. 124–129. doi:10.1016/j.apsoil. 2013.08.008, 2014.

BARBOSA, M.C.R.; LIMA, H.M. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 113-120, 2013.

BATJES, N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. British Society of Soil Science, **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 65, p. 4–21, 2014.

BATJES, N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, Hoboken, v. 47, p. 151–163, 1996.

BAZZAZ, F.A.; FAJER, E.D. Plant life in a CO₂ rich world. **Scientific American**, New York, v. 266, p. 18–24, 1992.

BENITES, V.M.; MOUTTA, R.O.; COUTINHO, H.L.C.; BALIEIRO, F.C. Análise discriminante de solos sob diferentes usos em área de Mata Atlântica a partir de atributos da matéria orgânica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, p. 685-690, 2010.

BERNOUX, M.; CERRI, C.C.; NEIL, C.; MORAES, J.F.L., The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. **Geoderma**, Amsterdam, v. 82, p.43-58, 1998.

BRAIDA, J.A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. (Ed.) **Tópicos em Ciência do Solo**. 7: p.221-278, 2011.

BUSTAMANTE, M. M. C.; MARTINELLI, L. A.; SILVA, D. A.; CAMARGO, P. B.; KLINK, C. A. DOMINGUES TF, SANTOS RV. ¹⁵N natural abundance in woody plants and soils of central Brazilian savannas (cerrado). **Ecological Applications**, New York, v. 14, n. 4, p.200-213, 2004.

CAMPOS, M.C.C; SOARES, M.D.R.; NASCIMENTO, M.F.; SILVA, D.M.P. Estoque de carbono no solo e agregados em Cambissolo sob diferentes manejos no sul do Amazonas. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, vol.11, n.2, p.339-349, 2016.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGEL, B.J.; PICCOLO, M.C.; GODINHO, V.P.; CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazil Amazon. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 342-349, 2009.

CERRI, C.C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo no agrossistema cana-de-açúcar**. 1986. 197 f. Tese. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo, 1986.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CERRI, C.E.P.; LAL, R. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C.E.P. **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York, Haworth. p. 41-47, 2006.

CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Agricultura e aquecimento global. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 40-44, 2007.

CHIODEROLI, C.A.; MELLO, L.M.M.; GRIGOLLI, P.J.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, J.O.R.; CESARIN, A.L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 37–43, 2012.

Companhia Nacional de Abastecimento, CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.1 – Safra 2014/15, n. 3 - Terceiro Levantamento, Brasília, 2014.

Companhia Nacional de Abastecimento, CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. - v.4 - Safra 2017/18, n. 1- Primeiro Levantamento, Brasília, 2017.

CORDEIRO, L.A.M.; ASSAD, E.D.; FRANCHINI, J.C.; SÁ, J.C.M.; LANDERS, J.N.; AMADO, T.J.C.; RODRIGUES, R.A. R.; ROLOFF, G.; BLEY JÚNIOR, C.; ALMEIDA, H.G.; MOZZER, G.B.; BALBINO, L.C.; GALERANI, P.R.; EVANGELISTA, B.A.; PELLEGRINO, G.Q.; MENDES, T.A.; AMARAL, D.D.; RAMOS, E.; MELLO, I.; RALISCH, R. **O aquecimento global e a agricultura de baixa emissão de carbono**. Brasília: MAPA / EMBRAPA / FEBRAPDP, 75p, 2011.

COSTA JUNIOR, C.; PICCOLO, M.C.; NETO, M.S.; CAMARGO, P.B.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Carbono total e $\delta^{13}\text{C}$ em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no Bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1241-1252, 2011a.

COSTA JUNIOR, C.; SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. C.; CAMARGO, P. B. Nitrogênio e abundância natural de ^{15}N em agregados do solo sob diferentes usos da terra no Bioma Cerrado. **Ensaio e Ciência**, Anhanguera, v. 15, n. 2, p. 47-66, 2011b.

COSTA, O.V.; CANTARUTTI, R.B.; FONTES, L.E.F.; COSTA, L.M.; NACIF, P.G.S.; FARIA, J.C. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de tabuleiro costeiro no sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.1137-1145, 2009.

DANTAS, JS. **Dinâmica da produção e decomposição de folheto e ciclagem de nutrientes em um ecossistema de caatinga arbórea no Agreste da Paraíba.**

Areia: Universidade Federal da Paraíba. 37p. Monografia de Graduação em Agronomia, 2003.

DEL GALDO, I.D.; SIX, J.; PERESSOTTIS, A.; COTRUFO, M. F. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. **Global Change Biology**. Hoboken, v. 9, p.1204-1213, 2003.

DIXON, R.K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.A.; SOLOMON, A.M.; TREXLER, M.C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, Washington, v. 263, p. 185- 190, DOI: 10.1126/science.263.5144.185, 1994.

DUARTE, I.N.; PEREIRA, H.S.; KORNDÖRFER, G.H. Lixiviação de potássio proveniente do termopotássio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p.195-200, 2013.

DUDAL, R; ESWARAN, H. Distribution, Properties and Classification of Vertisols. In_____. (ed.). **Vertisols: their distribution, properties, classification and management**. WILDING, L.P.; PUENTES, R. p.1-36, 1988.

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75(4), p.529-538, <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>, 1995.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Preservação e uso da Caatinga**. Embrapa SemiÁrido. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 39 p.: il. – (ABC da Agricultura Familiar, 16), 2007.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos** / organizadores, Guilherme Kangussú Donagema... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN: 1517-2627 ; 132), 2011.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Embrapa Agrobiologia. Circular técnico 27. ISSN: 1519-7328, 2009.

ESWARAN, H.; van den BERG, E.; REICH, P. Organic carbon in soils of the world. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 192-194, 1993.

FAGUNDES, J.D.; PAULA, G.M.; LAGO, I.; STRECK, N.A.; BISOGNIN, D.A. Aquecimento global: efeitos no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade de batata. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 6, p. 1464-1472, 2010.

FERREIRA, M.M. Caracterização física do solo. In:_____. (1ªed.). **Física do solo**. Editor Quirijn de Jong van Lier. – Viçosa, p.9, 2010.

FIDALGO, E.C.C.; BENITES, V.M.; MACHADO, P.L.O.A.; MADARI, B.E.; COELHO, M.R.; MOURA, I.B.; LIMA, C.X. **Estoques de carbono nos solos do Brasil**. Dados eletrônicos. – Rio de Janeiro: Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, ISSN 1678-0892; 121, 2007.

FREITAS, A.D.S; SAMPAIO, E.V.S.B; RAMOS, A.P.S; BARBOSA, M.R.V; LYRA, R.P; ARAÚJO, E.L. Nitrogen isotopic patterns in tropical forests along a rain fall gradient in Northeast Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 391, p.109–122, 2015. doi:10.1007/s11104-015-2417-5, 2015.

GATTO, A.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P.; VILLANI, E.M.A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p.1069-1079, 2010.

Global Carbon Project. GCP. **Ten years of advancing knowledge on the global carbon cycle and its management**, 2010.

GOUDRIAAN, J.; UNSWORTH, M.H. Implications of increasing carbon dioxide and climate change for agricultural productivity and water resources. (Ed.) **Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture**, p.111–130 (eds B.A. Kimball, N.J. Rosenberg; L.H. Allen Jr.). ASA Special Publication No. 53, ASA/CSSA/SSSA, Madison, Wisconsin, 1990.

HANDLEY, L.L.; SCRIMGEOUR, C.M. Terrestrial plant ecology and ¹⁵N natural abundance: the present limits to interpretation for uncultivated systems with original data from a Scottish old field. **Advances in Ecological Research**, San Diego, v. 27, p.133-212, 1997.

HÖGBERG, P. ¹⁵N natural abundance in soil-plant systems. **New Phytologist**, Sweden, v. 137, n. 95, p. 179- 203, 1997.

HORWATH, R. **Carbon cycling and formation of soil organic matter**. Encyclopedia of Soil Science. p.91-97, 2008.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal**, v. 37, p. 1-91, 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Land use, land use change, and forestry**. Cambridge, Cambridge University Press, p.5.1-5.75, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp, 2014.

JANTALIA, C.P.; RESECK D.V.S.; ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; URUQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Tillage effect on C stocks of clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 95, p.97-109, 2007.

JUNK, G.; SVEC, H.J. The absolute abundance of the nitrogen isotopes in the atmosphere and compressed gas from various sources. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 14, p. 234-243, 1958.

KING, J.Y.; BRANDT, L.A.; ADAIR, E.C. Shedding light on plant litter decomposition: advances, implications and new directions in understanding the role of photodegradation. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 111, p. 57-81, 2012.

KREMEN, C.; MILES, A. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. **Ecology and Society**, Wolfville, v. 17, p. 1-25, 2012.

LEAL, I.R.; TABARELLI, M.; SILVA, J.M.C. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife, PE: Ed. Universitária da UFPE, 822 p, 2003.

LEE, H.; FITZGERALD, J.; HEWINS, D.B.; MCCULLEY, R.L.; ARCHER, S.R.; RAHN, T.; THROOP, H.L. Soil moisture and soil-litter mixing effects on surface litter decomposition: A controlled environment assessment. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 72, p. 123-132, 2014.

LEITE, L.F.C.; ARRUDA, F.P.; COSTA, C.N.; FERREIRA, J.S.; NETO, M.R.H. Qualidade química do solo e dinâmica de carbono sob monocultivo e consórcio de macaúba e pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1257–1263, 2013

LIMA, G.K. **Caracterização de Vertissolos do nordeste brasileiro**. 2014. 101p. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, Recife-PE, 2014.

LIMA JÚNIOR, C.; GIONGO, V.; TAURA, T.A.; LIMA, R.L.F.A.; MENEZES, R.S.C. Índices de vegetação para estimativa de biomassa e carbono em uma área de caatinga. In: XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Solo, 16., 2014, Cusco. Educar para preservar el suelo y conservar la vida en la tierra. **Anais de Congresso**, Cusco, 2014.

LOPES, F.A.C.; CATÃO, E.C.P.; SANTANA, R.H.; CABRAL, A.S.; PARANHOS, R.; RANGEL, T.P.; REZENDE, C.E.; EDWARDS, R.A.; THOMPSON, C.C.; THOMPSON, F.L.; KRUGER, R.H. Microbial community profile and water quality in a protected área of the Caatinga Biome. **PLoS ONE**, v. 11, n. 2, e0148296, 2016. doi: 10.1371/journal.pone.0148296, 2016.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; PERIN, A.; ANJOS, L.H.C. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em sistemas de manejo conservacionista no cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 604-615, 2014.

LUO, Y; ZHOU, X. Soil respiration and the environment. 1ed. **Elsevier**, San Diego: 316p, 2006.

LYRA, M.C.C.P.; RIBEIRO, M.R.; RODRIGUES, J.J.V. Caracterização de Vertissolos em projeto de irrigação na região do Baixo-médio São Francisco: II. Propriedades morfológicas, físicas e químicas. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 19, p. 441-448, 1995.

MARQUES, F.A.; SOUZA, R.A.S.; SOUZA, J.E.S.; LIMA, J.F.W.F.; SOUZA JÚNIOR, V.S. Caracterização de Vertissolos da ilha de Fernando de Noronha, Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 38, p. 1051-1065, 2014.

MARIOTTI, A.; MARIOTTI, F.; CHAMPIGNY, M.L.; AMARGER, N.; MOYSE, A. Nitrogen isotope fractionation associated with nitrate reductase activity and uptake of NO_3^- by pearl millet. **Plant Physiology**, Rockville, v. 69, p. 880-884, 1982.

MARTINELLI, L.; OMETTO, J.P.; FERRAZ, E.; VICTORIA, R.; CAMARGO, P.B.; MOREIRA, M. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

MELLO IVO, W.M.P. **Dinâmica da matéria orgânica em áreas de produção de cana-de-açúcar colhida crua e queimada, no Nordeste do Brasil**. 2012, 143f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

MENDONÇA, L.A.R.; FRISCHKORN, H. SANTIAGO, M.F.; CAMARGO, P.B.; LIMA, J.O.G.; FILHO, J.M. Identificação de mudas florestais por ^{13}C e ^{15}N dos solos da chapada do Araripe, Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 314-319, 2010.

MILLARD, P.; MIDWOOD, A.J.; HUNT, J.E.; WHITEHEAD, D.; BOUTTON, T.W. Partitioning soil surface CO_2 efflux into autotrophic and heterotrophic components, using natural gradients in soil $\delta^{13}\text{C}$ in an undisturbed savannah soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 40, p. 1575-1582, 2008.

MÜLLER, C.B.; WEBER, O.L.S.; SCARAMUZZA, J.F. Oxidizable fraction of organic carbon in an Argisol under different land use systems. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 215-222, 2012.

NADELHOFFER, K.J.; FRY, B. Nitrogen isotope studies in forest ecosystems. In: Lajtha, K.; Michener, R.H. (ed.). **Stable isotopes in ecology and environmental science**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 137p, 1994.

National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>. Acesso em; março, 2016.

NEVES, L.S.; ERNANI, P.R.; SIMONETE, M.A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 25-32, 2009.

OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATANABE, F.S.; DEAN, L.A. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate**. Washington. United States Department of Agriculture, 19p. (Circular, 939), 1954.

OVERPECK J.T.; OTTO-BLIESNER B.L.; MILLER G.H.; MUHS D.R.; ALLEY R.B.; KIEHL J.T. Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise. **Science**, Washington, v. 311, n. 5768, p. 1747-1750, 2006.

PARTON, W.; SILVER, W.L.; BURKE, I.C.; GRASSENS, L.; HARMON, M.E.; CURRE, W.S.; KING, J.Y.; ADAIR, E.C.; BRANDT, L.A.; HART, S.C.; FASTH, B. Global scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. **Science**, Washington, v. 135, p. 361-364, 2007.

PATERSON, E.; MIDWOOD, A.J.; MILLARD, P. Through the eye of the needle: a review of isotope approaches to quantify microbial processes mediating soil carbon balance. **New Phytologist**, Hoboken, v. 184, p. 19-33, 2009.

PAUSTIAN, K.; SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; HUNT, H.W. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 48, p. 147-163, 2000.

PESSENDA, L.C.R.; LEDRU, M.P.; GOUVEIA, S.E.M.; ARAVENA, R.; RIBEIRO, A.S.; BENDASSOLLI, J.A.; BOULET, R. Holocene palaeoenvironmental reconstruction in northeastern Brazil inferred from pollen, charcoal and carbon isotope records. **The Holocene**, v. 15, n. 6, p. 814-822, 2005.
DOI:10.1191/0959683605hl855ra, 2005.

ROBINSON, D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. **TRENDS in Ecology & evolution**, London, v. 16, n. 3, p.153-162, 2001.

ROSOLEM, C.A.; SANTOS, F.P.; FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1033-1040, 2006.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SAGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo (Brazil) using Landsat Data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, p.1057-1076; doi: 10.3390/rs2041057, 2010.

SALES, D.C.; COSTA, A.A.; SILVA, E.M.; JÚNIOR, F.C.V.; CAVALCANTE, A.M.B.; MEDEIROS, S.S.; MARIN, A.M.P.; GUIMARÃES, S.O.; JUNIOR, L.M.A.; PEREIRA, J.M.R. Projeções de mudanças de precipitação e temperatura no nordeste brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.

SAMPAIO, E.V.S.B; SALCEDO, I.H.; CAVALCANTI, F.J.A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III. Conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 425-431, 1987.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SILVA, G.C. Ciclagem de nutrientes. In SAMPAIO, E.V.S.B.; MAYO, S.J.; BARBOSA, M.R.V. (Eds.). **Pesquisa botânica nordestina: progressos e perspectivas**. Recife: Sociedade Botânica do Brasil, Seção Regional de Pernambuco. p. 191-202, 1996.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate in soils. In.: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, chap.11, p.263-310, 1980.

SANTOS, D.H.; TIRITAN, C.S.; FOLONI, J.S.S.; FABRIS, L. B. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 4, p. 454-461, 2010.

SANTOS, P.S.; SOUZA, J.T.; SANTOS, J.M.F.F.; SANTOS, D.M.; ARAÚJO, E.L. Diferenças sazonais no aporte de serrapilheira em uma área de caatinga em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoro, v. 24, n. 4, p. 94-101, 2011.

SCHAPENDONK, H.C.M.; VAN OIJEN, M.; DIJKSTRA, P.; POT, C.S.; JORDI WILCO, J.R.M.; STOOPEN, G.M. Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic acclimation and productivity of two potato cultivars grown in open-top chambers. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 27, p. 1119-1130, 2000.

SCHARPENSEEL, H.W. Preface to workshop 'Management of carbon in tropical soils under global change: Science, practice and policy'. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 1-8, 1997.

SCHILESINGER, W.H. **Biogeochemistry: An analysis of global change**. 2^a ed. San Diego, Academic Press. 588p, 1997.

SHEARER, G.; KOHL, D.H.; CHIEN, S.H. The nitrogen-15 abundance in a wide variety of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p.899-905, 1978.

SICHER, R.C.; BUNCE, J.A. Photosynthetic enhancement and conductance to water vapor of field-grown *Solanum tuberosum* (L.) in response to CO₂ enrichment. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 62, p. 155-163, 1999.

SILVA R. W. C., PAULA B. L. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terræ Didática**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 42-49, 2009.

SILVA, A.P.M.; BONO, J.A.M.; PEREIRA, F.A.R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 38-43, 2014.

SILVA, K. A. **Banco de sementes (lenhosas e herbáceas) e dinâmica de quatro populações herbáceas em uma área de caatinga em Pernambuco**. 2009.132 f. Tese (Doutorado em Botânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

SILVA, R.F.; AQUINO, A.M.; MARCANTE, F.M.; GUIMARÃES, M.F. Macrofauna invertebrada do solo sob diferentes sistemas de produção em Latossolo da Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 697-704, 2006.

SIX, J.; JASTROW, J.D. Organic matter turnover. In: Lal, R. (ed). **Encyclopedia of Soil Science**. Taylor; Francis. New York, v.2: p.1210-1215, 2006.

SLEUTEL, S.; KADER, M.A.; BEGUM, S.A.; NEVE, S. Soil-organic-matter stability in Sandy cropland soils is related to land-use history. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 173, p.19-29, 2010.

SOMBROEK, W.G.; NACHTERGAELE, F.O.; HEBEL, A. Amounts, dynamics and sequestrations of carbon in tropical and subtropical soils. **Ambio**, Dordrecht, v. 22, p. 417–426, 1993.

SOUZA, J.L.; PREZOTTI, L.C.; MARTINS, A.P. Potencial de sequestro de carbono em solos agrícolas sob manejo orgânico para redução da emissão de gases de efeito estufa. **IDESIA**, Chile, v. 30, n. 1, p. 7-15, 2012.

STEVENSON, B.A.; PARFITT, R.L.; SCHIPPER, L.A.; BAISDEN, W.T.; MUDGE, P. Relationship between soil $\delta^{15}\text{N}$, C/N and N losses across land uses in New Zeland. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, 139, p.736-741, 2010.

TAIZ, L.; ZAIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3ª Edição. Porto Alegre: Editora Artmed, 722 p, 2006.

THOMAS, G.W. Exchangeable cations. In: PAGE, A.L. (ed.) **Methods of Soil Analysis, chemical and microbiological properties**. Soil Science Society of America, Madison, p.159-165, 1982.

URQUIAGA S.; CRUZ K. H. S.; BODDEY R. M. Contribution of nitrogen fixation to sugarcane: Nitrogen 15 and nitrogen balance estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 105-114, 1992.

URQUIAGA, S.; XAVIER, R. P.; MORAIS, R. B.; BATISTA, R. B.; SCHULTZ, N.; LEITE, J. M.; SÁ, J. M.; BARBOSA, K. P.; RESENDE, A. S.; ALVES, J. R.; BODDEY, R. M. Evidence from field nitrogen balance and ^{15}N natural abundance data for the contribution of biological N_2 fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 356, n. 1-2, p. 5–21, 2012.

VITAL, A.R.T.; GUERRINI, I.A.; FRANKEN, W.K.; FONSECA, R.C.B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 793-800, 2004.

WERTH, M.; KUZYAKOV, Y. ^{13}C fractionation at the root-microorganisms-soil interface: A review and outlook for partitioning studies. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 42, p.1372-1384, 2010.

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