

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**ESTOQUES E DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO
EM SOLOS SOB DIFERENTES COBERTURAS E USOS DE
TERRA EM PERNAMBUCO**

KENNEDY NASCIMENTO DE JESUS

Orientador: Prof. Dr. Everardo V. S. B. Sampaio

Recife, PE

Fevereiro, 2017

KENNEDY NASCIMENTO DE JESUS

**ESTOQUES E DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO
EM SOLOS SOB DIFERENTES COBERTURAS E USOS DE
TERRA EM PERNAMBUCO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Energéticas e Nucleares para
obtenção do título de Doutor em Ciências, Área
de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Everardo V. S. B. Sampaio

Recife, PE

Fevereiro, 2017

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

J58e

Jesus, Kennedy Nascimento de.

Estoques e dinâmica do carbono e nitrogênio em solos sob diferentes coberturas e usos de terra em Pernambuco. / Kennedy Nascimento de Jesus. - Recife: O Autor, 2017.

112 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. PhD. Everardo Valadares de Sá Barretto Sampaio.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2017.

Inclui referências bibliográficas.

1. Classes de solo. 2. Carbono total. 3. Nitrogênio total. 4. Argissolos. 5. Mudança de uso da terra. 6. Isótopos de ¹³C e ¹⁵N. I. Sampaio, Everardo Valadares de Sá Barretto, orientador. II. Título.

CDD 631.4 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2017-08

Estoques e Dinâmica do Carbono e Nitrogênio em Solos Sob Diferentes Coberturas e Usos de Terra em Pernambuco

Kennedy Nascimento de Jesus

APROVADA EM: 02.02.2017

ORIENTADOR: Prof. Dr. Everardo Valadares de Sá Barreto Sampaio

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Everardo Valadares de Sá Barreto Sampaio – DEN/UFPE

Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes – DEN/UFPE

Profa. Dra. Maria do Socorro Bezerra de Araújo – DCG/UFPE

Prof. Dr. Flávio Adriano Marques – EMBRAPA Solos-UEP Recife

Prof. Dr. Luís de França da Silva Neto – EMBRAPA Solos-UEP Recife

Visto e permitida a impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

*Aos meus avós, **José Eugênio e Genésia Vieira**, pelos
melhores ensinamentos da vida.*

“In memoriam”

Dedico

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por manter inabalável a minha fé e por me mostrar, através da ciência, a perfeição da natureza;

À minha mãe, Elcy Nascimento, pelo exemplo de garra e determinação, por ensinar-me o sentido da família, do amor e da importância que a educação tem em nossas vidas;

Aos meus avós, meu pai e irmãos, meus tios e tias, primos e primas que, mesmo distante, sempre estiveram torcendo pelo meu sucesso;

Ao Prof. Everardo Sampaio, agradeço profundamente pela orientação, pelo estímulo, esclarecimentos, sugestões e correções oportunamente apresentadas, a permanente disponibilidade e o voto de confiança e amizade durante a realização deste trabalho. Serei eternamente grato;

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN);

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Doutorado no Brasil e pelo financiamento da pesquisa nos Estados Unidos da América (EUA) na *Texas A&M University* (TAMU), através do projeto de cooperação internacional CAPES/TAMU, “*Influência do Uso da Terra na Ecohidrologia e Biogeoquímica da Caatinga Brasileira*” (« *The Influence of Land Use on the Ecohydrology and Biogeochemistry of the Brazilian Caatinga* »), (Processo 10002-14-6 CAPES/TAMU, 2014.1 *Doutorado Sanduíche*);

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro e logístico, principalmente através dos projetos “*Estoques de Carbono na Vegetação e no Solo em Áreas com Diferentes Usos da Terra em Pernambuco*” (CNPq Universal, 14/2012, Processo 473449/2012-9), “*Impactos de Mudanças Climáticas sobre a Cobertura e Uso da Terra em Pernambuco: Geração e Disponibilização de Informações para o Subsídio de Políticas Públicas*” (Processo APQ-0.077-5, 01/09, edital 05-2010) e “*Estoque vertical de carbono orgânico estável em diferentes solos, biomas e uso da terra no estado de Pernambuco*” (FACEPE/CAPES - Processo 0199-3.09/12);

Aos membros do Comitê de Acompanhamento do Doutorado, Prof. Rômulo Menezes, Prof. Flávio Marques e o Pesq. Dário Primo, pelas inúmeras contribuições, sugestões e correções durante a realização desse trabalho;

Aos professores Antônio Antonino (UFPE) e Jason West (TAMU), por todo o apoio nas etapas que antecederam o intercâmbio e pela orientação durante o período do *Doutorado sanduíche* nos Estados Unidos (EUA);

Aos pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), especialmente à Vanderlise Giongo (EMBRAPA – Semiárido) e Luciano Accioly (EMBRAPA – Solos, UEP Recife), pelo suporte nas análises laboratoriais e identificação das áreas de amostragem do projeto;

Aos Pesquisadores e funcionários da Associação Plantas do Nordeste (APNE), especialmente ao Eng. Ftal. Frans Pareyn, que contribuiu efetivamente nas atividades de campo e nas discussões do projeto;

Ao Pedólogo Elmo Clark, pela fundamental ajuda na identificação das classes de solo e aos Professores Gustavo Duda, da Unidade Acadêmica de Garanhuns (UAG – UFRPE) e Plínio Camargo, do Centro de Energia Nuclear da Agricultura (CENA – USP), pelas contribuições nas análises laboratoriais;

A todos do Departamento de Energia Nuclear (DEN – UFPE), professores, funcionários, estagiários, colaboradores e colegas de pós-graduação pelo acolhimento, convivência e amizade; em especial à Claudenice Maria, Gilberto Eloi, Pedro Antônio, Patryk Melo, Eliza Albuquerque, Rodrigo Lustosa, Júlio Martins, Emmanuel Dutra, Taciana Santos, Mona Vasconcelos, Monaliza Andrade, Diego Marcelino, Natache Ferrão, Nilson Medeiros, Mônica Santana, Tânia Lúcia, Carol Gonzáles, Girleyde Lima, Wiliane Costa, Uemeson Santos, Raphael Correia, Edilândia Dantas, Gabriela Santiago, Alice Sabrina, Fernando Pinto, Tiago Diniz, Erick Xavier, Renata Souza, Andrea Avelino, Benaia Barros, Ana Dolores, Josenildo, Zacarias, Nilvânia Monteiro e Kalidja;

As pessoas especiais que fazem parte das nossas vidas através de pequenos gestos de carinho e ajuda, e que colaboraram de forma direta ou indireta para realização deste trabalho; em particular à amiga Eline Lima, a quem tenho um enorme apreço;

Aos agricultores que permitiram as coletas das amostras de solo em suas propriedades e forneceram informações importantes para essa pesquisa;

E a todos que de alguma forma contribuíram na elaboração deste trabalho.

A todos vocês, MUITO OBRIGADO!

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

A conversão de áreas de vegetação nativa em áreas destinadas à exploração agropecuária é apontada como um dos principais fatores responsáveis pelas emissões de Gases de Efeito Estufa para a atmosfera. Essas mudanças no uso da terra causam na paisagem um mosaico de áreas com diferentes usos e coberturas do solo. Porém, ainda é limitado o conhecimento da dinâmica do carbono (C) e do Nitrogênio (N) do solo nesses sistemas, principalmente na região Nordeste do Brasil. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi determinar as alterações dos estoques e da dinâmica do C e N no solo devido às mudanças de uso da terra nas diferentes regiões fisiográficas e nas principais classes de solo de Pernambuco. Foram realizados três estudos, que auxiliaram no alcance do objetivo proposto: 1) no primeiro, foi realizado um levantamento e compatibilização da literatura sobre os estoques de C na camada superficial (0-30 cm) dos solos de Pernambuco. 2) no segundo estudo, foram quantificados os estoques de carbono (*in situ*) e sua distribuição nas camadas ao longo do perfil do solo (0-100 cm) em áreas de vegetação nativa, agrícolas e pasto, nas principais regiões fisiográficas e classes de solo do Estado; e 3) no terceiro, foram avaliados a dinâmica do C e do N, através da abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ e das concentrações de C e N em perfis (0-100 cm) de Argissolos ao longo de um gradiente climático em Pernambuco em áreas representativas de floresta nativa, de pasto e agrícolas. Em todos os estudos, as áreas de vegetação nativa foram tomadas como condição original do solo de acordo com cada região estudada. Nos estudos 2 e 3 quantificou-se as concentrações de C e N por meio de analisador elementar CHN e no estudo 3 foram quantificadas a abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos Argissolos do Estado, por meio de espectrômetro de massa. Aproximadamente 368 Tg de C estão estocados nos solos de Pernambuco de 0-30 cm. De uma forma geral, os maiores estoques de carbono total ocorreram nas vegetações nativas densas e decresceram da região úmida à semiárida Oeste, com grandes variações entre as classes de solos. A substituição da vegetação nativa para implantação de áreas de pastagens ou agrícolas acarretou mudanças no sinal $\delta^{13}\text{C}$ do solo, sendo maiores nas áreas úmidas e subúmidas do estado em relação às áreas semiáridas. O enriquecimento de $\delta^{15}\text{N}$ encontrado na superfície do solo das regiões semiáridas em relação às áreas úmidas e subúmidas estão associados as menores concentrações de C e N presentes nos Argissolos dessa região, em decorrência das maiores temperaturas e menores precipitações pluviais. Fica evidente que a intervenção humana nessas áreas através de práticas agropecuárias, reduz os estoques e modificam a dinâmica do C e do N no solo, e para se contrapor a esta situação no Estado, são necessárias medidas mitigatórias, como a adoção de sistemas conservacionistas do solo e da água, através de políticas públicas de incentivo às práticas conservacionistas em substituição à agricultura de baixo C.

Palavras-chave: Carbono total. Nitrogênio total. Classes de solo. Argissolos. Mudança de uso da terra. Isótopos de ^{13}C e ^{15}N .

ABSTRACT

The conversion of native vegetation areas into agricultural areas is pointed out as one of the main factors responsible for the emissions of greenhouse gases to the atmosphere. Changes in land use create a mosaic of areas in the landscape with different soil coverages and knowledge of the dynamics of C and N in these systems is limited. The objective of this work was to determine the changes in soil carbon (C) and nitrogen (N) stocks and dynamics due to changes in land use in the different physiographic regions and in the main soil classes of Pernambuco state. Three studies were carried out: 1) the first was a survey and compatibilization of the literature on C stocks in the surface layer (0-30 cm) of the soils of Pernambuco; 2) the second study was a quantification of the C stocks along the different layers of the soil profile (0-100 cm) in areas under native vegetation, agriculture and pasture, in the main physiographic regions and soil classes of Pernambuco; and 3) the third study evaluated soil C and N dynamics through the natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the concentrations of C and N in profiles of Ultisols (0-100 cm) along a climatic gradient in Pernambuco. In all studies, dense native vegetation areas were taken as the original, reference soil condition. In studies 2 and 3 the concentrations of C and N were quantified using CHN elemental analyzer. In study 3 the natural abundance of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were quantified by mass spectrometer. Approximately 368 Tg of carbon are stored in the soils of Pernambuco in the 0-30 cm layer. The largest total carbon stocks occurred under dense native vegetation and decreased from the humid region towards the semi-arid western state region, with large variations among soil classes. The replacement of the native vegetation by agriculture or pasture caused changes in the soil $\delta^{13}\text{C}$ signal, being greater in the humid areas and subhumid regions than in the semi-arid region. The enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ in the soil surface layer of the semi-arid regions in relation to the humid and subhumid regions is associated with the lower concentrations of C and N in these regions, due to their higher temperatures and lower rainfall. It is evident that Human intervention in these areas through conventional farming practices reduces soil carbon stocks at levels lower than those found in native areas, and modifies the C and N dynamics in the soil in these regions. To counteract this situation in the State, mitigating measures are necessary, such as the adoption of soil and water conservation systems, through public policies to encourage conservation practices in place of low carbon agriculture.

Keywords: Total carbon. Total nitrogen. Soil classes. Ultisols. Change of land use. Isotopes of ^{13}C and ^{15}N .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização geográfica do estado de Pernambuco e suas regiões fisiográficas	36
Figura 2 - Características climáticas das regiões fisiográficas do Estado de Pernambuco.	38
Figura 3 - Classes de solos mais representativas de Pernambuco.	39
Figura 4 - Valores de densidade do solo coletados de 1997 a 2012 em trabalhos publicados em áreas de Pernambuco na camada de 0-30 cm sob diversos usos e cobertura da terra.	43
Figura 5 - Mapa do Estado de Pernambuco com a localização dos perfis de solos utilizados para a estimativa dos estoques de carbono.	44
Figura 6 - Distribuição dos pontos amostrais no estado de Pernambuco.	46
Figura 7 - Imagem com a demarcação dos diferentes usos da terra em um Latossolo.	48
Figura 8 - Mapa de uso e cobertura da terra em Pernambuco.	50
Figura 9 - Trincheira para coleta de amostras de solo.	52
Figura 10 - Análises de CT pelo método da combustão seca em um analisador elementar de CHN.	53
Figura 11 - Estoques médios de C (Mg ha^{-1}) na camada de 0-30 cm nos solos do Brasil e de Pernambuco.	64
Figura 12 – Médias dos estoques de C no solo de 0 a 30 cm, sob diferentes usos e coberturas da terra no estado de Pernambuco. Barras representam o erro padrão da média.	65
Figura 13 - Distribuição em profundidade do C do solo sob diferentes usos e coberturas da terra na Zona da Mata de Pernambuco.	67
Figura 14 - Distribuição em profundidade do C do solo sob diversos usos e coberturas da terra na Zona do Agreste de Pernambuco.	68
Figura 15 - Distribuição em profundidade do C do solo sob diversos usos e coberturas da terra na Zona do Sertão leste de Pernambuco.	69
Figura 16 - Distribuição em profundidade do C do solo sob diversos usos e coberturas da terra na Zona do Sertão oeste de Pernambuco.	70
Figura 17 - Redução nos estoques de CT em função das mudanças no uso da terra nas regiões fisiográficas de Pernambuco.	76
Figura 18 - Teores de C (%) em perfis de Argissolos sob diferentes usos terra nas diferentes regiões fisiográficas de Pernambuco.	78
Figura 19 - Carbono e nitrogênio totais do solo (0-20 cm) em função da precipitação pluvial média anual, em diferentes usos e coberturas da terra em Argissolos de Pernambuco. .	79

Figura 20 - Teores de N (%) em perfis de Argissolos sob diferentes usos e cobertura da terra nas diferentes mesorregiões do estado de Pernambuco.	82
Figura 21 - Nitrogênio total do solo (0-20 cm) em função do carbono orgânico total do solo sob vários usos e coberturas em Argissolos de Pernambuco.....	83
Figura 22 - Composição isotópica de ^{13}C (‰) em perfis de Argissolos sob diferentes usos e cobertura da terra nas diferentes regiões do estado de Pernambuco.	86
Figura 23 - Variação dos valores de ^{15}N (‰) em perfis de Argissolos sob diferentes usos e cobertura da terra nas diferentes mesorregiões do estado de Pernambuco.	88
Figura 24 - Abundância natural de ^{15}N do solo (0-20 cm) em função da precipitação pluvial, altitude, carbono total e nitrogênio total do solo sob diversos usos e coberturas em Argissolos de Pernambuco.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das principais classes de solos presentes no estado de Pernambuco.	40
Tabela 2 - Trabalhos utilizados para o levantamento dos estoques de C dos solos de Pernambuco.....	42
Tabela 3 - Estratificação do estado de Pernambuco em regiões fisiográficas, classes de solos e usos e cobertura da terra mais representativos.....	47
Tabela 4 - Características dos principais sistemas de uso e cobertura da terra nas diferentes regiões fisiográficas e classes de solos do estado de Pernambuco.....	49
Tabela 5 - Área dos diferentes tipos de uso e cobertura das terras de Pernambuco e proporção em relação à área total do Estado.....	51
Tabela 6 - Abrangência da classe dos Argissolos no Estado de Pernambuco.....	56
Tabela 7 - Principais usos e coberturas vegetais existentes em áreas de predominância de Argissolos no estado de Pernambuco, com algumas de suas características.....	57
Tabela 8 - Localização dos pontos amostrais de Argissolos em Pernambuco.....	58
Tabela 9 - Estoques de C (0 a 30 cm de profundidade) por unidade de área e para áreas cobertas no território de Pernambuco, classe de solo, número de perfis (n) e erro padrão da média (s(m)).....	61
Tabela 10 - Estoques de carbono total ($Mg\ ha^{-1}$) na camada de 1 m de profundidade, em solos sob diferentes usos e coberturas da terra em Pernambuco.....	71
Tabela 11 - Estoques de CT ($Mg\ ha^{-1}$) em camadas de solos sob diferentes usos e coberturas da terra em Pernambuco.....	73
Tabela 12 - Relação C:N em perfis de Argissolos sob diferentes usos e coberturas da terra nas diferentes regiões do estado de Pernambuco.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

^{12}C	Isótopo estável de carbono 12	
^{13}C	Isótopo estável de carbono 13	
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	Razão isotópica $^{13}\text{C}: ^{12}\text{C}$	
^{14}C	Isótopo radioativo de carbono 14	
^{14}N	Isótopo estável de nitrogênio 14	
^{15}N	Isótopo estável de nitrogênio 15	
C	Carbono	
C/N	Relação carbono: nitrogênio	
C ₃	Ciclo fotossintético C ₃	
C ₄	Ciclo fotossintético C ₄	
CAM	Ciclo fotossintético CAM (<i>Crassulacean Acid Metabolism</i>)	
CO	Carbono orgânico	
CO ₂	Dióxido de carbono	
COS	Carbono orgânico do solo	
COT	Carbono orgânico total	
CT	Carbono total	
D _s	Densidade do solo	[g cm ⁻³]
FBN	Fixação biológica de nitrogênio	
GEE	Gases de efeito estufa	
MOS	Matéria orgânica do solo	
N	Nitrogênio	
N ₂	Nitrogênio elementar (atmosférico)	
N ₂ O	Óxido nitroso	
NH ₄ ⁺	Nitrogênio em sua forma mineral amoniacal	
NO	Óxido nítrico	
NO ₃ ⁻	Nitrogênio em sua forma mineral nítrica	
NT	Nitrogênio total	
PDB	<i>Pee Dee Belemnite</i> (Padrão internacional do carbono)	
PEPcase	Enzima de carboxilação fosfenolpiruvato carboxilase (plantas C ₄)	
Pg	Petagrama (1 Pg = 10 ¹⁵ g, ou um bilhão de toneladas)	
ppm	Partes por milhão	

RuBisCo	Enzima de carboxilação ribulose-1,5 bifosfato carboxilase (plantas C ₃)	
Tg	Teragrama (1 Tg = 10 ¹² g, ou 1 milhão de toneladas)	
δ	Desvio em relação ao padrão	[‰]
δ ¹³ C	Desvio em relação ao padrão de ¹³ C	[‰]
δ ¹⁵ N	Desvio em relação ao padrão de ¹⁵ N	[‰]

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Ciclos biogeoquímicos do carbono (C) e nitrogênio (N).....	20
2.1.1 Ciclo do C.....	20
2.1.2 Ciclo do N.....	21
2.2 A matéria orgânica do solo (MOS)	23
2.2.1 Fatores determinantes no estoque de MOS	24
2.2.1.1 <i>Textura e mineralogia do solo</i>	24
2.2.1.2 <i>Clima</i>	25
2.2.1.3 <i>Uso e cobertura da terra</i>	26
2.3 Isótopos estáveis de ¹³C e ¹⁵N no estudo da MOS	29
2.3.1 Abundância natural de ¹³ C.....	29
2.3.1.1 <i>Fracionamento isotópico de carbono pelas plantas</i>	30
2.3.1.2 <i>Ciclos fotossintéticos C₃, C₄ e CAM</i>	31
2.3.2 Abundância natural de ¹⁵ N	33
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1 Caracterização das áreas de estudo	36
3.1.1 Localização, limites e área.....	36
3.1.2 Regiões fisiográficas e características edafoclimáticas	37
3.1.3 Distribuição dos solos.....	39
3.2 Estudo 1 - Levantamento dos estoques de carbono nos solos de Pernambuco.	41
3.2.1 Estimativas dos estoques de C do solo	41
3.3 Estudo 2 - Distribuição em profundidade e estoques de carbono em solos sob diferentes coberturas e usos da terra em Pernambuco.....	45
3.3.1 Delineamento da área de estudo	45
3.3.2 Levantamento das classes de solos e coberturas vegetais existentes.....	47
3.3.2.1 <i>Usos e coberturas da terra</i>	49

3.3.3 Coleta das amostras de solo.....	51
3.3.4 Processamento e análise das amostras de solo	52
3.3.4.1 Cálculo dos estoques de C do solo.....	53
3.3.5. Análise dos dados	55
3.4 Estudo 3 - Carbono, nitrogênio e abundância natural ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) do solo sob diferentes usos ao longo de um gradiente climático em Pernambuco.	55
3.4.1 Levantamento dos Argissolos e das coberturas vegetais existentes.....	56
3.4.2 Coleta das amostras de solo.....	58
3.4.3 Processamento e análise das amostras de solo	59
3.4.4. Análise dos dados	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1 Estudo 1 - Levantamento dos estoques de carbono nos solos de Pernambuco.	61
4.1.1 Estoques de C por classe de solo	61
4.1.2 Estoques de C no solo por uso e cobertura da terra.....	64
4.2 Estudo 2 - Distribuição em profundidade e estoques de carbono em solos sob diferentes coberturas e usos da terra em Pernambuco.....	66
4.2.1 Distribuição do C no solo em profundidade.....	66
4.2.2 Estoques totais de C no solo	70
4.3 Estudo 3 - Carbono, nitrogênio e abundância natural ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) do solo sob diferentes usos ao longo de um gradiente climático em Pernambuco.	77
4.3.1 Carbono total	77
4.3.2 Nitrogênio total.....	81
4.3.3 Relação C: N.....	83
4.3.4 Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$	85
4.3.5 Abundância natural de $\delta^{15}\text{N}$	88
5 CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

A atual preocupação com as mudanças climáticas globais decorrentes do aumento nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, em especial do gás carbônico (CO₂), tem despertado a atenção da comunidade científica para o ciclo biogeoquímico do carbono (C). O gás carbônico é responsável por cerca de 70% do potencial de elevação da temperatura terrestre (IPCC, 2007). Nos últimos 250 anos, a concentração desse gás na atmosfera aumentou 38%, alcançando os atuais 402 ppm, o mais alto nível observado nos últimos 420 mil anos (NOAA, 2016).

A conversão de áreas de vegetação nativa em áreas destinadas à exploração agropecuária é apontada como um dos principais fatores responsáveis pelas emissões de CO₂ para a atmosfera (LAL, 2001). A agricultura e a pecuária são as principais atividades relacionadas com o uso dos solos, e mudanças decorrentes de práticas de manejo inadequadas, podem levar a um rápido declínio dos estoques de C e nitrogênio (N) do solo, colaborando para o aumento das emissões de GEE para a atmosfera e intensificando o efeito estufa sobre o globo terrestre (FREIXO *et al.*, 2002).

Nas últimas décadas, os ecossistemas terrestres vêm sendo considerados tão importantes quanto os oceanos na retirada (sequestro) e no armazenamento (estoque) de C da atmosfera, mitigando o efeito estufa. O maior compartimento de C dos ecossistemas terrestres são os solos, contendo quantidades que superam em até quatro vezes as presentes na biomassa vegetal e em mais de duas vezes as presentes na atmosfera do planeta (WATSON *et al.*, 2000). Cerca de 2.050 Pg de carbono (1 Pg = 10¹⁵g, ou um bilhão de toneladas) estariam armazenados nos ecossistemas terrestres, dos quais 70% estariam nos solos (WATSON *et al.*, 1990). A quantidade de C estocada no solo até um metro de profundidade estaria em torno de 1.576 Pg, distribuídos em 12,8 bilhões de hectares, nos continentes (ESWARAN *et al.*, 1993). Quando se consideram apenas os 30 cm superficiais de solo, o estoque seria de 800 Pg (CERRI *et al.*, 2006), ou seja, quase a mesma quantidade armazenada no compartimento atmosférico.

Estima-se que a metade do C estocado no solo (0-100 cm), ou seja, cerca de 787 Pg, esteja relacionada aos solos sob florestas (DIXON *et al.*, 1994), enquanto as áreas sob pastagens conteriam cerca de 500 Pg (SCHARPENSEEL, 1997) e as sob cultivo agrícola 170 Pg de C (PAUSTIAN *et al.*, 2000).

Estimativas para todo o território do Brasil (850 milhões de ha) mostraram estoques de C em torno de 36,4±3,4 Pg na camada de 0–30 cm de solo (BERNOUX *et al.*, 2002), o que

corresponde a aproximadamente 40% de todo o C armazenado nos solos da América Latina (BERNOUX e VOLKOFF, 2006). Se for considerada a profundidade de 0 a 100 cm, os estoques seriam da ordem de 65,9 a 67,5 Pg de C, dos quais 65% estariam na região amazônica brasileira (BATJES, 2005). Na região semiárida do Nordeste (98 milhões de ha), Sampaio e Costa (2011) estimaram os estoques de C na camada superficial do solo (0-20 cm) como sendo 2,8 Pg e na camada de 20 aos 100 cm, 6,0 Pg; totalizando 8,8 Pg de 0 a 100 cm.

A principal via de entrada do C derivado do CO₂ da atmosfera para o solo é a deposição dos resíduos vegetais e animais, formados inicialmente pela fotossíntese. Parte deste carbono acumula-se, formando a matéria orgânica do solo (MOS), que é o mais importante reservatório de C nos ecossistemas terrestres (ROSCOE *et al.*, 2006). Nos ecossistemas naturais, a fonte de carbono orgânico (CO) do solo tem como principal origem, os resíduos da vegetação nativa, enquanto nos agroecossistemas o carbono total (CT) pode ser derivado do material orgânico remanescente da vegetação nativa, da decomposição do sistema radicular das culturas agrícolas, da aplicação de calcário e da adubação orgânica (CARVALHO *et al.*, 2009).

A importância do conhecimento da MOS, bem como sua relação com o manejo e uso da terra, visa desenvolver estratégias para utilização sustentável dos solos, para reduzir o impacto das atividades agrícolas sobre o ambiente. Isso se torna imprescindível na região do presente estudo, visto que os cultivos agrícolas e as pastagens principalmente na região semiárida do Estado são, na maioria das vezes, formados após a retirada da vegetação nativa pelo uso do fogo e em áreas declivosas sem um manejo adequado dos solos (SAMPAIO e COSTA, 2011). Neste cenário, a exploração desordenada e a retirada da cobertura vegetal intensificam o processo erosivo, culminando com a diminuição da fertilidade dos solos, em decorrência da redução da MOS. Consequentemente, o uso agropecuário é comumente seguido pelo abandono das áreas, ocorrendo então a regeneração da vegetação nativa. Essa dinâmica causa na paisagem um mosaico de áreas com diferentes usos e coberturas do solo, e é limitado o conhecimento da dinâmica do C e N do solo nesses sistemas. Vários fatores podem influenciar essa dinâmica, como o tipo de solo, o clima e o manejo agropecuário.

As dinâmicas de C e de N dos solos podem ser estudadas usando os isótopos estáveis ¹³C e ¹⁵N, especialmente úteis considerando as diferentes fontes e a complexidade de seus ciclos biogeoquímicos (ALVES *et al.*, 2005). As avaliações da dinâmica são baseadas na abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e de $\delta^{15}\text{N}$ da MOS (BUSTAMANTE *et al.*, 2004; SISTI *et al.*, 2004; ALVES *et al.*, 2005; JANTALIA *et al.*, 2007). O $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$ quantificados através de técnicas isotópicas têm sido bons indicadores do tipo de vegetação existente, e das modificações a que uma área foi submetida. Em regiões tropicais, esta técnica tem sido utilizada nos estudos de

ciclagem da MOS em médio prazo, onde florestas (ciclo fotossintético C₃) foram substituídas por culturas do ciclo fotossintético C₄ (JANTALIA *et al.*, 2007; PINHEIRO *et al.*, 2010, COSTA JUNIOR *et al.*, 2011a, b).

Nesse sentido, a presente pesquisa baseia-se na hipótese de que a mudança de uso da terra, através da adoção de novos sistemas agropecuários, controlam a capacidade de acumular C e N, a distribuição em profundidade e a taxa de sequestro das classes de solos em função das diferentes regiões climáticas do estado de Pernambuco.

Sabendo-se que as mudanças no uso da terra causam na paisagem um mosaico de áreas com diferentes usos e coberturas do solo, e que é limitado o conhecimento da dinâmica do C e N do solo nesses sistemas e da importância desse tipo de conhecimento para mitigação da mudança climática global, o objetivo desse trabalho foi determinar as alterações dos estoques e da dinâmica do C e N no solo devido às mudanças de uso da terra nas diferentes regiões fisiográficas e nas principais classes de solo do estado de Pernambuco.

Para tal, serão apresentados três trabalhos, que irão auxiliar na obtenção do objetivo proposto.

- Estudo 1 – Levantamento dos estoques de carbono nos solos de Pernambuco;
- Estudo 2 – Distribuição em profundidade e estoques de C em solos sob diferentes coberturas e usos da terra em Pernambuco;
- Estudo 3 – Concentrações de C, N e abundância natural ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) em Argissolos sob diferentes usos ao longo de um gradiente climático em Pernambuco.

O primeiro estudo refere-se ao levantamento e compatibilização da literatura sobre os estoques de C na camada superficial (0-30 cm) dos solos de Pernambuco, realizado através de uma ampla revisão de trabalhos publicados na literatura especializada, em boletins exploratórios de levantamentos de solos e em periódicos científicos, buscando contribuir com informações mais detalhadas sobre os estoques de C do Nordeste.

O Segundo estudo traz a quantificação dos estoques de carbono (*in situ*) e sua distribuição nas camadas ao longo do perfil do solo (0-100 cm) em áreas de vegetação nativa, cultivos agrícolas e áreas de pastagens, nas principais regiões fisiográficas e classes de solo do estado de Pernambuco.

O terceiro e último estudo avalia a dinâmica do C e do N, através da abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, e das concentrações de C e N em perfis de Argissolos ao longo de um gradiente climático em Pernambuco em áreas representativas de floresta nativa, de pasto e agrícolas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Ciclos biogeoquímicos do carbono (C) e nitrogênio (N)

A dinâmica dos ecossistemas depende da interação entre os ciclos biogeoquímicos, os quais podem ser modificados pelas atividades humanas. As mudanças no uso da terra, por exemplo, modificam profundamente os processos biogeoquímicos do solo, com reflexos no estoque de C, na disponibilidade de N e na emissão de gases para a atmosfera (LIMA *et al.*, 2000). Para amortizar o impacto das atividades humanas sobre o ambiente é necessário um entendimento da dinâmica global, regional e local de cada ciclo individualmente e das relações entre eles (CANADELL *et al.*, 2000).

2.1.1 Ciclo do C

Entende-se por ciclo biogeoquímico do C o conjunto de processos responsáveis por retirar C de um determinado compartimento (reservatório), fazê-lo participar de compostos e reações em outros compartimentos e após algum tempo devolvê-lo ao compartimento de origem (PACHECO e HELENE, 1990). Na Terra, existem vários compartimentos de C e, dentre eles, os principais são: os oceanos, as formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral, os ecossistemas terrestres (biota + solo) e a atmosfera (SCHLESINGER, 1997; GRACE, 2001). Desses, o maior compartimento são os oceanos com 38.000 Pg C, seguido do compartimento presente nas formações geológicas (5.000 Pg C). O carbono das formações geológicas consiste de 4.000 Pg C presentes no carvão, 500 Pg C no petróleo e 500 Pg C no gás natural (o carbono estocado nesses combustíveis fósseis não é permutável naturalmente, ocorrendo isto apenas com a interferência humana). O compartimento de carbono do solo (2.500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1.500 Pg C) e mineral (1.000 Pg C).

Apesar da vegetação constituir um reservatório bastante limitado de carbono, é responsável pelo fluxo mais intenso no ciclo biogeoquímico. Através da fotossíntese estima-se que a produção primária sequestre anualmente cerca de 120 Pg C na forma de CO₂ da atmosfera, sendo que 60 Pg C retornam à atmosfera como respiração dos tecidos vivos. Acredita-se que os outros 60 Pg C também retornem à atmosfera por meio da decomposição da MOS (SCHLESINGER, 1997).

Os estoques de carbono nos solos sob florestas nativas estão em equilíbrio dinâmico com o carbono na atmosfera, na vegetação e nos oceanos. Esses estoques são determinados principalmente pelo clima, pelo relevo, pela vegetação e pela textura e composição mineralógica dos solos, além das interações destes, como explícito pelos fatores de formação dos solos (JENNY, 1994). A magnitude da variação destes estoques sob vegetação nativa é bastante significativa: regiões de maior latitude, de climas úmidos e sob florestas apresentam maiores estoques de C, sendo os menores estoques encontrados em regiões de clima árido e semiárido (POST *et al.*, 1982).

A queima de combustíveis fósseis e o desmatamento de florestas nativas pela queima para uso agrícola, pastoril e para uso de madeiras, são apontados como os principais responsáveis pelo crescente aumento de CO₂ na atmosfera. As florestas contêm de 20 a 100 vezes mais carbono por unidade de área que as plantações ou pastos. Com o desmatamento o carbono originalmente contido na vegetação e nos solos é liberado para a atmosfera em forma de CO₂. Somente uma quantidade relativamente pequena de carbono é redistribuída na Terra ou levada pelos rios (IPCC, 2007).

Estima-se que a queima de combustíveis fósseis represente um incremento de CO₂ para a atmosfera da ordem de 6 Pg C ano⁻¹. Já as emissões de carbono provenientes de mudanças de uso da terra são de menor magnitude, cerca de 0,9 Pg C ano⁻¹ (VITOUSEK, 1992), porém sujeitas a consideráveis incertezas e divergências (KREILEMAN e BOUWMAN, 1994).

2.1.2 Ciclo do N

Assim como os demais ciclos biogeoquímicos, o ciclo do nitrogênio também tem seus reservatórios e seus fluxos e processos pelos quais o nitrogênio troca de reservatório. A disponibilidade de nitrogênio no ambiente controla o funcionamento de ecossistemas locais e da biogeoquímica global (SCHLESINGER, 1997). A maior parte do N encontra-se na atmosfera, na qual ocupa cerca de 78% do volume. Os estoques de nitrogênio orgânico no solo e na biota terrestre são insignificantes quando comparados ao estoque da atmosfera. Pequenas quantidades de N são encontradas também nos oceanos, rochas e sedimentos (CHAPIN *et al.*, 2002).

Embora 78% da atmosfera da Terra sejam compostas por nitrogênio molecular, esse importante reservatório está indisponível diretamente para animais e plantas. A fixação do nitrogênio é um processo de redução do nitrogênio atmosférico (N₂) a amônia (NH₃). A

capacidade de fixar nitrogênio é encontrada apenas em alguns seres procariontes (COSTA *et al.*, 2009).

Pode-se dividir a ciclagem biogeoquímica de N nos ecossistemas em função dos seus processos, chamados de externos e internos. Os externos acrescentam ou retiram N dos ecossistemas. Já os processos internos ciclam N entre os estoques dos ecossistemas (SCHIMMEL e BENNETT, 2004). O N pode ingressar no sistema solo-planta por deposições atmosféricas (através de descargas elétricas), fixação biológica e adubações minerais ou orgânicas. Por outro lado, pode sair por meio de remoção pelas culturas e variados mecanismos de perdas, que incluem a lixiviação, a volatilização e a desnitrificação (COSTA *et al.*, 2009). Descargas elétricas na atmosfera incorporam N ao solo pela transformação do nitrogênio elementar (N_2) em óxidos que são convertidos em ácido nítrico, dissolvido na água das chuvas, resultando em nitratos aproveitáveis pelas plantas (ODUM, 1983; MATSON *et al.*, 1999). A fixação do N do ar pode ser mediada por micro-organismos livres do solo e por micro-organismos que vivem em simbiose com as plantas. Todo N acumulado na planta somente é incorporado ao solo à medida em que os resíduos de raízes, folhas, galhos, cascas e troncos forem decompostos (ODUM, 1983; CLEVELAND *et al.*, 1999).

Do N existente no solo, cerca de 95 a 98% encontram-se na forma orgânica, que, para ser aproveitada pelas plantas, necessita ser transformada para as formas inorgânicas (NH_4^+ e NO_3^-) pelo processo de mineralização. A formação de NH_4^+ acontece devido à mineralização da matéria orgânica por microrganismos heterotróficos em condições redutoras (amonificação), já o NO_3^- é formado pela oxidação do NH_4^+ através das bactérias aeróbias do gênero *Nitrossomonas* e *Nitrobacter* (nitrificação). O NO_3^- raramente é adsorvido às partículas do solo, tem grande mobilidade na solução do solo e pode ser perdido via lixiviação e emissão gasosa. A absorção pelas plantas depende da densidade radicular e suas reservas podem ser utilizadas de forma eficiente. Já o NH_4^+ é adsorvido na argila e na matéria orgânica, possui baixa mobilidade e célere empobrecimento nas proximidades das raízes. Logo, a utilização de reservas de NH_4^+ depende mais do crescimento de densidade radicular que a do NO_3^- (SPRENT, 1987).

Antes da interferência mais efetiva do homem no ciclo do N, provavelmente de 90 a 130 milhões de toneladas de N eram fixados biologicamente a cada ano (VITOUSEK *et al.*, 1997). No último século, as atividades humanas tem duplicado as quantidades de N ciclado entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. Enquanto a queima de combustíveis fósseis libera para a atmosfera quantidades de N superiores a 20 Tg a cada ano, a fixação de N_2 atmosférico em fertilizantes aumentou de 10 Tg ano⁻¹, em 1950, para 80 Tg ano⁻¹, em 1990, sendo esperado

para o ano 2030 uma fixação maior que 135 Tg ano^{-1} (VITOUSEK *et al.*, 1997). Como consequências da alteração no ciclo do N é possível observar: aumento na concentração global de NO e N₂O em decorrência da fertilização de solos; intensificação nos eventos de chuva ácida e poluição fotoquímica; aumento na produtividade e nos estoques de C em regiões onde N é limitante; favorecimento de invasão biológica e redução da diversidade; perdas por lixiviação e eutrofização de corpos d'água (HALL *et al.*, 1996; RUSSOW *et al.*, 2000).

2.2 A matéria orgânica do solo (MOS)

Dentre os constituintes do solo, a matéria orgânica do solo (MOS), principalmente o carbono orgânico total (COT), exerce papel fundamental na preservação de sua qualidade e na manutenção de suas funções ecológicas. A MOS consiste de uma mistura de compostos em vários estágios de decomposição, que resultam da degradação biológica de resíduos de plantas e animais, e da atividade sintética de microrganismos (STEVENSON, 1994). Os constituintes principais da matéria orgânica são o carbono (52 - 58%), oxigênio (34 - 39%), hidrogênio (3,3 - 4,8%) e nitrogênio (3,7 - 4,2%) (SILVA *et al.*, 2004). Devido às relações com outros componentes do ambiente, a qualidade e a quantidade de MOS são definidas pelo ambiente de formação, sendo sensível às alterações provocadas no solo. Dessa forma, a remoção da vegetação nativa para uso agrícola e/ou pastoril da terra e determinadas práticas de manejo do solo podem contribuir para o decréscimo ou acúmulo de MOS. A perda de quantidade e qualidade de MOS contribui para a degradação do solo, e a sua recuperação, na maioria dos casos, está relacionada com a promoção do aumento do conteúdo de MOS (STEVENSON, 1994).

O carbono orgânico é obtido pelas plantas através da fixação fotossintética do CO₂ da atmosfera. O oxigênio e o hidrogênio acompanham o metabolismo do carbono e são obtidos da água também no processo de fotossíntese das plantas. Porém, o nitrogênio, essencial às plantas, de modo geral, não faz parte do material de origem do solo. O conteúdo de nitrogênio mineral encontrado em solução é produto ou da adição de fertilizantes ou de transformações do nitrogênio orgânico em formas inorgânicas através da mineralização da matéria orgânica, sendo encontrado em solução e absorvido pelas plantas principalmente na forma mineral, nítrica (NO₃⁻) ou amoniacal (NH₄⁺) e, excepcionalmente em outras formas orgânicas como ácidos aminados e vitaminas (MOREIRA e SIQUEIRA, 2003).

Dentro do conceito de qualidade do solo, a matéria orgânica do solo (MOS), tem sido reconhecida como um dos mais importantes atributos (DORAN e PARKIN, 1994). Este

consenso em relação a MOS como indicador da qualidade do solo emana do fato de que seu teor é muito sensível às práticas de manejo, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais, onde, nos primeiros anos de cultivo, mais de 50% da matéria orgânica previamente acumulada podem ser perdidos por processos, como a decomposição microbiana e a erosão (PEIXOTO, 2008).

A matéria orgânica é componente imprescindível para a qualidade dos solos e ambientes tropicais. Ela desempenha um papel significativo na produtividade dos solos, pois representa a reserva dominante de N, enxofre (S) e fósforo (P) para as plantas. Além disso, ela influencia diretamente os processos físicos, químicos e biológicos do solo. Fatores como por exemplo o pH, a capacidade de troca iônica e estrutura do solo (ZECH *et al.*, 1997), também podem contribuir de forma indireta para o sequestro de C da atmosfera (BAYER *et al.*, 2000; GLATZELA *et al.*, 2003), podendo ter efeito também na atividade microbiana e na estabilidade de agregados (BALESDENT *et al.*, 2000, KALBITZ *et al.*, 2003).

2.2.1 Fatores determinantes no estoque de MOS

2.2.1.1 Textura e mineralogia do solo

Para condição semelhantes de clima, vegetação e manejo, solos argilosos apresentam tendência a possuir maiores estoques de matéria orgânica que solos arenosos. Isso decorre das maiores área superficial específica e quantidade de cargas nos solos argilosos, o que possibilita maiores interações organominerais e menores taxas de mineralização (DICK *et al.*, 2009). Em muitos solos, o conteúdo de argila atua como importante determinante na estabilização da MOS, e o conteúdo de carbono no solo geralmente está correlacionado com o conteúdo de argila. A incorporação física da MOS dentro dos agregados de argila resulta na proteção dos polímeros orgânicos ao ataque enzimático (ANDERSON, 1992). Além da estabilização física, as argilas também promovem estabilização química da matéria orgânica coloidal à porção mineral do solo. Como ambas possuem carga, cátions com mais de uma valência, como Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{3+} e Fe^{3+} , podem promover ligações eletrostáticas relativamente estáveis entre a matéria orgânica e a porção mineral do solo (ANDERSON, 1992).

A proteção física da MOS pela microagregação, de certa forma, está relacionada com a interação organomineral. Quanto mais intensa, maior é a possibilidade de formação de microagregados (< 250 μm de diâmetro), cuja estabilidade protege fisicamente a MOS, tanto por reduzir a difusão de oxigênio em seu interior, reduzindo assim, a atividade microbiana;

como por atuar como uma barreira física que dificulta a chegada do micro-organismo ao substrato orgânico (BALESDENT *et al.*, 2000). A proteção física por microagregação e a interação organomineral são processos associados, de forma que é difícil separar a ação individual de cada um na estabilização da MOS. A condição que favorece a interação organomineral (solo argiloso, elevada área superficial específica e elevada densidade de grupos funcionais) também favorece a formação dos microagregados. Além disso, a própria MOS contribui para a estabilização desses microagregados e, em contrapartida, recebe a proteção física, estabelecendo-se um efeito interativo (DICK *et al.*, 2009).

2.2.1.2 Clima

O clima é um fator ativo de formação do solo, pois atua em processos que causam mudanças nas características dos solos durante sua gênese (FANNING e FANNING, 1989). A influência do clima nos processos pedogenéticos pode ser inferida através de características como a mineralogia, teor e tipo de óxidos de ferro, acúmulo de matéria orgânica no solo e seu grau de humificação (MARTIN NETO *et al.*, 1998). As condições climáticas, tais como temperatura e precipitação pluvial média anual, são os fatores mais importantes na determinação dos níveis de matéria orgânica do solo (STEVENSON, 1994). Em climas frios e úmidos ocorre maior acúmulo de matéria orgânica que em climas mais quentes e secos, devido à menor atividade microbiana nestes sítios. Em climas tropicais a matéria orgânica acumula-se mais no solo conforme aumenta a altitude.

Dalmolin *et al.* (2006) constataram que não apenas o teor de MOS aumentou com a altitude, como também a proporção de grupos C-O alquil, que constituem as estruturas mais lábeis da MOS. O efeito do clima foi mais pronunciado nos solos mais argilosos e ricos em óxidos de Fe, evidenciando o papel dos complexos organominerais na estabilização da MOS.

Ao avaliar a influência do clima, expresso pela relação temperatura média anual/precipitação anual, sobre o teor de carbono no solo, Tate (1992) observou um conteúdo superior no estoque de carbono em ambientes úmidos sob temperaturas baixas e em altitudes elevadas que em ambientes mais quentes e secos. Analogamente, Kämpf e Schwertmann (1983) observaram numa climossequência no estado do Rio Grande do Sul, um aumento no teor de carbono orgânico do solo com o aumento da umidade e a diminuição da temperatura.

A temperatura é o fator determinante na decomposição de resíduos, pois a taxa de perda de C é bem maior nos períodos mais quentes do ano do que nos períodos mais frios. HOLTZ (1995) estabelecem para regiões subtropicais a faixa de temperatura de 30 a 40° como a mais

favorável ao processo de decomposição. Também COSTA (1995) observou que a maior decomposição de resíduos ocorreu em rampas que recebiam maior irradiação solar e portanto tinham maiores temperaturas. Porém o efeito é extremamente complexo devido às interações com outros fatores climáticos e com os tipos e características do solo e da matéria orgânica (GREGORICH *et al.*, 1994; HOLTZ, 1995).

Embora as condições climáticas de elevadas temperatura e precipitação possam potencializar a mineralização da MOS nos trópicos, a interação organomineral pode contrabalançar esses efeitos climáticos, principalmente quando associada ao maior potencial de aporte de fitomassa pelos vegetais (SOLLINS *et al.*, 1996).

2.2.1.3 *Uso e cobertura da terra*

O carbono e o nitrogênio são os principais componentes da matéria orgânica do solo e os seus estoques variam em função das taxas de adição, por resíduos vegetais e, ou, animais, e de perda, dentre elas, as decorrentes da erosão e da oxidação pelos microrganismos do solo. Em solos sem ação antrópica, o teor e o estoque desses elementos são determinados basicamente pela temperatura, pela umidade e pelo tipo de solo (BAYER e MIELNICZUK, 1997). Em sistemas agropecuários, os estoques de C orgânico (CO) e de N total (NT) no solo são também influenciados pelo manejo adotado. Em solos com intenso revolvimento, além das perdas por erosão, ocorre aumento da atividade microbiana pela maior exposição dos resíduos aos microrganismos e suas enzimas.

A exploração agropecuária geralmente promove aumento na taxa de oxidação da MOS, favorecendo as emissões de CO₂. Em solos de clima temperado, metade do conteúdo inicial de C do solo é perdido em um intervalo de 50 a 100 anos de cultivo (FELLER e BEARE, 1997). Em ambientes tropicais e subtropicais as perdas podem ser ainda maiores. Nos primeiros anos de cultivo, mais de 50% da matéria orgânica previamente acumulada é perdida por diversos processos, entre esses, a decomposição microbiana e a erosão (ANDREUX, 1996).

Silva *et al.* (1994), avaliando o efeito de cinco anos da monocultura de soja com preparo intensivo do solo no Cerrado baiano, verificaram perdas de matéria orgânica, em relação ao estoque inicial, na ordem de 80%, 76% e 41% sob Neossolo Quartzarênico, Latossolo de textura média e Latossolo argiloso, respectivamente. Por outro lado, práticas conservacionistas, como determinadas técnicas de plantio (plantio direto, cultivo mínimo, rotação de cultura e etc.) e manejo das pastagens, florestas plantadas e sistemas agroflorestais podem reduzir

drasticamente estas perdas, mantendo-se os teores de MOS ou até mesmo aumentando-os (CARTER, 2001).

A maioria das práticas agrícolas não provoca elevações significativas dos conteúdos de carbono em pouco tempo, sendo necessário pelo menos entre 25 a 50 anos antes que um novo equilíbrio seja atingido (BATJES, 2001). Campos (2003), no nordeste do Espírito Santo, comparou o efeito da conversão de uma área desmatada em 1980 que foi mantida sob pastagem por 10 anos e foi posteriormente cultivada com cana-de-açúcar por 12 anos, com o de outra área que foi mantida sob pasto por 22 anos (após desmatamento). Todas as áreas do estudo (mata, pastagem e cana-de-açúcar) eram adjacentes e com o mesmo tipo de solo (Latossolo, 80% de areia). O estoque de carbono nos primeiros 100 cm de profundidade na área de mata foi de 62 Mg ha⁻¹, na área de cana-de-açúcar de 50,9 Mg ha⁻¹ e no pasto de 70,8 Mg ha⁻¹. Embora a cana-de-açúcar tenha sido fertilizada (a soqueira recebeu 80 kg N ha⁻¹), a redução dos estoques de C provavelmente foi associada ao cultivo intensivo usado no estabelecimento da cultura e nas duas posteriores renovações em intervalos de cinco anos.

Fujisaka *et al.* (1998) avaliaram os efeitos da conversão de florestas nativas em áreas com culturas agrícolas e pastagens nos estoques de carbono do solo em Rondônia. Constataram redução da ordem de 80% nos estoques C no solo com a transformação, através do corte e queima da vegetação, para lavouras de culturas anuais e posterior introdução de pastagem.

Silva *et al.* (2004) avaliaram áreas de pastagens quanto ao armazenamento de C na profundidade de até 1 m em Latossolos argilosos na região do Cerrado e verificaram, após 4 a 8 anos, que a magnitude do estoque variou entre 97,1 a 113,0 Mg ha⁻¹, concentrando-se nas camadas superficiais, com cerca de 50% até 40 cm de profundidade.

A maior contribuição das pastagens para o acúmulo de C no solo advém do seu sistema radicular. Nessas áreas, o teor de MOS é maior nas camadas superficiais e decresce com a profundidade. Cerca de 40 a 50% do C do solo pode ser armazenado até 30 cm e amostragens de até 60 cm capturam cerca de 90% da biomassa radicular e do C orgânico do solo de ecossistemas com pastagens (LAL, 2002).

As informações disponíveis sobre o papel dos solos brasileiros no ciclo biogeoquímico do carbono e do nitrogênio são ainda escassas, especialmente para os solos do semiárido. Isso dificulta a realização de estimativas do estoque de C e N, bem como a simulação do impacto de sistemas de manejo conservacionistas. A maioria dos relatos sobre estoques de C e N em solos agrícolas brasileiros foram baseados em sistemas de cultivo de culturas anuais para produção de grãos em condições de alta precipitação pluvial (FREIXO *et al.*, 2002; MACHADO e SILVA, 2001; SISTI *et al.*, 2004).

Tiessen *et al.* (1998) apresentaram o estoque total de C de um Latossolo sob vegetação natural na região Nordeste do Brasil como sendo próximo de 20 Mg ha^{-1} , na camada superficial (0-20 cm). Um Argissolo, na mesma região, apresentou aproximadamente 28 Mg ha^{-1} , entre 0 e 20 cm (KAUFFMAN *et al.*, 1993). Para um Luvisolo Crômico, sob caatinga hiperxerófila no semiárido cearense, Maia *et al.* (2007) encontraram estoque de carbono de $48,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, na mesma profundidade. Borges e Kiehl (1996) observaram, em um Latossolo Amarelo Álico na Bahia, que o estoque total de carbono (100 t ha^{-1}) sob vegetação natural até 100 cm de profundidade, foi reduzido em torno de 20% com os cultivos de banana, manga e mandioca. O cultivo de citros resultou numa menor redução do estoque, em torno de 10%.

Amorim (2009) avaliou a variação sazonal dos estoques médios de C em Argissolo sob vegetação natural, no município de Petrolina, Pernambuco. No período da estação seca, os valores foram de 16,5; 11,8 e $9,89 \text{ Mg ha}^{-1}$ e após período de maior precipitação pluvial (estação chuvosa) 14,2; 10,0 e $8,99 \text{ Mg ha}^{-1}$ nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30cm, respectivamente.

Os estoques de carbono do solo diminuem exponencialmente com a profundidade (MACHADO *et al.*, 2001; SISTI *et al.*, 2004). Em geral, 39-70% do carbono orgânico total na camada de 0-100 cm de solo mineral estão presentes nos primeiros 30 cm; e 58-81% nos primeiros 50 cm (BATJES, 1996). Perdas ou aportes de carbono do solo são maiores no horizonte superficial (0-15 cm), que deve ser amostrado mais frequentemente (RICHTER, *et al.*, 1999). Entretanto, havendo mudanças no uso e manejo, a amostragem deve ser feita a profundidades maiores, pois o acúmulo de carbono na superfície pode ser balanceado por perdas em profundidade (WATSON *et al.*, 2000). Não seria prático, todavia, definir uma profundidade para todos os solos, onde o carbono seria analisado.

Os teores de N, nas diferentes profundidades do solo, apresentam o mesmo padrão de distribuição dos teores de C, com os maiores valores observados em camadas mais superficiais, onde há maior acúmulo de matéria orgânica, sendo, dessa forma, também influenciados pelos sistemas de cultivos. Em solos agrícolas, os teores de nitrogênio variam, em geral, de 0,02 a 0,5% e, 98% do NT do solo encontram-se na forma orgânica (STEVENSON, 1994). A relevância da inclusão do N nos estudos que avaliam a MOS reside no fato dos compostos orgânicos representarem um importante reservatório de formas de N potencialmente disponíveis para as culturas.

Segundo Stevenson (1994), os compostos nitrogenados representam em torno de 5% da fração orgânica do solo, e cerca de 95 a 98% desse elemento estão ligados ao carbono dessa fração. Assim, em virtude dessa estreita relação entre o C e o N no solo, a manutenção do estoque de C e, por conseguinte, da MOS, é intimamente condicionada à quantidade de N do

solo. Portanto, o conteúdo de N orgânico do solo não pode ser acrescido de forma estável, sem que haja acréscimo correspondente no total de C, e vice-versa.

A MOS apresenta em geral, uma relação C/N bastante estável, variando de 8 a 14, quando ocorre a estabilização da MOS (húmus). Essa característica está diretamente relacionada ao tipo de solo, clima e mesmo de vegetação. Áreas sob florestas e cultivos agrícolas apresentam valores de relação C/N em torno de 12, enquanto em áreas sob pastagem esse valor pode ser um pouco mais elevado (BATJES, 1996).

2.3 Isótopos estáveis de ^{13}C e ^{15}N no estudo da MOS

Isótopos são átomos do mesmo elemento químico (mesmo número de prótons), mas que diferem em número de nêutrons, apresentando diferentes massas. O termo isótopo vem do grego ISOS (mesmo ou igual) e TOPOS (lugar), referindo-se ao fato de que ocupam o mesmo lugar na tabela periódica. Os isótopos podem ser estáveis, quando não emitem radiação; ou radioativos, quando emitem algum tipo de radiação. Os isótopos estáveis, em relação aos radioativos, possuem a vantagem de não apresentarem riscos à saúde humana e contaminação ao ambiente (BOUTTON *et al.*, 1988).

A substituição de florestas por cultivos agrícolas e/ou pastoris levam a importantes mudanças na dinâmica do carbono e do nitrogênio do solo, e conseqüentemente na ciclagem global desses elementos.

A utilização de traçadores isotópicos naturais de ^{13}C e ^{15}N são métodos bastante utilizados para distinguir e quantificar a origem da matéria orgânica nos solos cultivados e a dinâmica do nitrogênio (CADISCH *et al.*, 1996).

2.3.1 Abundância natural de ^{13}C

Na natureza, existem dois isótopos do C que são estáveis e se encontram em proporções pouco variáveis ao longo do tempo. O ^{12}C é o mais leve e representa a maior proporção em relação ao total de C na natureza (98,89%); já o ^{13}C conta com apenas 1,1% do total. A pequena fração restante é do isótopo radioativo ^{14}C . Essas proporções se mantêm relativamente estáveis em qualquer resíduo orgânico. No entanto, a taxa desses dois isótopos pode variar como resultado do fracionamento durante processos físicos, químicos e biológicos (BOUTTON, 1991). Quando o C passa de um estado físico-químico para outro, ocorre uma discriminação

entre os dois isótopos, ou seja, um isótopo muda de estado preferencialmente, ou mais rapidamente, em relação ao outro. Isso faz com que ocorra uma variação na casa dos milésimos na proporção $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (ALVES *et al.*, 2006).

As análises da composição isotópica de C são feitas medindo-se a relação de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ das amostras em relação a um padrão internacional, e o resultado é expresso em termos de diferença de $\delta^{13}\text{C}$ em relação ao padrão. O padrão internacional para o carbono é uma rocha calcária encontrada em uma formação geológica denominada Pee Dee, na Carolina do Norte, EUA, cuja abreviação é PDB (*Pee Dee Belemnite*), e tem uma relação molar de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (R) de 0,01124. Os desvios em relação ao padrão são conhecidos como unidades δ (letra grega delta minúscula), e como são valores muito pequenos convencionou-se expressá-los em partes por mil (‰) (ALVES, *et al.*, 2006).

O valor de δ do padrão é por definição 0‰. Esse padrão pode ser obtido na International Atomic Energy Agency (IAEA) em Viena, Áustria e no National Institute of Standards and Technology (NIST) nos Estados Unidos.

Os valores das amostras (vegetal e/ou solo) são expressos contra esse padrão quando as razões isotópicas são determinadas usando-se um espectrômetro de massa. Porém, esses padrões são muitas vezes de alto custo para o uso nas análises diárias, assim muitos laboratórios utilizam seu “padrão interno de trabalho” (UNKOVICH *et al.*, 2001).

A relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ é calculada pela fórmula abaixo:

$$\delta^{13}\text{C}_{PDB}(\text{‰}) = \left(\frac{R_{amostra} - R_{PDB}}{R_{PDB}} \right) \times 1.000$$

Onde: $R_{amostra}$ é a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra e R_{PDB} é a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do padrão.

Para usar estas pequenas variações isotópicas em estudos ambientais, a razão $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da MOS deve ser medida com alta precisão. Usualmente são feitas análises em amostras gasosas em espectrômetro de massa (BOUTTON, 1996).

2.3.1.1 Fracionamento isotópico de carbono pelos vegetais

Como resultado das propriedades bioquímicas das enzimas de fixação do CO_2 atmosférico (RuBisCo e PEPcase) e das limitações à difusão do CO_2 para o interior das folhas,

todos os vegetais discriminam contra o ^{13}C durante a fotossíntese, mas de forma diferente de acordo com seus ciclos fotossintéticos (O'LEARY, 1988). Existem três diferentes tipos de ciclos fotossintéticos entre os vegetais terrestres: C_3 , C_4 e CAM ou metabolismo ácido das crassuláceas. Cada um possui um modelo único de discriminação dos isótopos de carbono. Essas diferenças na composição isotópica dos materiais orgânicos permitem, por exemplo, traçar o carbono derivado de cada ciclo fotossintético na matéria orgânica acumulada no solo, sendo este, um bom indicador do tipo de vegetação existente ou que ocorreu em determinada área.

2.3.1.2 Ciclos fotossintéticos C_3 , C_4 e CAM

O ciclo fotossintético C_3 está presente em aproximadamente 85% das espécies de plantas dominantes em muitos ecossistemas terrestres e nelas o $\delta^{13}\text{C}$ varia de -30 a -24‰ (PDB), com média de aproximadamente -27‰ (VOGEL, 1993). Vegetações naturais de florestas tropicais, de regiões temperadas e de alta altitude são quase exclusivamente C_3 . Nas plantas C_3 , o fracionamento do carbono ocorre nos dois passos do processo fotossintético: difusão/dissolução e carboxilação. No segundo passo desse processo, a carboxilação pela enzima ribulose-1,5 bifosfato carboxilase (RuBisCo) causa um elevado fracionamento, pois essa enzima tem grande afinidade por ^{12}C , por ser mais leve que o ^{13}C e demandar menos esforço na sua captura, consequentemente a planta C_3 é muito empobrecida em carbono pesado (GANNES *et al.*, 1998).

Já as plantas C_4 usam a via fotossintética Hatch-Slack, em que a enzima de carboxilação fosfenolpiruvato carboxilase (PEPcase) reduz o CO_2 a ácido aspártico ou málico, discriminando menos contra o ^{13}C . Os valores isotópicos das plantas C_4 demonstram que o seu $\delta^{13}\text{C}$ permanece aproximadamente em -14‰ (de -7 a -16‰) (LOPES e BENEDITO-CECILIO, 2002). Espécies C_4 representam menos que 5% nas florestas, mas são dominantes em ecossistemas quentes ricos em gramíneas, como as savanas e as pastagens cultivadas nos trópicos em plantações de gramíneas como o milho, a cana-de-açúcar e o sorgo (MENDONÇA *et al.*, 2010).

As plantas que utilizam a via metabólica dos ácidos crassuláceos (CAM) possuem as mesmas enzimas utilizadas na via C_4 , porém com atividade enzimática diferenciada. Essas plantas fixam o CO_2 durante a noite, usando a PEP-carboxilase com fracionamento, comumente, encontrado em plantas C_4 , associado ao de C_3 , sendo sua variabilidade isotópica registrada entre -10 e -28‰ (LOPES e BENEDITO-CECILIO, 2002). O ciclo fotossintético CAM é encontrado em aproximadamente 10% das espécies vegetais e é dominante em

ecossistemas áridos ou semiáridos (MENDONÇA *et al.*, 2010). Para fixar CO₂, as plantas CAM mudam do ciclo fotossintético C₃ durante o dia para o ciclo fotossintético C₄ durante a noite. Valores de δ¹³C neste tipo se estendem em todo o alcance das plantas C₃ e C₄, mas usualmente são intermediários.

O fracionamento de ¹³C ocorre na planta não somente pelas diferentes vias fotossintéticas, mas também, em escala bem menor pelo fracionamento na formação de moléculas recalcitrantes (lignina) com baixo ¹³C (PARK e EPSTEIN, 1961). O C mais leve (¹²C) é usado preferencialmente pelos decompositores, enriquecendo a MOS em ¹³C ao longo da decomposição (BLAIR *et al.*, 1985). A não consideração dessas discriminações pode conduzir a uma superestimação do C derivado de resíduos de plantas C₄, conseqüentemente subestimação da contribuição de plantas C₃ e da estabilidade da MOS (CLAY *et al.*, 2007).

O primeiro trabalho a utilizar o ¹³C para quantificar a contribuição de diferentes vegetações ao carbono do solo no Brasil foi realizado por Cerri *et al.* (1985). Os autores avaliaram a contribuição do carbono da cana-de-açúcar (planta C₄) e a perda do carbono derivado de mata, 12 e 50 anos após substituição da mata (ciclo C₃). Utilizaram amostras em fragmentos de mata preservadas como base para o cálculo da substituição de C do solo. O C na MOS derivado da vegetação nativa, em áreas cultivadas, foi calculado pelo seguinte modelo:

$$\%COS_f = \left[\frac{(\delta^{13}C_b - \delta^{13}C_a)}{(\delta^{13}C_f - \delta^{13}C_a)} \right] \times 100$$

Onde:

%COS_f = o C derivado da floresta nativa (C₃); δ¹³C_a = a marcação na vegetação C₄; δ¹³C_b = a marcação atual do solo (C₃ + C₄); δ¹³C_f = a marcação da floresta nativa (C₃).

Trabalho semelhante publicado por Balesdent *et al.* (1987) mostrou uma taxa de movimentação (“turnover”) de 22% de MOS derivada da mata nativa após 13 anos de substituição da mata por cultivo de milho.

Balesdent *et al.* (1988) quantificaram a contribuição, no carbono do solo, do milho (C₄) ao longo de 40 anos de cultivo após retirada de pastagem C₃ (pastagem cultivada por 61 anos em substituição de vegetação nativa C₄). Após mais de 100 anos de cultivo, mais de 50% do COT era ainda derivado da vegetação nativa, correspondendo à fração menos lábil, associada às frações mais finas do solo, com “turnover” superior a 1.000 anos. Amostras de solo foram coletadas, em diferentes sucessões de cultivos, em 1915 (solo cultivado com C₃ desde 1888),

1928, 1938, 1962 (após entrada de milho em 1950) e 1975 em parcelas com cultivos de plantas C_3 (trigo e pastagem) implantadas em 1915.

A aplicação da discriminação isotópica do ^{13}C em estudos de “turnover” de MOS em áreas que tiveram substituição de vegetação, com padrões fotossintéticos diferenciados, exige duas situações básicas: tempo razoável de mudança de cultivos e testemunhas confiáveis ou amostragem de solo antes da substituição do padrão de planta. Esse método, chamado de mistura simples padrão, foi o primeiro a ser aplicado em estudos de MOS usando discriminação isotópica. Esses dois trabalhos são até os dias de hoje a base para aplicação de ^{13}C em estudos de dinâmica de MOS. Ressalte-se que, mesmo sendo os primeiros, são muito recentes comparando-se com outros temas dentro do estudo da ciência do solo. Quando não existe área testemunha confiável para utilizar como base, é necessário que existam amostras de solo coletadas em diferentes períodos, para que se possam acompanhar as alterações na abundância natural e com isso quantificar a contribuição da nova vegetação para o C do solo.

Campos (2003) avaliou áreas adjacentes de mata e pasto por 22 anos e outras que foram convertidas no plantio de cana-de-açúcar por 10 anos de pastagem. Após 22 anos de pastagem houve um aumento significativo no estoque (0-100 cm) de C do solo ($8,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$) em comparação com a mata original. Na área que foi pastagem por 10 anos, seguida por 12 de cana-de-açúcar, no entanto, o estoque de C do solo foi de $50,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$, sendo 18% menor do que aquele sob a mata original. Com os dados de abundância de ^{13}C foi possível avaliar a dinâmica do C derivado da floresta, de pasto e da cana-de-açúcar nessa cronosequência. Sob a pastagem, após 20 anos, o C derivado da floresta diminuiu em 9%; mas onde o solo foi intensivamente revolvido sob a cultura da cana, a quantidade do C derivado da mata original diminuiu em 35%. A redução no estoque de C da MOS sob a cana-de-açúcar, em comparação com o pasto, ocorreu pela decomposição da MOS original da mata.

2.3.2 Abundância natural de ^{15}N

Os isótopos estáveis podem prover medidas integradas a respeito da dinâmica de nitrogênio ($\delta^{15}N$) ao longo do tempo (HANDLEY e HAVEN, 1992; HÖGBERG, 1997). Desta forma, diminui-se a necessidade de medidas pontuais e repetitivas acerca dos processos que regulam o ciclo do N. Determinar valores de $\delta^{15}N$ em compartimentos chaves de ecossistemas, como os solos e as plantas, pode permitir uma série de inferências acerca da dinâmica do N (HÖGBERG, 1997).

Há dois isótopos estáveis de N (^{14}N e ^{15}N). A média natural de abundância no ar destes isótopos é constante de 99,63% de ^{14}N e 0,3663% de ^{15}N . As fontes naturais de ^{15}N variam de -20 a +20‰. O nitrogênio presente na matéria orgânica do solo apresenta tendência de ser mais rico em ^{15}N que os tecidos das plantas, sugerindo uma preferência microbiana pelo ^{14}N durante o processo de decomposição (DAWSON *et al.*, 2002).

Bustamante *et al.* (2004) entenderam que as grandes diferenças na variação de ^{15}N foliar encontradas entre as espécies vegetais do Cerrado indicavam que quando as plantas dividem o mesmo ambiente demandam diferentes fontes de N. Martinelli *et al.* (1999) avaliaram médias para o padrão de $\delta^{15}\text{N}$ do solo em florestas tropicais e encontraram valores altos, assim como Nardoto (2005) no Cerrado, mas com valores menores que nas florestas tropicais. Tais estudos sinalizam que o ciclo de N é mais aberto em florestas que nas savanas tropicais.

Quando as leguminosas estão fixando N atmosférico, através da FBN, as suas assinaturas isotópicas tendem a se aproximar de 0‰; logo, a conversão de N_2 em formas orgânicas de nitrogênio distinguem pouco contra o ^{15}N (EHLERINGER e RUNDEL, 1989). Já espécies não fixadoras de N apresentam uma grande diferença na razão isotópica, de acordo com a taxa de mineralização de N no solo, (GARTEN e VAN MIEGROET, 1994). Portanto, pode-se utilizar o $\delta^{15}\text{N}$ foliar para determinar se a fonte de N tem maior participação atmosférica ou do solo.

Apesar das diversas aplicações, a interpretação dos padrões de diferenças de ^{15}N entre lugares e tipos de solos, ainda estão sujeitas a controvérsias. Várias exceções às tendências gerais já foram relatadas (AMUNDSON *et al.*, 2003; SWAP *et al.*, 2004; FREITAS *et al.*, 2010) e a relação entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e o clima ainda não é completamente clara (CRAINE *et al.* 2009). Os sinais isotópicos da maior parte das florestas tropicais ainda são desconhecidos e há poucas pesquisas de sinais isotópicos ao longo de um gradiente de precipitação nos solos existentes a curtas distâncias, principalmente, em regiões com temperaturas médias anuais acima de 23° C (CRAINE *et al.*, 2009; HANDLEY *et al.*, 1999).

Vários estudos têm demonstrado que os sinais de ^{15}N do solo tendem a diminuir para zero com o aumento da pluviosidade (AMUNDSON *et al.*, 2003; NARDOTO *et al.*, 2008; CRAINE *et al.*, 2009, FREITAS *et al.*, 2015) e que esses sinais são mais altos em florestas tropicais do que em florestas temperadas (MARTINELLI *et al.*, 1999; AMUNDSON *et al.*, 2003). As diferenças nos sinais das plantas e do solo também diminuem com o aumento da temperatura e com a diminuição da precipitação e da latitude (AMUNDSON *et al.*, 2003). Isso ocorre porque em lugares mais úmidos a abundância natural de ^{15}N resulta principalmente da interação da ciclagem interna do C entre os compartimentos orgânicos vivo e morto, com pequena perda de

N. Esse ciclo quase fechado é interrompido nos trópicos e, especialmente nos trópicos secos, onde proporcionalmente, há maior fluxo de N orgânico para o compartimento inorgânico, que é mais sujeito a perdas, levando ao enriquecimento de ^{15}N dos componentes do solo e da vegetação (AUSTIN e VITOUSEK, 1988; HANDLEY e SCRIMGEOUR, 1997; HANDLEY *et al.*, 1999; MARTINELLI *et al.*, 1999; FREITAS *et al.*, 2010; ARANIBAR *et al.*, 2004; SWAP *et al.*, 2004).

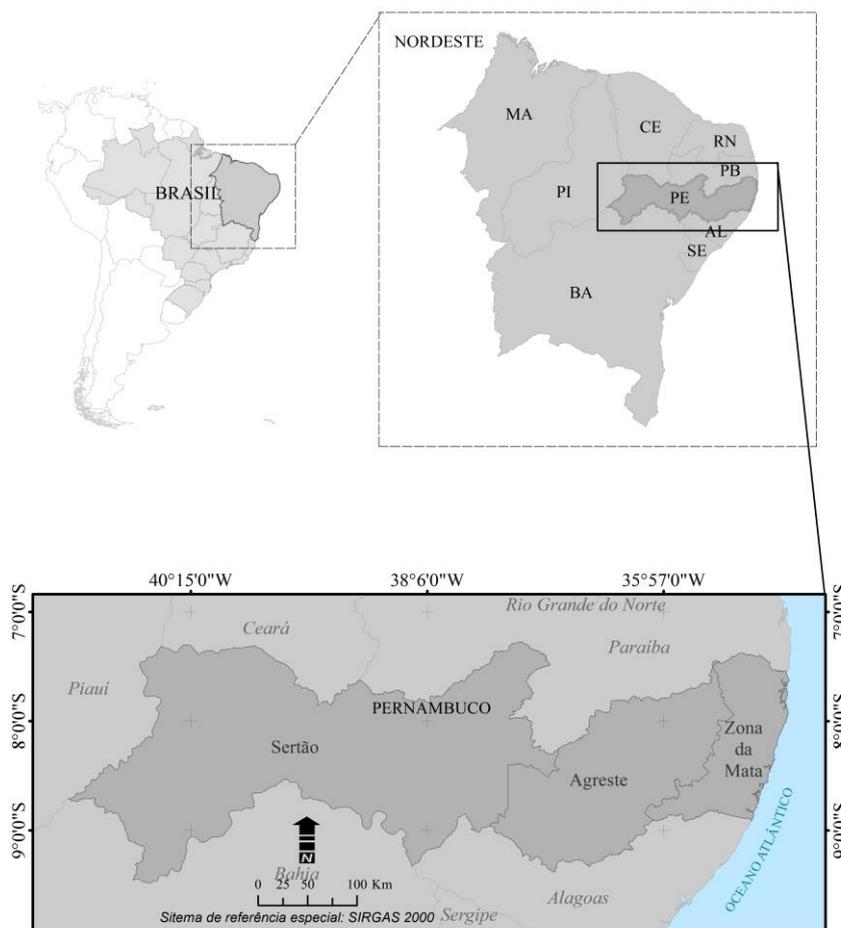
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas de estudo

3.1.1 Localização, limites e área

Os estudos foram conduzido em Pernambuco. O estado está localizado no centro-leste da região Nordeste do Brasil, entre os paralelos 7° 15' e 9° 27' S e os meridianos 34° 48' e 41° 19' W (CPRM, 2005) e tem como limites os estados da Paraíba (N), do Ceará (NW), de Alagoas (SE), da Bahia (S) e do Piauí (W), além de ser banhado pelo oceano Atlântico (L). Pernambuco ocupa (Figura 1) uma área de 98.311 km² e é constituído por 185 municípios, somando-se a esses o arquipélago de Fernando de Noronha (IBGE, 2016).

Figura 1 - Localização geográfica do estado de Pernambuco e suas regiões fisiográficas



O estado possui uma configuração espacial estreita no sentido norte-sul, apresentando uma faixa marítima de apenas 187 km de extensão. No sentido leste-oeste alonga-se

consideravelmente, chegando a 784 km de extensão. Essa projeção para oeste faz com que cerca de 80% de seu território esteja inserido na região de clima semiárido, onde as chuvas são poucas e mal distribuídas, ocorrendo, periodicamente, o fenômeno das secas (CONDEPE/FIDEM, 2006).

3.1.2 Regiões fisiográficas e características edafoclimáticas

Pernambuco possui três regiões fisiográficas, Litoral-Mata ou Zona da Mata, Agreste e Sertão (Figura 1). Estas três regiões são divididas em cinco Mesorregiões geográficas (Região Metropolitana de Recife, Zona da Mata, Agreste, Sertão e Sertão do São Francisco) e 19 Microrregiões geográficas, onde estão inseridos os 185 municípios do estado (IBGE, 2001; CONDEPE/FIDEM, 2006).

A Região da Zona da Mata (Litoral-Mata) corresponde à faixa de terra que vai da costa atlântica aos primeiros contrafortes do Maciço da Borborema. É a menor das três regiões fisiográficas, apresentando uma área de 8.738 km² (IBGE, 2014). Apresenta clima tropical quente e úmido, com temperaturas médias anuais em torno de 24°C e precipitações pluviárias variando entre 1.200 mm a mais de 2.200 mm anuais. O relevo dessa região é modesto. De uma planície litorânea, quase ao nível do mar, vai se elevando progressivamente, chegando a altitudes em torno de 600 m, nas áreas próximas ao Maciço da Borborema. Os solos arenosos da faixa litorânea dão lugar aos solos argilosos das encostas dos morros e colinas de formas brandas e arredondadas, principalmente na parte sul. Na parte norte, os tabuleiros da Formação Barreiras podem ter solos mais arenosos. A rede hidrográfica nessa região apresenta-se perene e caudalosa drenando extensas áreas em consequência de maiores cotas pluviométricas. O revestimento vegetal original era representado pela floresta tropical úmida, localmente chamada de Mata Atlântica, que foi substituída em mais de 95% por cultivos agrícolas, principalmente cana-de-açúcar (CONDEPE/FIDEM, 2006).

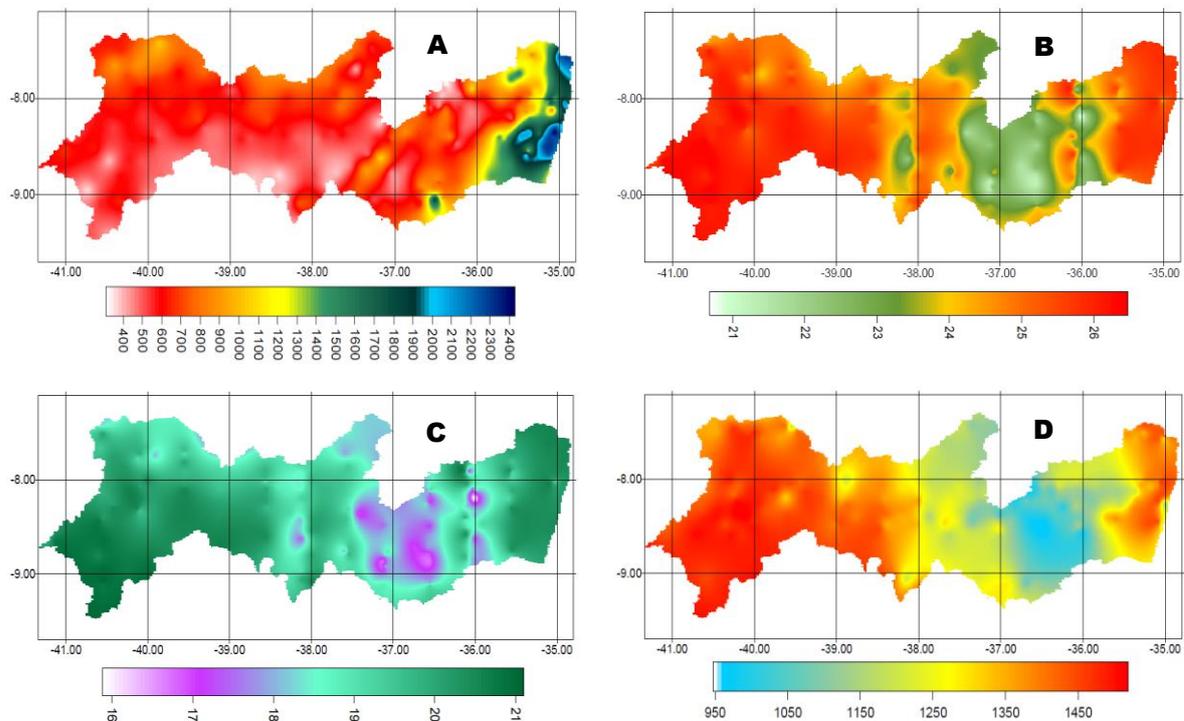
A Região do Agreste é uma área de transição entre a Zona da Mata e o Sertão, com uma extensão de 24.396 km² (IBGE, 2014). Essa região está localizada quase inteiramente sobre o Maciço da Borborema, apresentando climas que vão do tropical úmido da Mata ao semiárido do Sertão. Em áreas de maiores cotas altimétricas, principalmente nas vertentes expostas aos ventos alísios de sudeste, surgem os brejos de altitude (porções mais úmidas em relação às áreas circundantes), verdadeiros microclimas, cuja atividade agrícola é bastante diversificada e que, como consequência, apresentam maior densidade demográfica. Nas áreas mais secas, a vegetação predominante era de floresta tropical seca, chamada de caatinga arbórea, em grande

parte substituída por pastagens e áreas de cultivos temporários, principalmente milho e feijão (SAMPAIO, 2010). A vegetação de caatinga varia de porte e densidade na dependência tanto da quantidade quanto da distribuição das chuvas, além da profundidade dos solos (CONDEPE/FIDEM, 2006).

A Região do Sertão, que se localiza inteiramente no semiárido do Estado, possui uma vasta extensão territorial, abrangendo uma área de 62.726 km² (IBGE, 2014), com altitudes em geral entre 250 e 400m. O clima é quente e seco, com temperaturas elevadas e chuvas escassas (400 a 800 mm), mal distribuídas e concentradas em três meses do ano. Essas condições climáticas refletem-se na vegetação, nos solos e no regime dos rios, bem como na produção agrícola. Os solos, em sua maioria, são rasos e às vezes até inexistentes, uma vez que apresentam grandes afloramentos rochosos (CONDEPE/FIDEM, 2006). A vegetação predominante é de caatingas arbustivo-arbóreas, em diferentes etapas de regeneração, pelo seu uso na agricultura itinerante, na retirada de lenha e como pastagem nativa.

As características climáticas (precipitação pluvial, temperatura e evapotranspiração anual) das regiões fisiográficas de Pernambuco podem ser visualizadas na figura 2.

Figura 2 - Características climáticas das regiões fisiográficas do Estado de Pernambuco.



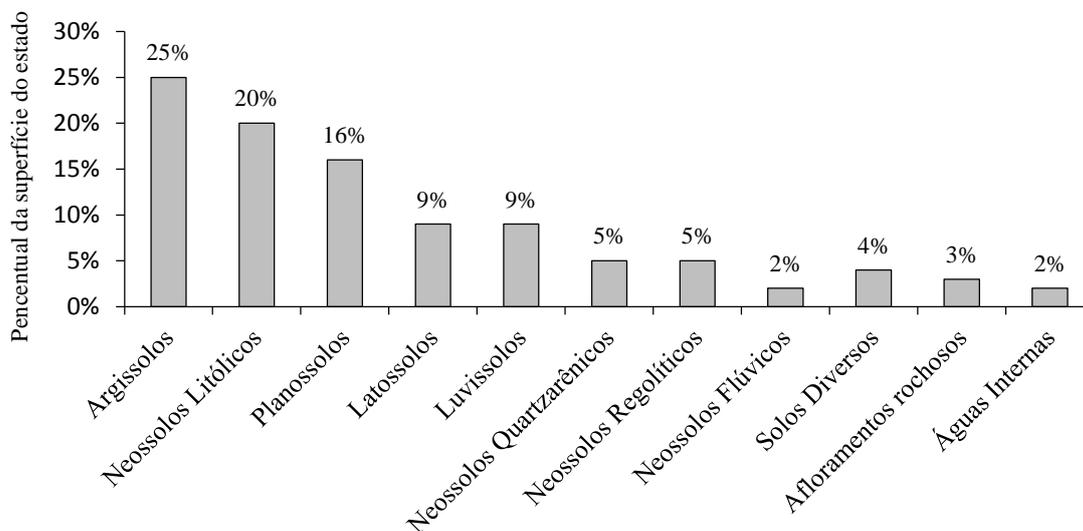
Fonte: Adaptado de ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000. (A) total médio anual de precipitação pluvial (mm) no Estado de Pernambuco. (B); temperatura média anual do ar (°C); (C) Temperatura média mínima anual do ar (°C); (D) Estimativa do total anual de evapotranspiração (mm).

3.1.3 Distribuição dos solos

Segundo o levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000), há oito grandes classes de solos (Figura 3). Os solos de maior expressão, ocupando cerca de 61% da área do Estado, pertencem às classes dos Argissolos (25%), Neossolos Litólicos (20%) e Planossolos (16%), sendo a classe dos Argissolos comum a todas as regiões fisiográficas do Estado. Ocupam cerca 23% da área, os solos das classes dos Latossolos (9%), Luvisolos (9%) e Neossolos Quartzarênicos (5%). Perfazem cerca de 7% da área, os solos das classes dos Neossolos Regolíticos (5%) e Neossolos Flúvicos (2%). Cerca de 4% da área são ocupados por solos diversos, incluindo Cambissolos, Gleissolos, Espodosolos, Vertissolos, Solos Indiscriminados de Mangues, Chernossolos e Plintossolos. Os afloramentos de rocha, ocupam uma superfície ao redor de 3% e as águas internas cerca de 2% da superfície do estado (Figura 3).

Vale salientar que as classes de solos descritas acima foram classificadas até o segundo nível categórico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), e são apresentadas de acordo com a classificação vigente (EMBRAPA, 2013), ficando no nível de ordem e, no caso dos Neossolos, subordem, por apresentarem diferenças distintas entre eles, principalmente no quesito profundidade, mesmo pertencendo a mesma classe de solo, como é o caso dos Neossolos Litólicos (< 50 cm) e Quartzarênicos (> 150 cm), por exemplo. Desta maneira, a ordem dos Neossolos (Litólicos, Quartzarênicos, Regolíticos e Flúvicos) recobrem 32% da superfície do estado, sendo essa ordem a de maior expressão em Pernambuco (Figura 3).

Figura 3 - Classes de solos mais representativas de Pernambuco.



Fonte: ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000

Na mesorregião da Zona da Mata predominam Argissolos (51%), Latossolos (19%) e Gleissolos (9%); no Agreste, Neossolos Litólicos (25%), Planossolos (24%), Argissolos (20%) e Neossolos Regolíticos (12 %); no Sertão, Neossolos Litólicos (22%), Planossolos (15%), Neossolos Quartzarênicos (14%), Luvisolos (13%), Argissolos (12%) e Latossolos (9%). As principais características desses solos estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 - Características das principais classes de solos presentes no estado de Pernambuco.

Classes	Características
Argissolos	Solos bem desenvolvidos, com presença de uma camada subsuperficial mais argilosa, chamada de horizonte B textural. São pouco a muito profundos, com baixa a média fertilidade. Ocorrem em áreas de relevo desde plano a muito acidentado.
Latossolos	Solos bem desenvolvidos, profundos, ácidos e pobres em nutrientes, com estrutura granular, porosos, bem drenados, de textura variando de arenosa até muito argilosa.
Luvisolos	Solos que variam de bem a imperfeitamente drenados, sendo normalmente pouco profundos (60 a 120cm), com sequência de horizontes A, Bt e C, e nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt, devido ao contraste de textura, cor e/ou estrutura entre eles. Podem ou não apresentar pedregosidade na parte superficial e caráter solódico ou sódico, na parte subsuperficial.
Neossolos Flúvicos	Solos pouco evoluídos, formados por sobreposição de camadas de sedimentos aluviais recentes sem relações pedogenéticas entre os estratos. São solos que apresentam um horizonte diagnóstico de superfície A e abaixo deste normalmente havendo uma sucessão de camadas estratificadas C de natureza não hidromórfica. Ocorrem normalmente nos ambientes de várzeas, planícies fluviais e terraços aluvionares.
Neossolos Litólicos	Solos muito pouco evoluídos, sendo muito rasos, com profundidades inferiores a 50 cm. Apresentam grandes quantidades de minerais primários em relação às outras classes, ou seja, possuem reserva de nutrientes, mas eles estão muito pouco disponíveis às plantas.
Neossolos Quartzarênicos	São solos pouco evoluídos, muito arenosos, excessivamente drenados, com baixa capacidade de retenção de água e de nutrientes. São solos de baixa fertilidade natural e ocorrem em relevo plano a suave ondulado.
Neossolos Regolíticos	Solos pouco desenvolvidos, pouco profundos a profundos, de textura normalmente arenosa (cascalhenta ou não). Às vezes apresentam fragipã, uma camada endurecida, que dependendo da profundidade pode vir a ser uma limitação para o uso agrícola. Possuem baixa fertilidade natural.
Planossolos	Solos medianamente desenvolvidos, rasos a pouco profundos, que possuem um horizonte B bastante argiloso, com uma transição textural abrupta entre os horizontes A e B. Essa transição abrupta resulta numa grande deficiência de drenagem. Bastante susceptíveis à erosão. Possuem média fertilidade natural, sendo ácidos na superfície e neutros na subsuperfície. Grande parte desses solos possui alta saturação por sódio, conferindo-lhes característica de solos sódicos ou solódicos.

Fontes: ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000; ARAÚJO *et al.* (2008); EMBRAPA, 2013; IBGE, 2015.

3.2 Estudo 1 - Levantamento dos estoques de carbono nos solos de Pernambuco.

O estudo 1 refere-se ao levantamento dos estoques de C nos solos de Pernambuco, realizado através de uma ampla revisão de trabalhos publicados na literatura especializada, em boletins exploratórios de levantamentos de solos e em periódicos científicos.

3.2.1 Estimativas dos estoques de C do solo

Cálculos dos estoques de carbono do solo dependem da disponibilidade de dados sobre concentrações de carbono (g C kg^{-1} solo) e da densidade do solo (D_s) das camadas ou horizontes para as quais se deseja calcular os estoques:

$$\text{Est. C} = \text{COT} \times D_s \times \text{Espessura}$$

onde, *Est. C* é o estoque de C no solo em Mg ha^{-1} , *COT* é o carbono orgânico total em (g kg^{-1}), e *Espessura* é espessura da camada ou horizonte em cm. Os valores de D_s são necessários para converter as concentrações de carbono expressas em porcentagem do peso seco, para peso de carbono por unidade de área (HOWARD *et al.*, 1995). Entretanto, este dado analítico está ausente em muitos trabalhos que contém dados de C orgânico, principalmente nos boletins de levantamentos de solos (JACOMINE *et al.*, 1973).

Um conjunto de dados de perfis de solo foi organizado a partir de trabalhos publicados, nos quais as concentrações de C do solo foram quantificadas (Tabela 2). Esses dados compreenderam 226 perfis (669 horizontes), coletados em 12 das 13 classes de solos existentes no atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), distribuídas por todo território de Pernambuco, em áreas de vegetação natural e antropizada, áreas de pastagem e em áreas de agricultura, entre os anos de 1973 e 2012.

Tabela 2 - Trabalhos utilizados para o levantamento dos estoques de C dos solos de Pernambuco.

Conjunto de dados	Perfis	Fontes
Artigos científicos de 1997 a 2012	88	ANTUNES <i>et al.</i> , 2010; ARAÚJO e SALCEDO, 1997; ARAÚJO <i>et al.</i> , 2001; ARAÚJO <i>et al.</i> , 2004; BONFIM <i>et al.</i> , 2004; GALINDO <i>et al.</i> , 2008; GIONGO <i>et al.</i> , 2011; OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2003; OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2009; SANTOS <i>et al.</i> , 2012; SIMÕES NETO <i>et al.</i> , 2009; SIMÕES NETO <i>et al.</i> , 2012; SOUZA <i>et al.</i> , 2010.
Solos de Referência de Pernambuco	35	RIBEIRO <i>et al.</i> , 1999
Levantamento exploratório - Reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco	*103	JACOMINE <i>et al.</i> , 1973

* Perfis sem valores de DS.

Os diferentes usos e coberturas da terra relatados nos trabalhos foram agrupados em quatro tipos principais: Mata (Mata Atlântica), Caatinga, pastagem (áreas de pasto) e agricultura (lavouras). As áreas de Mata e Caatinga foram ainda subdivididas em densa (vegetação natural) e abertas (área antropizada). Para as áreas de pastagem, consideraram-se tanto as áreas de pastos nativos quanto às áreas de pasto natural. É importante ressaltar que não há uma distinção clara entre vegetação natural e pastos nativos, ambos correspondendo principalmente à vegetação de Caatinga, quase toda ela ocupada eventualmente com rebanhos domésticos (SAMPAIO e COSTA 2011). Admite-se que as Matas sejam vegetação de maior porte, mais alta, mais fechada e mais arbórea, que os pastos nativos.

Os solos descritos nos artigos científicos e levantamentos foram classificados até o segundo nível categórico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, e são apresentados de acordo com a classificação vigente (EMBRAPA, 2013), ficando no nível de ordem e, no caso dos Neossolos, subordem, por apresentarem diferenças distintas entre eles. As médias por uso e cobertura da terra foram obtidas identificando-se, para cada perfil, o uso e cobertura em que ele ocorria.

De 669 horizontes (226 perfis contendo valores de carbono, quantificados principalmente por combustão via úmida), apenas 361 horizontes (123 perfis) foram descritos

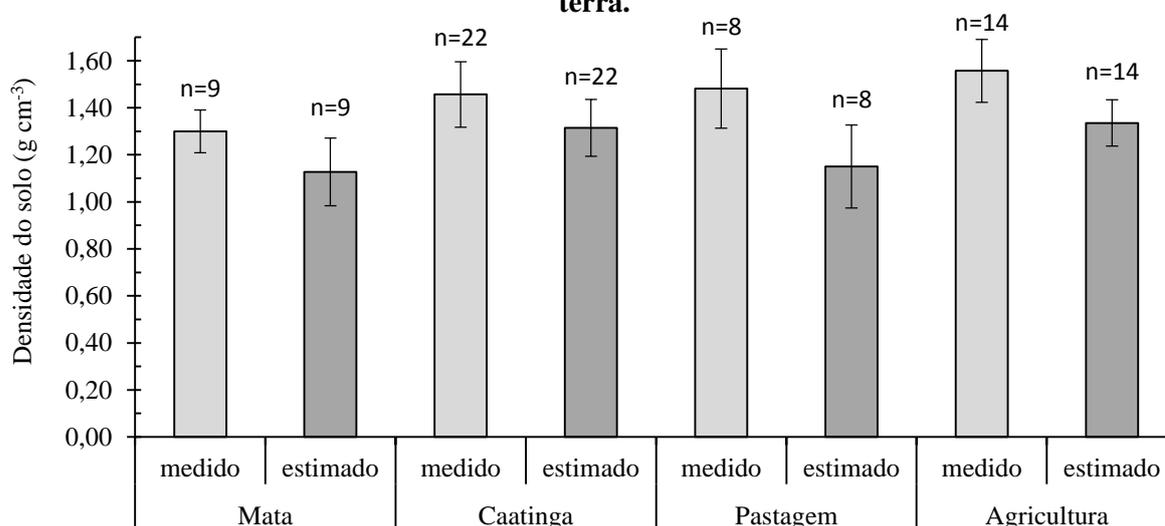
com valores de densidade do solo. Os 103 perfis do Levantamento Exploratório – Reconhecimento dos Solos do Estado de Pernambuco (JACOMINE *et al.*, 1973) (Tabela 2) não possuem dados de densidade do solo, no entanto, apresentam outros resultados referentes a análises físicas e químicas de caracterização. Para esses, aplicou-se a função de pedotransferência desenvolvida por Benites *et al.*, (2007) para estimar a densidade do solo nos horizontes:

$$D_s = 1,56 - (0,0005 \times \text{argila}) - (0,01 \times C) + (0,0075 \times SB)$$

em que D_s é a densidade do solo em g cm^{-3} ; *argila* é o conteúdo de argila em g kg^{-1} ; C é o conteúdo de carbono orgânico em g kg^{-1} e SB é a soma de bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$).

A equação adotada, que é um modelo de regressão simplificado, consegue descrever 66% da variação da D_s para os solos do Brasil (BENITES *et al.*, 2007) e tem maior exatidão que outras equações de regressão usadas para estimativa de D_s (BERNOUX *et al.* 1998; TOMASELLA e HODNETT, 1998). Para as classes de solos de Pernambuco, o modelo mostrou-se robusto, não apresentando diferenças significativas nos diversos usos e coberturas da terra (Figura 4).

Figura 4 - Valores de densidade do solo estimados e coletados de 1997 a 2012 em trabalhos publicados em áreas de Pernambuco na camada de 0-30 cm sob diversos usos e cobertura da terra.



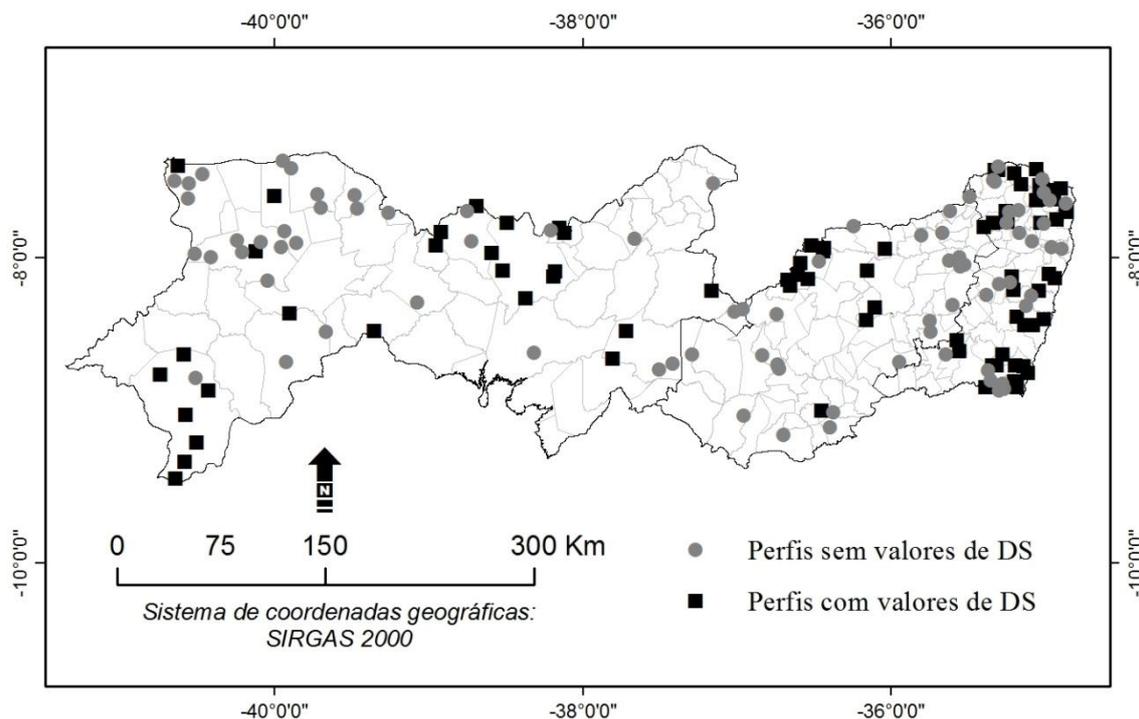
Medido = dados compilados de trabalhos publicados; estimado = dados estimados pela função de pedotransferência (BENITES *et al.*, 2007); Mata = Mata Atlântica; n = número de perfis em cada uso e cobertura do solo; barras de erro representam o erro padrão da média.

Em seguida, calculou-se, para cada perfil de solo, o conteúdo de C total considerando o conjunto de horizontes até a profundidade de 30 cm. Para tanto, foi necessário estabelecer um

conjunto de regras para padronizar a estimativa até essa profundidade, ou seja, foram excluídos os perfis com profundidade efetiva inferior a 10 cm, e os horizontes com profundidade inicial superior a 25 cm ou com profundidade final superior a 40 cm. O carbono total nos 30 cm iniciais do solo foi obtido por perfil somando a estimativa de C de cada horizonte no perfil até a profundidade máxima de 30 cm.

Depois de selecionados todos os perfis que se enquadravam nas regras estabelecidas acima, restaram 274 horizontes de 160 perfis, do total de 669 horizontes e 226 perfis do conjunto inicial de dados (Tabela 2). É importante destacar que muitos dos perfis descritos não possuíam coordenadas geográficas. Sendo assim, para fins de representação da localização dos perfis no mapa de Pernambuco, distribuíram-se os pontos aleatoriamente na área do município onde os perfis foram coletados (Figura 5).

Figura 5 - Mapa do Estado de Pernambuco com a localização dos perfis de solos utilizados para a estimativa dos estoques de carbono.



Ds = densidade do solo. Elaboração do mapa: Diego Marcelino.

Por causa da ausência de dados representativos de todos os tipos de solos, sob os diferentes usos e coberturas da terra, foram considerados dois grupos de dados: o primeiro com as médias de C por classe de solo e o segundo com as médias de C dos solos sob um mesmo tipo de uso e cobertura da terra, independentemente da classe de solo, em todo território de Pernambuco. Esses dois panoramas foram criados para análise dos resultados das estimativas

da quantidade de C no solo, considerando-se alguns desses fatores isoladamente e, assim, obter amostras com um maior número de perfis.

3.3 Estudo 2 - Distribuição em profundidade e estoques de carbono em solos sob diferentes coberturas e usos da terra em Pernambuco.

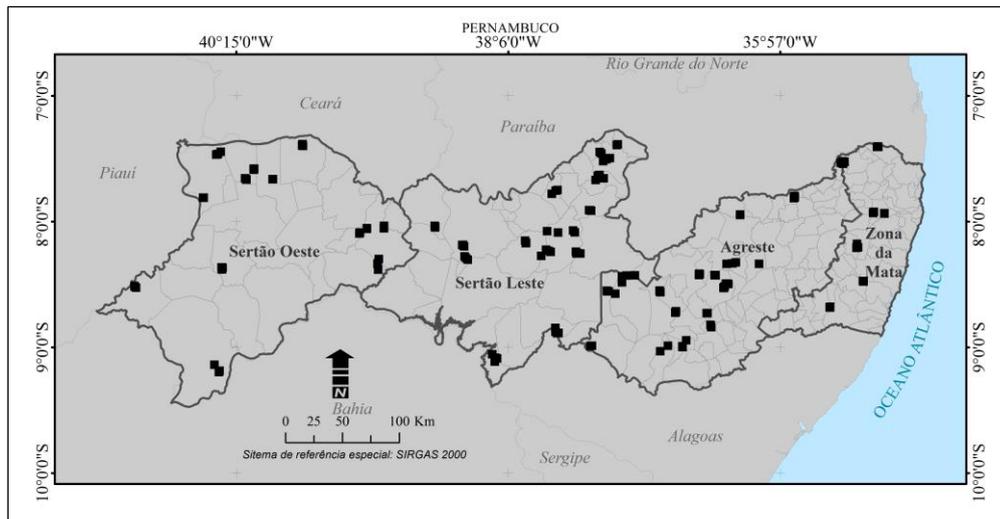
Considerando a importância e a carência de estimativas dos estoques de carbono nos solos no Nordeste do Brasil, e como ela varia com os usos da terra, as condições ambientais e os tipos de solo, esse trabalho objetivou quantificar os estoques de carbono no solo de vegetação nativa, cultivos e pastagens, *in situ*, nas principais regiões climáticas e classes de solo de Pernambuco.

3.3.1 Delineamento da área de estudo

Para o levantamento dos estoques de C do solo, fez-se necessário à divisão do estado de Pernambuco em regiões fisiográficas (Figura 1) (IBGE, 2001), levando-se em consideração as principais classes de solo (EMBRAPA, 2006) presentes em cada região, bem como o tipo de uso e cobertura vegetal existente. Assume-se que essa estratificação em três níveis hierárquicos (região climática, tipo de solo e cobertura e uso da terra) garante que os principais fatores que interferem nos estoques e na qualidade da MOS sejam avaliados.

Ao todo, foram amostrados 180 pontos (Figura 6), localizados em áreas representativas distribuídas em função das três grandes regiões fisiográficas do Estado (Zona da Mata, úmida; Agreste, subúmido e Sertão, semiárido), sendo esse último dividido em porção leste e porção oeste, em função das diferenças nos tipos de solo, perfazendo ao todo, quatro regiões de coleta, cobrindo todo o Estado de Pernambuco.

Figura 6 - Distribuição dos pontos amostrais no estado de Pernambuco.



Em cada uma destas quatro regiões foram alocados pontos em função dos quatro tipos principais de usos e coberturas da terra (vegetação nativa densa e aberta, áreas agrícolas e áreas de pastagem) e das principais classes de solo, de forma que estas abrangessem mais de 90% e 70% da área de cada região, para os principais usos e solos, respectivamente. Em cada região, para cada combinação de cobertura e solo foram escolhidos três pontos amostrais, tomados como repetições.

Na região fisiográfica da Zona da Mata, foram realizadas coletas em dois tipos de solo e em quatro tipos de uso e cobertura da terra, com três repetições cada, perfazendo um total de 24 situações ou extratos (Tabela 3). Para a região do Agreste foram 48 pontos amostrados (4 classes de solos x 4 tipos de uso e cobertura x 3 repetições); no Sertão Leste foram 60 pontos (5 tipos de solo x 4 tipos de uso e cobertura x 3 repetições) e no Sertão Oeste 48 pontos amostrais (4 tipos de solo x 4 tipos de uso e cobertura x 3 repetições).

Tabela 3 - Estratificação do estado de Pernambuco em regiões fisiográficas, classes de solos e usos e cobertura da terra mais representativos.

*Usos e Coberturas	Regiões fisiográficas / Classes de solo			
	ZONA DA MATA	AGRESTE	SERTÃO LESTE	SERTÃO OESTE
Vegetação nativa densa		Neossolo Litólico (26%)	Luvissolo (22%)	Argissolo (30%)
Vegetação nativa aberta	Argissolo (51%)	Planossolo (24%)	Planossolo (21%) Neossolo Litólico (19%)	Neossolo Litólico (26%)
Áreas agrícolas	Latossolo (19%)	Argissolo (21%)	N. Quartzarênico (19%)	Latossolo (22%)
Áreas de pastagem		N. Regolítico (12%)	Argissolo (6%)	Planossolo (7%)
Total	(70%)	(83%)	(87%)	(85%)

* Usos e coberturas comum à todas as regiões; (%) Percentual de cobertura dos solos por região fisiográfica; N. Quartzarênico = Neossolo Quartzarênico; N. Regolítico = Neossolo Regolítico.

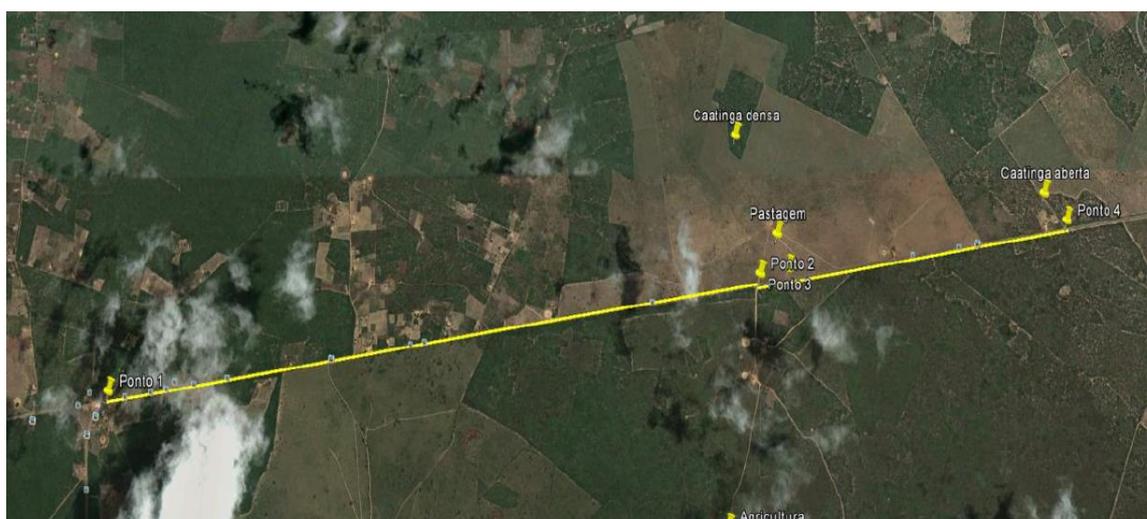
3.3.2 Levantamento das classes de solos e coberturas vegetais existentes

Para o levantamento prévio das áreas representativas do estado de Pernambuco, foram utilizados dados já existentes, por meio da junção de mapas e outros produtos de trabalhos recentes feitos no estado, como descrito a seguir. A identificação das áreas representativas para a amostragem das classes de solo em cada região foi baseada no ZAPE (Zoneamento Agroecológico de Pernambuco) (EMBRAPA, 1998), e, por diferirem nas porções Leste e Oeste do Sertão quanto as classes de solo, serviram de base para a divisão feita. Na porção Leste, predominam solos formados a partir da alteração de rochas cristalinas (rochas ígneas e metamórficas), enquanto na porção Oeste há maior participação de material sedimentar. O ZAPE contempla de forma integrada informações sobre solos, clima e recursos hídricos, considerando-se as “*manchas*” dos principais tipos de solos presentes em cada região na escala de 1:100.000.

Para a identificação das áreas de cobertura vegetal e uso do solo nas regiões do Agreste e Sertão, foram utilizados dados do Projeto PROBIO - Levantamento da cobertura vegetal e do uso do solo do bioma caatinga (PROBIO, 2007). Este projeto, realizado na escala 1:100.000, com base em imagens do sensor Landsat 7 ETM+ do ano 2002, foi atualizado com base em imagens dos sensores CBERS 2 e CBERS 2B, de 2008 a 2010.

O uso e a cobertura das terras do bioma Mata Atlântica (Zona da Mata), foi realizada com base em dados primários utilizando-se, também, as imagens mais recentes dos sensores da série CBERS. A geração das classes de uso (matas densas e abertas, caatingas densas e abertas, agricultura e pastagem) foi feita pela interpretação visual considerando as seguintes características: tonalidade, textura, cor e forma, com base em imagens da época chuvosa e da época seca (ACCIOLY *et al.*, 2017, *no prelo*), (Figura 7).

Figura 7 - Imagem com a demarcação dos diferentes usos da terra em um Latossolo.



Fonte: equipe de Geoprocessamento da Embrapa Solos UEP Recife, PE.

Após o cruzamento das informações dos solos e dos usos e coberturas da terra, através dos mapas e das imagens de satélite, fez-se necessária a validação dos pontos amostrais a nível de campo. Com as coordenadas pré-estabelecidas, realizou-se então a validação, verificando-se se os pontos pré-estabelecidos correspondiam à combinação prevista (solo x vegetação). Caso não correspondessem, um novo ponto amostral era procurado. A escolha das áreas amostrais, bem como a validação das áreas representativas, foram feitas com o apoio da equipe de Geoprocessamento, da Embrapa Solos UEP Recife, como também com o apoio de pedólogos da Embrapa Semiárido (CPTSA).

No reconhecimento das fitofisionomias abertas e densas (Tabelas 3 e 4), foram utilizadas as cenas do sensor ccd1xs do satélite CBERS 2B, para a imagem da época seca e o sensor LIS3 do satélite IRS P6 ou Resourcesat-1, para a época chuvosa. Para o sensor ccd1xs (CBERS 2B) foram assinaladas às bandas multiespectral 2 (520 – 590 nm), 3 (630 – 690 nm) e 4 (770 – 890 nm). Para o sensor LIS3 foram assinaladas as bandas: 1 (520 – 590 nm), 2 (620 – 680 nm) e 3 (770 – 860 nm) (ACCIOLY *et al.*, 2017, *no prelo*).

Tabela 4 - Características dos principais sistemas de uso e cobertura da terra nas diferentes regiões fisiográficas e classes de solos do estado de Pernambuco.

Usos e coberturas	Características
VEGETAÇÃO NATIVA	Densa Zona úmida (Zona da Mata): Remanescente de mata nativa dos tipos florestas perenifólias, subperenifólias e subcaducifólias, com vegetação densa, sem qualquer exploração ou interferência antrópica visível. Zona subúmida e semiárida (Agreste e Sertão): Remanescente de caatinga nativa dos tipos hipoxerófilas e/ou hiperxerófilas densas, sem qualquer exploração ou interferência antrópica visível.
	Aberta Zona úmida: Remanescente de mata nativa dos tipos florestas perenifólias, subperenifólias e subcaducifólias, pouco densas e/ou abertas, devido as suas características naturais e/ou interferência antrópica. Zona subúmida e semiárida: Remanescente de caatinga nativa dos tipos hipoxerófilas e hiperxerófilas pouco densas e/ou abertas, devido as suas características naturais e/ou interferência antrópica.
ÁREAS AGRÍCOLAS	Na região úmida predomina o cultivo da cana-de-açúcar em plantio convencional, com o preparo do solo realizado com aração e gradagens. Nesse sistema, o controle das plantas daninhas é feito com a aplicação de herbicidas e/ou capina manual e adubação é realizada com fertilizantes “químicos”. Nas regiões subúmida e semiárida, predominam a agricultura de subsistência com cultivos de milho, feijão, mandioca e palma (para alimentação animal). A adubação com fertilizantes “químicos” nesse sistema é praticamente inexistente e as culturas podem ser adubadas com esterco de curral.
ÁREAS DE PASTAGEM	Em todas as regiões fisiográficas, a grande maioria das pastagens é de <i>Brachiaria spp.</i> , exceto os sertões, e/ou pastagem natural, conduzidas sob pastejo contínuo de bovinos e/ou caprinos em regime intensivo, semi-intensivo ou extensivo e na maioria dos casos sem aplicação de fertilizantes.

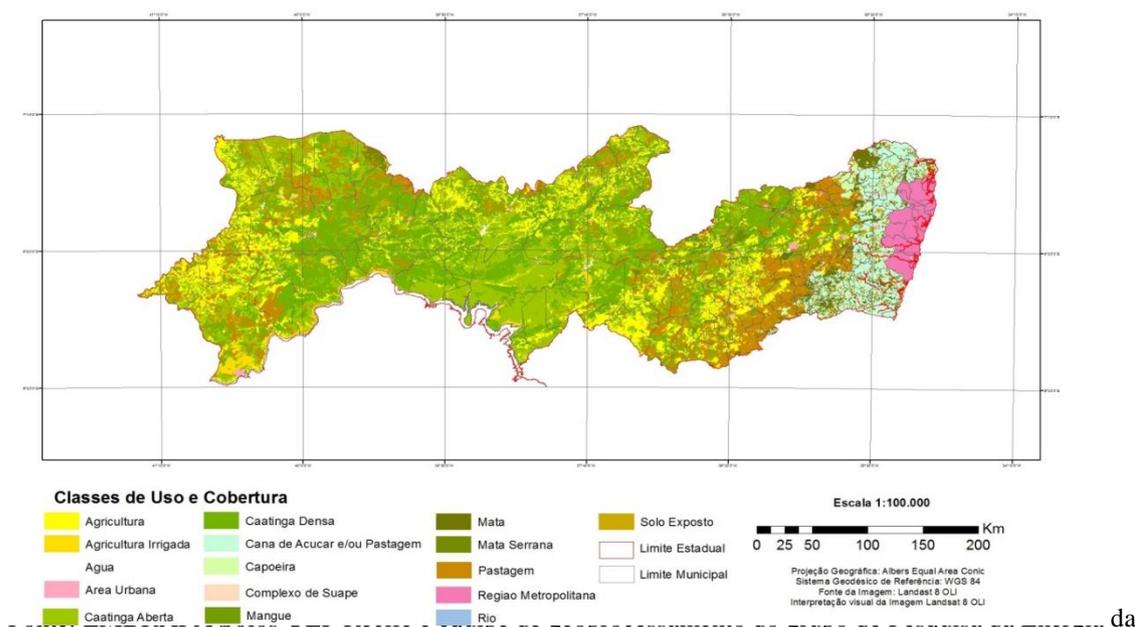
Fontes: JACOMINE *et al.*, 1973; CONDEPE/FIDEM, 2006

3.3.2.1 Usos e coberturas da terra

O mapa de uso e cobertura das terras na Escala 1:100.000 (Figura 8) foi elaborado em parceria com a EMBRAPA Solos UEP Recife, através da classificação visual de imagens dos sensores Landsat 5 TM e Landsat 8 LDCM pela composição colorida (RGB) das bandas 5, 4 e 3 para a imagem do sensor Landsat 8 LDCM e pelas bandas 4, 3 e 2 do sensor Landsat 5 TM para o ano de 2013 (ACCIOLY *et al.*, 2017, *no prelo*).

Na etapa de pré-processamento foram feitas as correções geométricas, a calibração radiométrica com correção atmosférica e a segmentação das imagens. A imagem do sensor Landsat 8 LDCM foi geometricamente corrigida (registrada) utilizando-se como referência pontos de controle obtidos em imagens de alta resolução espacial, disponíveis no software Google Earth. Após esse registro, a imagem do sensor Landsat 5 TM foi corrigida à imagem do Landsat 8 LDCM (ACCIOLY *et al.*, 2017, *no prelo*).

Figura 8 - Uso e cobertura da terra em Pernambuco.



Biomassa – UFPE (ACCIOLY *et al.*, 2017, *no prelo*).

Os resultados (Tabela 5) mostram que cerca de metade da área de Pernambuco é coberta por caatingas densas e abertas, em proporções semelhantes (28 e 23%, respectivamente). Naturalmente, estas caatingas estão na zona semiárida, principalmente nos Sertões Leste e Oeste (Figuras 7 e 8) e, como a porção semiárida corresponde a cerca de 90% do estado, as caatingas ocupam pouco menos de dois terços desta porção. Ainda na zona semiárida, há cerca de 16% da área estadual ocupada com agricultura, principalmente com culturas de ciclo curto, em roças de milho, feijão, algodão herbáceo, mandioca e outras intercaladas (jerimum, melancia, maxixe, etc.). Grande parte desta área está na Zona do Agreste, onde resta menos vegetação nativa. Apenas 1% é de agricultura irrigada, incluindo culturas permanentes (manga, uva, coco, goiaba e outras), concentradas na área próxima do rio São Francisco, no polo de Petrolina. As áreas de pastagem na região semiárida (separadas das da Zona da mata), principalmente no Agreste, ocupam 16% da área estadual. Portanto, na região semiárida, os usos e coberturas previstos para amostragem no planejamento da pesquisa mostraram-se adequados, cobrindo mais de 90% do território regional (ACCIOLY *et al.*, 2017, *no prelo*).

Tabela 5 - Área dos diferentes tipos de uso e cobertura das terras de Pernambuco e proporção em relação à área total do Estado.

Usos e Coberturas	Área (ha)	%
Agricultura	1.532.498	15,50
Agricultura irrigada	109.090	1,10
Água	160.370	1,62
Área Urbana	59.355	0,60
Caatinga Aberta	2.295.779	23,22
Caatinga Densa	2.761.107	27,93
Cana de açúcar e ou Pastagem	546.581	5,53
Capoeira	62.460	0,63
Complexo de Suape	991	0,01
Mangue	6.546	0,07
Mata	248.390	2,51
Mata Serrana	77.002	0,78
Pastagem	1.628.084	16,47
Região Metropolitana	278.992	2,82
Rio	2.956	0,03
Solo Exposto	116.682	1,18
Total	9.886.883	100

Fonte: EMBRAPA Solos UEP Recife e equipe de geoprocessamento do grupo de Pesquisa da Energia da Biomassa – UFPE (ACCIOLY *et al.*, 2017, *no prelo*).

Na Zona da Mata era difícil separar nas imagens de satélite o que era pastagem e o que era Cana-de-Açúcar, porque as Canas-de-Açúcar jovens têm a mesma cobertura graminácea das pastagens. Cana-de-Açúcar e pastagens, juntas, perfaziam cerca de 6% do território de Pernambuco. Pelos dados do censo sabe-se que a cana ocupa cerca de 300 mil ha, ficando os cerca de 250 mil restantes para pastagem. A separação só era feita no campo, quando da amostragem. As matas e capoeiras ocupam apenas 3% do território estadual. Excluindo nesta zona a região metropolitana, a classificação para amostragem em áreas de Cana-de-Açúcar, pastagem, mata e capoeiras também correspondia a uma cobertura de mais de 90% do território da zona.

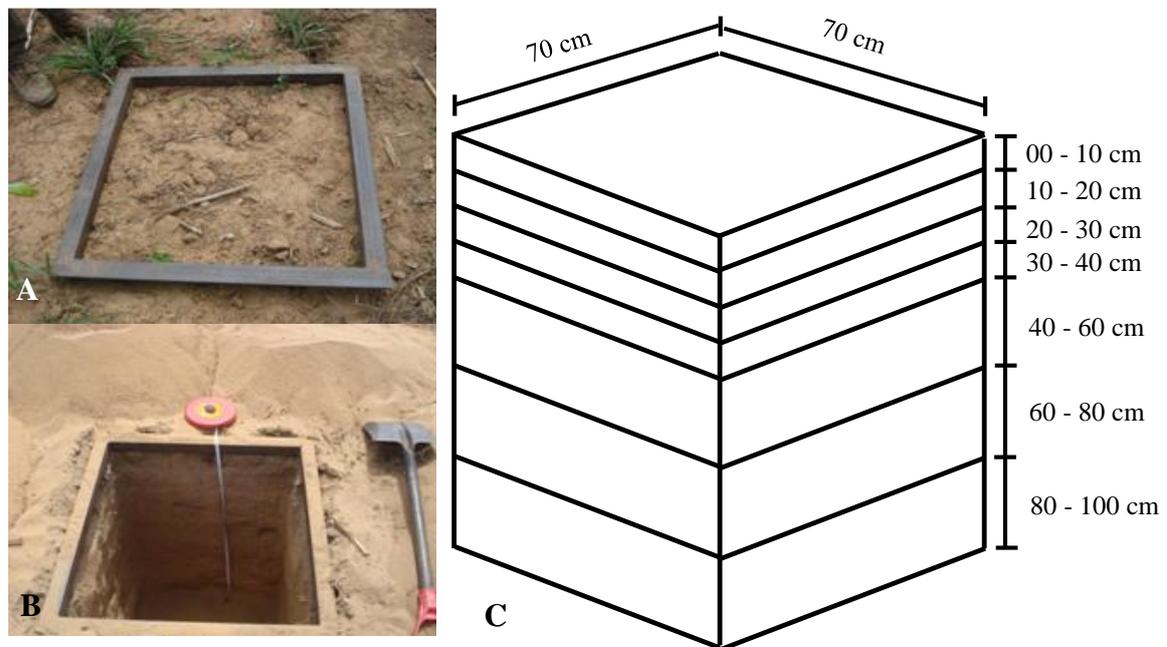
3.3.3 Coleta das amostras de solo

Em cada ponto amostral foram coletadas amostras do perfil do solo até a profundidade de 1 m ou até a camada de impedimento em solos com menos de 1 m de profundidade. Para melhor entendimento das mudanças e evitar que os efeitos fossem diluídos no perfil, foram feitas amostragens nas seguintes camadas: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm de profundidade (Figura 9). Adotou-se um fracionamento maior das camadas superficiais do solo (0-40 cm), sendo essas amostradas a cada 10 cm, uma vez que as perdas ou aportes de

carbono são maiores nas camadas superficiais do solo, enquanto que as camadas subsuperficiais (40-100 cm) foram amostradas a cada 20 cm. Também foi determinada a densidade do solo de cada camada amostrada com três repetições por sistema, utilizando o método do anel volumétrico descrito em EMBRAPA (1997).

Para a retirada das amostras deformadas e indeformadas (para determinação da densidade do solo) foi aberta uma trincheira em cada sítio com 0,7 x 0,7 x 1 m (Figura 9). Os resíduos superficiais em cada ponto de coleta foram removidos antes da amostragem para evitar contaminação. As amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos, etiquetadas e encaminhadas ao laboratório de Fertilidade do Solo da Universidade Federal de Pernambuco, UFPE.

Figura 9 - Trincheira para coleta de amostras de solo.



(A) gabarito para marcação da trincheira. (B) trincheira de 0,7 x 0,7 x 1m. (C) detalhe da estratificação do perfil do solo em camadas para coleta de amostras deformadas e indeformadas de solo.

3.3.4 Processamento e análise das amostras de solo

No laboratório, as amostras indeformadas de solo foram colocadas para secar em estufa de ventilação forçada a 105°C por 72 horas para posterior determinação da massa. Após determinada a massa de solo seco, a densidade do solo foi então calculada, utilizando a expressão: $D_s = m_s / v$, onde D_s = a densidade do solo, m_s = massa do solo seco em estufa à 105°C por 72 horas e v é igual ao volume do cilindro utilizado na amostragem do solo indeformado (EMBRAPA, 1999).

Já as amostras deformadas de solo foram secas ao ar e inicialmente passadas em peneira com malha de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente, uma alíquota de cada amostra foi macerada em almofariz e passada em peneira com malha 0,149 mm (100 mesh) para determinação dos teores de C.

As concentrações de CT foram determinadas pelo método da combustão seca, utilizando um analisador elementar CHN (TruSpec CHN LECO® 2006, St. Joseph, EUA), nos laboratórios de solos da Unidade Acadêmica de Garanhuns – UAG e da EMBRAPA CPATSA, em Petrolina (Figura 10).

Figura 10 - Análises de CT pelo método da combustão seca em um analisador elementar de CHN.



3.3.4.1 Cálculo dos estoques de C do solo

Os estoques totais de CT (Mg ha^{-1}) para cada profundidade amostrada foram calculados pelos métodos de camada e de massa de solo equivalentes, como descrito por Ellert *et al.* (2001). O método da camada equivalente leva em consideração a espessura da camada e a densidade do solo (BAYER *et al.*, 2000), enquanto o método da massa equivalente de solo utiliza, como referência, a massa de solo de um tratamento, que é tomada como base para o cálculo do estoque em todos os demais tratamentos (ELLERT e BETTANY, 1995).

No presente estudo, foram utilizadas, como referência, as massas de solo das camadas correspondentes das áreas sob Mata nativa (Mata Atlântica na Zona da Mata e Caatinga nas mesorregiões do Agreste e Sertão), que representa a condição original do solo (DE BONA, 2004). Desta maneira, os estoques totais de CT foram calculados pela equação (1).

$$\text{Estoque CT (Mg ha}^{-1}\text{)} = C_{conc.} * D_s * E * 10.000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} * 0,001 \text{ Mg kg}^{-1} * F_c \quad (1)$$

onde,

$C_{conc.}$ = concentração de C (kg Mg⁻¹); D_s = densidade do solo (Mg m⁻³); E = espessura da camada (m); F_c = fator de correção (1 – (cascalhos % + pedras %) / 100).

A massa de solo foi calculada usando a equação (2) e as espessuras das camadas de solo foram ajustadas usando a equação (3).

$$M_{solo} = D_s * E * 10.000 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \quad (2)$$

onde,

M_{solo} = massa de solo por unidade de área (Mg ha⁻¹)

$$E_{ad} = (M_{solo, equiv.} - M_{solo, camada}) * 0.0001 \text{ ha m}^{-2} / D_s \text{ subsuperficial} \quad (3)$$

onde,

E_{ad} = Espessura adicional da camada subsuperficial necessária para obter-se a massa de solo equivalente (m); $M_{solo, equiv.}$ = massa de solo equivalente; $M_{solo, camada}$ = massa da camada de solo mais pesada até 1 m de profundidade (Mg ha⁻¹); $D_s \text{ subsuperficial}$ = densidade da camada subsuperficial do solo (Mg m⁻³)

3.3.5. Análise dos dados

Os dados dos estoques de CT do solo das regiões úmida, subúmida e semiárida Leste foram transformados em $x = \text{Log}(x)$, e os obtidos na região semiárida Oeste em $x = \sqrt{x}$, e foram submetidos a análise de variância para avaliar a diferença entre os usos da terra e classes de solo, em cada mesorregião. A comparação das médias foi feita pelo teste de Tukey a 5% ($P < 0,05$) de significância. Para as análises e transformações dos dados foi utilizado o software estatístico ASSISTAT® versão 7.7 beta (SILVA, 2016).

3.4 Estudo 3 - Carbono, nitrogênio e abundância natural ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) do solo sob diferentes usos ao longo de um gradiente climático em Pernambuco.

Com o objetivo de identificar a origem da matéria orgânica no solo e a dinâmica do carbono e nitrogênio, foram realizadas medidas isotópicas (^{13}C e ^{15}N) nas amostras coletadas nos perfis de Argissolos de todas as regiões fisiográficas de Pernambuco, em áreas representativas de floresta, áreas de pastagem e áreas agrícolas (identificados após avaliação em campo).

Para o levantamento da abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ e das concentrações de C e de N no solo sob os diferentes usos da terra, fez-se necessário o levantamento prévio das áreas de predominância de Argissolos e dos usos e coberturas vegetais mais representativos do estado.

Os Argissolos são solos bem representativos em Pernambuco (25,23% da superfície) e uma das poucas classes que entre as demais, está distribuída por todo o estado (Tabela 6). São predominantemente encontrados na zona úmida costeira (51%) (EMBRAPA, 2006), ocorrem sob vegetação de florestas subperenifólia e subcaducifólia, mas também estão presentes em porções expressivas no agreste e sertão (20% e 12% respectivamente) (EMBRAPA, 2006). No extremo oeste do estado, em áreas bastante secas, têm como vegetação primária as caatingas hiperxerófilas. Em todos os casos constituem associações com outros solos, como os Latossolos (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000).

Tabela 6 - Abrangência da classe dos Argissolos no Estado de Pernambuco.

Símbolo	Classe	Área mapeada km ²	Superfície do Estado %
PAC	Argissolos Acinzentados	436,05	0,44
PA	Argissolos Amarelos	13.275,92	13,42
PVA	Argissolos Vermelho-Amarelos	9.809,94	9,92
PV	Argissolos Vermelhos	1.432,73	1,45
TOTAL		24.954,64	25,23

Fonte: Adaptado de ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000.

São solos bem desenvolvidos, variando de pouco a muito profundos e com fertilidade oscilando de baixa a média (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000). Nas áreas mais úmidas são predominantemente cultivados com cana-de-açúcar e pastagens, podendo-se encontrar mandioca, abacaxi, coco e *citrus*. No Oeste do estado, nas áreas próximas do rio São Francisco estabeleceu-se o polo de fruticultura, utilizando a irrigação (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000).

3.4.1 Levantamento dos Argissolos e das coberturas vegetais existentes

Para o levantamento foram utilizados dados existentes, por meio da junção de mapas e outros trabalhos recentes feitos em Pernambuco, como descrito no item 3.3.2. Após o levantamento prévio das *manchas* de Argissolos, observou-se a predominância de três usos e coberturas: áreas de floresta (Mata Atlântica/ Caatinga), áreas de pastagem e áreas agrícolas (cultivos de subsistência/ cana-de-açúcar) (Tabela 7).

Tabela 7 - Principais usos e coberturas vegetais existentes em áreas de predominância de Argissolos no estado de Pernambuco, com algumas de suas características.

Usos e Coberturas	Região	Características	
Vegetação Nativa	Mata Atlântica	Zona da Mata	Remanescente de Mata Atlântica do tipo subperenifólia sem qualquer exploração ou interferência antrópica visível.
	Caatinga	Agreste Sertão Leste Sertão Oeste	Remanescente de caatinga nativa dos tipos hipoxerófilas e/ou hiperxerófilas densas, sem qualquer exploração ou interferência antrópica visível.
Áreas Agrícolas	Cana-de-Açúcar	Zona da Mata	Áreas cultivadas com cana-de-açúcar por longos períodos no sistema convencional (aração, gradagem, adubação e correção do solo).
	Cultivos de subsistência	Agreste Sertão Leste Sertão Oeste	Agricultura de subsistência com cultivos de milho, feijão, mandioca e palma (para alimentação animal). A adubação com fertilizantes químicos nessas áreas é praticamente inexistente, havendo em algumas adubação com esterco de curral.
Áreas de Pastagem		Zona da Mata Agreste Sertão Leste Sertão Oeste	Pastagens de <i>Brachiaria</i> spp. e/ou pastagem natural, em sua grande maioria conduzidas sob pastejo contínuo de bovinos e/ou caprinos em regime intensivo ou semi-intensivo e na maioria dos casos extensivo sem fertilização.

Fontes: JACOMINE *et al.*, 1973; (CONDEPE/FIDEM, 2006)

Após o cruzamento das informações do solo e dos usos e coberturas da terra, por meio dos mapas e das imagens de satélite, como descrito no item 3.3.2, foi feita a validação dos pontos amostrais no campo. Com as coordenadas pré-estabelecidas, realizou-se então a validação, verificando-se se os pontos pré-estabelecidos correspondiam à combinação prevista (solo x vegetação). Caso não correspondessem, um novo ponto amostral era procurado.

Ao todo, foram amostrados 36 pontos, localizados em 13 municípios, em áreas representativas das três grandes regiões fisiográficas de Pernambuco (Zona da Mata, Agreste, e Sertão), sendo esse último dividido em porção Leste e porção Oeste, por diferirem quanto as classes de solo, perfazendo ao todo, quatro regiões de coleta. Em cada região, para cada uso e cobertura foram escolhidos três pontos amostrais, tomados como repetições, ficando assim então: 4 regiões fisiográficas x 3 tipos de usos e coberturas x 3 repetições (Tabela 8).

Tabela 8 - Localização dos pontos amostrais de Argissolos em Pernambuco.

Região	Uso/ Cobertura	Município	Altitude (m)	Precipitação * (mm)	Coordenada Geográfica	
					Latitude	Longitude
Zona da Mata	Vegetação Nativa	Itambé	190	1692	-07 24' 15,98012"	-35 11' 09,66282"
		Macaparana	525	1671	-07 31' 53,09993"	-35 28' 18,99993"
		Vitória de Stº Antão	402	1613	-08 12' 25,79993"	-35 20' 52,09993"
	Áreas de Pastagem	Itambé	159	1692	-07 24' 13,84071"	-35 10' 28,08792"
		Macaparana	492	1671	-07 31' 07,39935"	-35 27' 29,63830"
		Vitória de Stº Antão	374	1613	-08 12' 10,29994"	-35 20' 52,39991"
	Áreas Agrícolas	Vitória de Stº Antão	396	1613	-08 12' 08,71695"	-35 20' 05,13896"
		Macaparana	305	1671	-07 31' 21,77571"	-35 26' 36,39046"
		Itambé	173	1692	-07 24' 02,22165"	-35 10' 48,37295"
Agreste	Vegetação Nativa	São Bento do Una	686	843	-08 25' 30,16639"	-36 28' 00,18553"
		São Bento do Una	601	843	-08 29' 28,44766"	-36 22' 47,25184"
		Saloá	977	887	-08 56' 29,99992"	-36 41' 39,99992"
	Áreas de Pastagem	São Bento do Una	701	843	-08 25' 22,54287"	-36 27' 58,50353"
		São Bento do Una	612	843	-08 29' 43,51203"	-36 21' 54,63957"
		Saloá	781	887	-08 59' 21,99987"	-36 43' 21,99986"
	Áreas Agrícolas	São Bento do Una	702	843	-08 25' 23,26578"	-36 28' 09,70534"
		São Bento do Una	607	843	-08 29' 43,01812"	-36 21' 39,35079"
		Saloá	803	887	-08 59' 44,99987"	-36 43' 23,99986"
Sertão Leste	Vegetação Nativa	Custódia	539	839	-08 13' 51,99962"	-37 46' 56,99950"
		Itapetim	749	869	-07 23' 24,02822"	-37 14' 33,68090"
		Mirandiba	521	700	-08 01' 53,60188"	-38 40' 55,78203"
	Áreas de Pastagem	Custódia	526	839	-08 13' 17,55774"	-37 48' 07,88355"
		São José do Egito	630	824	-07 30' 08,54361"	-37 19' 31,29901"
		Betânia	507	834	-08 08' 58,02809"	-37 58' 02,75714"
	Áreas Agrícolas	Tuparetama	576	901	-07 39' 12,99986"	-37 20' 45,99985"
		Mirandiba	503	700	-08 02' 39,12015"	-38 40' 48,78764"
		Mirandiba	502	700	-08 02' 22,76965"	-38 40' 44,09586"
Sertão Oeste	Vegetação Nativa	Ipubi	571	765	-07 39' 50,99994"	-40 10' 13,99992"
		Bodocó	573	700	-07 34' 45,58871"	-40 06' 47,69265"
		Bodocó	524	700	-07 39' 40,30594"	-39 57' 48,80903"
	Áreas de Pastagem	Ipubi	570	765	-07 39' 47,99993"	-40 10' 16,99992"
		Bodocó	541	700	-07 36' 26,21106"	-40 06' 46,25476"
		Bodocó	523	700	-07 39' 37,08543"	-39 57' 47,49630"
	Áreas Agrícolas	Ipubi	569	765	-07 39' 40,99995"	-40 10' 23,99991"
		Bodocó	552	700	-07 34' 36,59776"	-40 06' 36,80398"
		Bodocó	526	700	-07 39' 42,49774"	-39 57' 44,21209"

* Média pluviométrica (mm) de 30 anos (1984 - 2014); Fonte: APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima

3.4.2 Coleta das amostras de solo

Em cada ponto amostral foram coletadas amostras do perfil do solo até a profundidade de 1 m ou até a camada de impedimento em perfis com menos de 1 m de profundidade, como descrito no item 3.3.3.

3.4.3 Processamento e análise das amostras de solo

As amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente uma alíquota de cada amostra foi macerada em almofariz e passada em peneira com malha de 0,149 mm (100 mesh) para determinação dos valores da abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e de $\delta^{15}\text{N}$ e dos teores de C e de N do solo.

As concentrações de CT e de NT, bem como a abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e de $\delta^{15}\text{N}$, foram determinadas por espectrometria de massa isotópica de fluxo contínuo (espectrômetro de massa Finnigan Delta Plus acoplado em um auto-analisador de C e N total Carlo Erba EA 1108 – Finnigan MAT, Bremen, Alemanha), no Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da USP, em Piracicaba, São Paulo. Os resultados foram expressos na forma de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ (‰), sendo o C em relação ao padrão internacional PDB e o N em relação à composição atmosférica (N_2 atmosférico), calculadas pelas equações 4 e 5, respectivamente:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R \text{ amostra} - R_{\text{PDB}}) / R_{\text{PDB}}] \times 1000 \quad (4)$$

em que $R \text{ amostra}$ é a relação molar $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra analisada, e R_{PDB} , a relação molar $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do padrão Pee Dee Belemnite (PDB).

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = [(R \text{ amostra} - R \text{ padrão}) / R \text{ padrão}] \times 1000. \quad (5)$$

onde $R \text{ amostra}$ é a relação molar $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ da amostra analisada, e $R \text{ padrão}$, a relação molar $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ da composição atmosférica (N_2 atmosférico).

3.4.4. Análise dos dados

Os dados foram submetidos ao teste de hipóteses, utilizando-se o *software* estatístico ASSISTAT® (SILVA, 2016), para verificar se apresentavam distribuição normal e atendiam aos critérios necessários para aplicação de um teste paramétrico. Uma vez constatada a normalidade, pelo teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO e WILK, 1965), os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com aplicação do teste F e os valores médios, quando significativos, foram comparados pelo teste de Scott-Knott (SCOTT e KNOTT, 1974)

ao nível de 5% ($P < 0,05$) de significância. No caso em que a normalidade dos dados não foi verificada, foram transformados em Box-Cox (BOX e COX, 1964) e Yeo-Johnson (YEO e JOHNSON, 2000), através do *software* estatístico MiniTab®.

Os usos da terra (floresta, pastagem e agricultura) foram comparados entre si em cada mesorregião de Pernambuco e foram comparados isoladamente dentre as mesorregiões (zona da Mata, Agreste, Sertão Leste e Sertão Oeste), para cada camada (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm) de solo. Realizou-se também correlação de Pearson e regressão linear entre as variáveis precipitação pluvial, altitude, CT, NT, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ na camada de 0-20 cm. As análises estatísticas foram feitas usando-se os *softwares* Assistat versão 7.7 beta (2016) e *Microsoft Excel*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo 1 - Levantamento dos estoques de carbono nos solos de Pernambuco.

4.1.1 Estoques de C por classe de solo

Os dados dos 160 perfis (274 horizontes) das diferentes classes de solos sob todos os usos e coberturas da terra, resultaram numa estimativa de aproximadamente 353 Tg de C (1 Tg = 10^{12} g, ou 1 milhão de toneladas) para a camada de 0-30 cm nos solos de Pernambuco (Tabela 9). Vale ressaltar que o estoque total de C não incluiu as áreas com solos indiscriminados de mangues, que correspondem a 0,19% do território do Estado (185,27 km²) (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000) e as classes dos Organossolos, para as quais não existem informações suficientes de perfis e da área de abrangência no Estado.

Tabela 9 - Estoques de C (0 a 30 cm de profundidade) por unidade de área e para áreas cobertas no território de Pernambuco, classe de solo, número de perfis (n) e erro padrão da média (s(m)).

Classes de solo	*Área (km ²)	n	Estoque de C (Mg ha ⁻¹)	s(m)	C (Tg)	Fontes
Chernossolo	39,50	4	74,02	12,91	0,29	8; 11
Nitossolo	10,10	3	57,55	13,21	0,06	8; 11
Vertissolo	357,09	6	48,10	6,45	1,72	8; 11
Gleissolo	1.234,14	8	46,72	7,17	5,77	2; 8; 11; 13; 14
N. Litólico	20.047,64	7	45,15	6,31	90,52	1; 8; 11
Espodossolo	363,71	5	42,77	6,43	1,56	1; 8; 13; 11; 14
Argissolo	24.954,64	49	40,56	3,25	101,21	2; 3; 4; 5; 7; 8; 9; 11; 13; 14; 15
Luvissolo	8.313,76	15	40,23	5,04	33,45	8; 10; 11
Plintossolo	57,70	2	37,75	0,32	0,22	9; 11
Latossolo	9.257,15	24	37,39	4,13	34,61	1; 2; 4; 8; 11; 13; 14
N. Flúvico	1.990,29	5	36,64	8,22	7,29	8; 11
Planossolo	15.174,57	19	31,50	3,45	47,79	6; 8; 10; 11
N. Regolítico	4.899,18	6	30,81	7,64	15,10	8; 11; 12
N. Quartz.	5.185,51	3	20,48	9,23	10,62	2; 8; 11
Cambissolo	1.622,34	4	15,24	7,86	2,47	8; 15
Totais	93.507,32	160			352,67	

N. Flúvico = Neossolo Flúvico; N. Litólico = Neossolo Litólico; N. Quartz. = Neossolo Quartzarênico; N. Regolít. = Neossolo Regolítico; Fontes: ⁽¹⁾ ANTUNES *et al.*, 2010; ⁽²⁾ ARAÚJO e SALCEDO, 1997; ⁽³⁾ ARAÚJO *et al.*, 2001; ⁽⁴⁾ ARAÚJO *et al.*, 2004; ⁽⁵⁾ BONFIM *et al.*, 2004; ⁽⁶⁾ GALINDO *et al.*, 2008; ⁽⁷⁾ GIONGO *et al.*, 2011; ⁽⁸⁾ JACOMINE *et al.*, 1972; ⁽⁹⁾ OLIVEIRA *et al.*, 2003; ⁽¹⁰⁾ OLIVEIRA *et al.*, 2009; ⁽¹¹⁾ RIBEIRO *et al.*, 1999; ⁽¹²⁾ SANTOS *et al.*, 2012; ⁽¹³⁾ SIMÕES NETO *et al.*, 2009; ⁽¹⁴⁾ SIMÕES NETO *et al.*, 2012; ⁽¹⁵⁾ SOUZA *et al.*, 2010. * Fonte: ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000.

Os Chernossolos, seguidos pelos Nitossolos, Vertissolos e Gleissolos possuem os maiores estoques de carbono por classe, na camada de 0-30 cm, com 74, 58, 48 e 47 Mg ha⁻¹ de C no solo, respectivamente, sob os diferentes usos e coberturas. Já os Cambissolos e os Neossolos Quartzarênicos e Regolíticos apresentaram os menores estoques de C, com 15, 20 e 31 Mg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 9).

Os maiores estoques de C encontrados nas classes dos Chernossolos, Nitossolos, Vertissolos e Gleissolos, estão associados ao grande acúmulo de argila presentes nesses solos (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000; EMBRAPA, 2013), conferindo-lhes maiores estoques de matéria orgânica que os solos mais arenosos. Isso decorre das maiores área superficial específica e quantidade de cargas presentes nos solos argilosos, o que possibilita maiores interações organominerais e menores taxas de mineralização (DICK *et al.*, 2009). Outros fatores como a topografia e o hidromorfismo, também estão associados aos altos estoques de C, como no caso dos Gleissolos, especificamente, que apresentam fortes limitações quanto a drenagem, o que lhes conferem níveis mais altos de MOS, devido ao aporte de sedimentos e resíduos orgânicos provenientes de áreas mais elevadas, e à lenta decomposição associada à baixa atividade microbiana em condições anaeróbicas (RESCK *et al.*, 2008).

Em contrapartida, os Neossolos Quartzarênicos que tem como principal característica a textura muito arenosa (areia ou areia franca), apresentaram maiores estoques de C que os Cambissolos, na camada de 0-30 cm (Tabela 9), onde a textura varia com maior frequência de fraco-arenosa a franco-argiloarenosa (textura média) (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000; EMBRAPA, 2013).

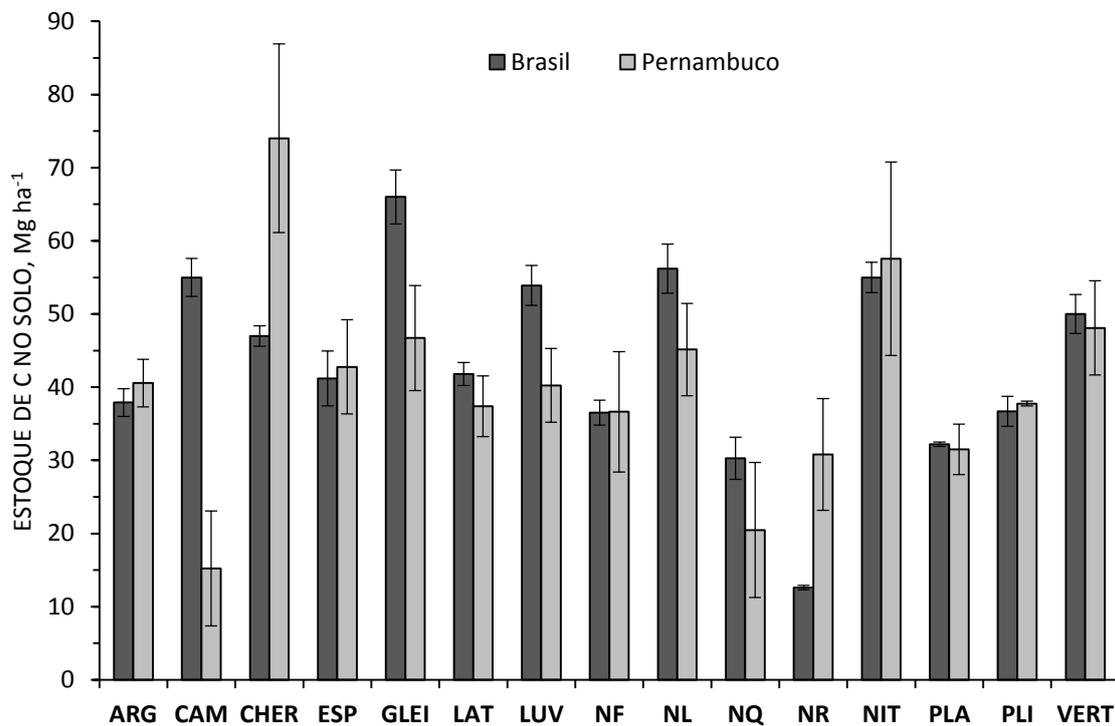
Porém, não se pode desconsiderar que tais comparações merecem um certo cuidado, principalmente em função da falta de padronização nos processos de amostragem realizados nos trabalhos publicados. Além disso, o baixo número amostral, bem como o histórico de usos das áreas e os fatores relacionados as diferenças texturais e mineralógicas existentes na própria classe dos Cambissolos, em segundo e terceiro nível categórico, podem ter contribuído para os baixos valores de C encontrados nesse levantamento, pois de acordo com Araújo Filho *et al.* (2000), os Cambissolos apresentam características que variam muito de um local para outro, apresentando uma grande heterogeneidade no material de origem, e outros fatores de formação dos solos, como o clima e o relevo, por exemplo. Desta forma, a classe dos Cambissolos comportam solos desde fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de alta a baixa saturação por bases, bem como, de alta a baixa atividade das argilas e ainda podem ocorrer com e sem pedregosidade e em diversos relevos, desde o plano até montanhoso.

A média geral dos estoques de C na camada de 0-30 cm, ponderada pela proporção de área das classes de solo, é da ordem de 38 Mg ha⁻¹ e, como corresponde a todos os usos do solo, pode ser extrapolada para 368 Tg de C, fazendo-se assim, a correção para a área total de solos do Estado, incluindo as áreas para as quais não se tem informação (áreas indiscriminadas de mangue e Organossolos).

O valor médio de 38 Mg ha⁻¹ de carbono foi superior ao encontrado por Sampaio e Costa (2011), que estimaram o estoque médio de C por área para todo o semiárido nordestino em 28 Mg ha⁻¹. A explicação desse maior valor médio de C para os solos de Pernambuco deve-se principalmente à incorporação dos perfis amostrados no bioma Mata Atlântica e na maior profundidade utilizada neste trabalho (30 cm). Segundo Post *et al.* (1982), a magnitude da variação dos estoques de C sob vegetação nativa é bastante significativa: regiões de maior altitude, de climas úmidos e sob florestas apresentam maiores estoques de C, sendo os menores estoques encontrados em regiões de clima árido e semiárido.

As estimativas dos estoques de C (Mg ha⁻¹) das classes de solo em Pernambuco ficaram próximas das calculadas por Fidalgo *et al.* (2007), que consideraram os diferentes tipos de solos nos mais variados biomas (Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pantanal) em todo Brasil, com exceção dos Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Luvissolos e dos Neossolos Litólicos e Regolíticos (Figura 11). É provável que as grandes variações dos Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos e Neossolos Regolíticos de Pernambuco estejam associadas ao pequeno número de perfis amostrados. Nesta comparação, deve-se levar em conta também que boa parte dos estoques de C estimados para os solos brasileiros (FIDALGO *et al.*, 2007) referem-se aos biomas Mata Atlântica e Amazônia, esse último, ainda predominantemente sob vegetação natural.

Figura 11 - Estoques médios de C (Mg ha^{-1}) na camada de 0-30 cm nos solos do *Brasil e de Pernambuco.



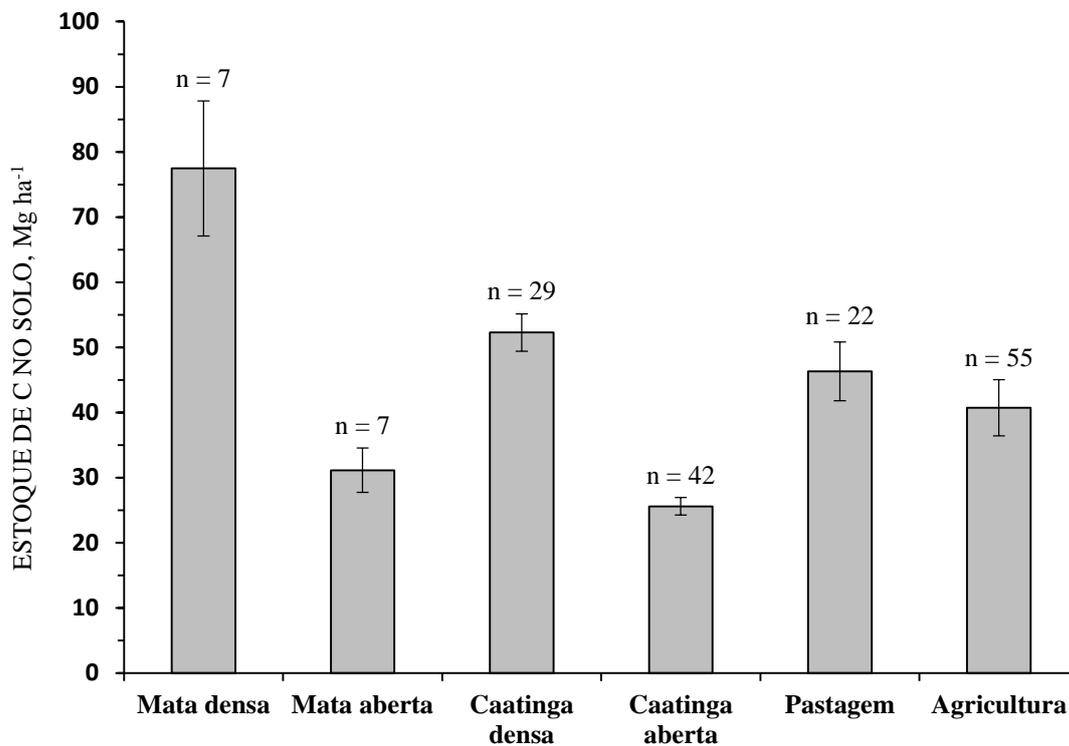
*Adaptado de Fidalgo *et al.*, 2007.

ARG = Argissolo; CAM = Cambissolo; CHER = Chernossolo; ESP = Espodossolo; GLEI = Gleissolo; LAT = Latossolo; LUV = Luvissolo; NF = Neossolo Flúvico; NL = Neossolo Litólico; NQ = Neossolo Quartzarênico; NR = Neossolo Regolítico; NIT = Nitossolo; PLA = Planossolo; PLI = Plintossolo; VERT = Vertissolo.

4.1.2 Estoques de C no solo por uso e cobertura da terra

As áreas de vegetação natural (Mata densa e Caatinga densa) apresentam os maiores estoques de C, com 77 e 52 Mg ha^{-1} , respectivamente, enquanto que as áreas com pastagem e agricultura, apresentam estoques da ordem de 46 e 41 Mg ha^{-1} , respectivamente (Figura 12). Comparando as áreas de floresta natural (Mata densa e Caatinga densa) com as áreas de floresta natural antropizada (Mata aberta e Caatinga aberta), observa-se redução da ordem de 60% para as áreas de Mata e de 51% para as áreas de Caatinga quando há a intervenção do homem (desmatamento) (Figura 12).

Figura 12 – Médias dos estoques de C no solo de 0 a 30 cm, sob diferentes usos e coberturas da terra no estado de Pernambuco.



(n) = número de perfis utilizados para cada uso e cobertura da terra; barras de erro representam o erro padrão da média

Os estoques de C (Mg ha⁻¹) das áreas de florestas naturais que sofreram antropização foram reduzidos drasticamente, ficando inferiores aos das áreas de pastagem e agricultura. Avaliando a conversão das áreas de florestas naturais (Mata densa e Caatinga densa) em pastagem e agricultura, as perdas são menores, da ordem de 40 e 47% para as áreas de Mata densa em relação às áreas de pastagem e agricultura, e de 11 e 22% para as áreas de Caatinga, respectivamente (Figura 12).

É provável que os altos valores encontrados nas áreas de pastagem e agricultura, em relação às áreas de vegetação natural antropizada (Mata aberta e Caatinga aberta), estejam relacionados à profundidade de amostragem (0-30 cm), pois, segundo Lal (2002), a maior contribuição das pastagens para o acúmulo de C no solo advém do seu sistema radicular. Nessas áreas, o teor de C orgânico é maior nas camadas superficiais e decresce em profundidade. Cerca de 40 a 50% do C orgânico do solo pode ser armazenado até 30 cm, e amostragens de até 60 cm capturam cerca de 90% da biomassa radicular e do C orgânico do solo de ecossistemas com pastagens (LAL, 2002).

Existem evidências de que práticas conservacionistas, como determinadas técnicas de plantio (integração lavoura-pecuária-floresta), pastagens bem manejadas, florestas plantadas e sistemas agroflorestais, também podem reduzir drasticamente estas perdas, mantendo os níveis de C orgânico ou até mesmo aumentando-os (CARTER, 2001). A maioria das práticas agrícolas não provoca elevações significativas dos níveis de carbono em pouco tempo, sendo necessários pelo menos 25 a 50 anos antes que um novo equilíbrio seja atingido (BATJES, 2001).

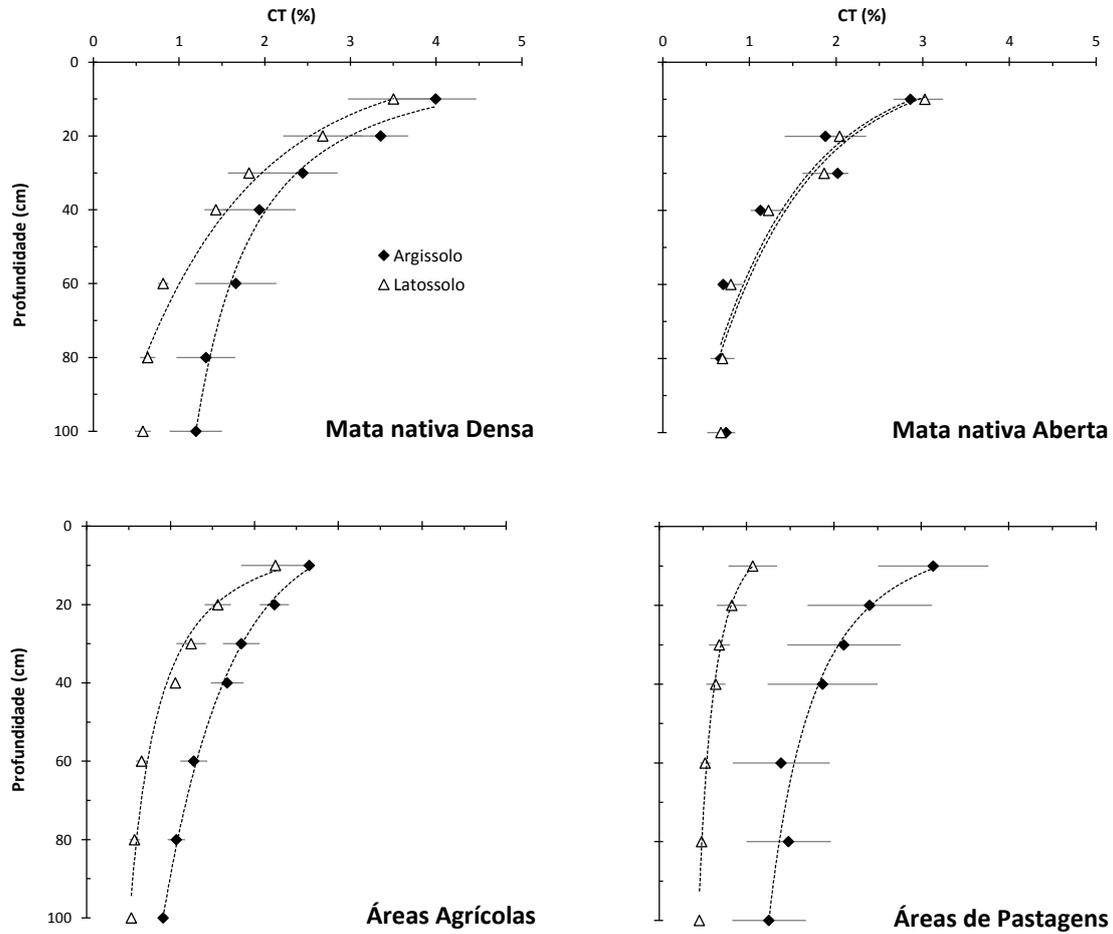
Fujisaka *et al.* (1998) avaliaram os efeitos da conversão de florestas nativas em áreas agrícolas e pastagens, na Amazônia, e constataram redução da ordem de 80% nos estoques C no solo com a transformação, através do corte e queima da vegetação nativa. Ressaltaram que a alta redução registrada deve ter ocorrido em curto prazo, pois ao longo do tempo, em pastagens bem manejadas, esses estoques podem ser similares ou superiores ao de solos sob floresta nativa. Já Borges e Kiehl (1996), observaram em um Latossolo na Bahia, que o estoque total de carbono (100 Mg ha^{-1}) sob vegetação natural até 100 cm de profundidade, foi reduzido em torno de 20% com os cultivos de banana, manga e mandioca, enquanto o cultivo de citros reduziu o estoque em torno de 10%. São valores que se aproximam bastante dos encontrados nesse trabalho.

4.2 Estudo 2 - Distribuição em profundidade e estoques de carbono em solos sob diferentes coberturas e usos da terra em Pernambuco.

4.2.1 Distribuição do CT no solo em profundidade

Os padrões de distribuição de CT nos perfis dos solos foram diferentes entre os usos e coberturas da terra, em cada região fisiográfica, mas, de modo geral, correlacionaram-se inversamente com a profundidade do solo, sendo as concentrações mais altas nas camadas superficiais e decrescendo nas camadas subjacentes de forma exponencial ou potencial (Figuras 13, 14, 15 e 16). Entretanto, em alguns perfis de áreas agrícolas e de vegetação nativa aberta, principalmente nas Zonas do Agreste e Sertão, as concentrações variaram pouco nas maiores profundidades (Figuras 14 e 15), devido principalmente ao menor aporte de resíduos orgânicos nos solos dessas regiões, em decorrência da menor produção de biomassa vegetal que é limitada pela baixa precipitação pluvial.

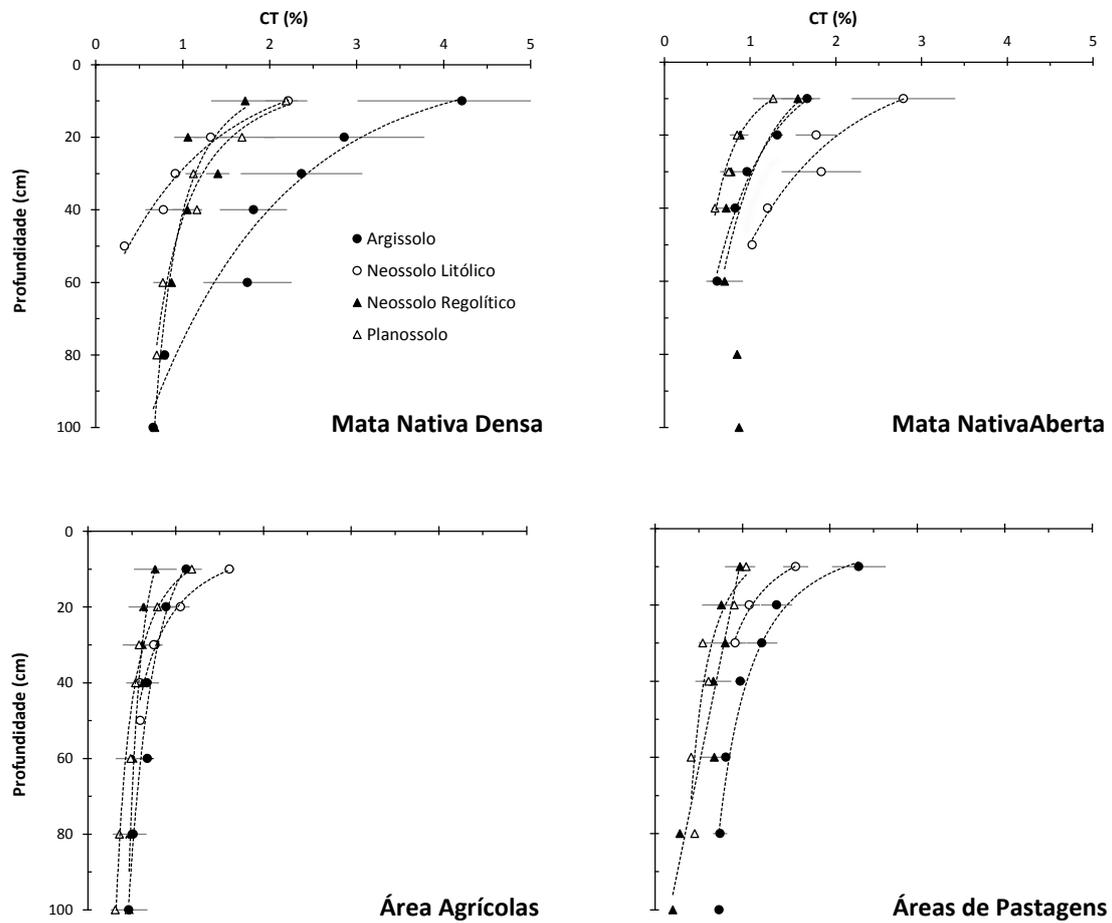
Figura 13 - Distribuição em profundidade do C do solo sob diferentes usos e coberturas da terra na Zona da Mata de Pernambuco.



As barras de erro representam o erro padrão da média (n = 3).

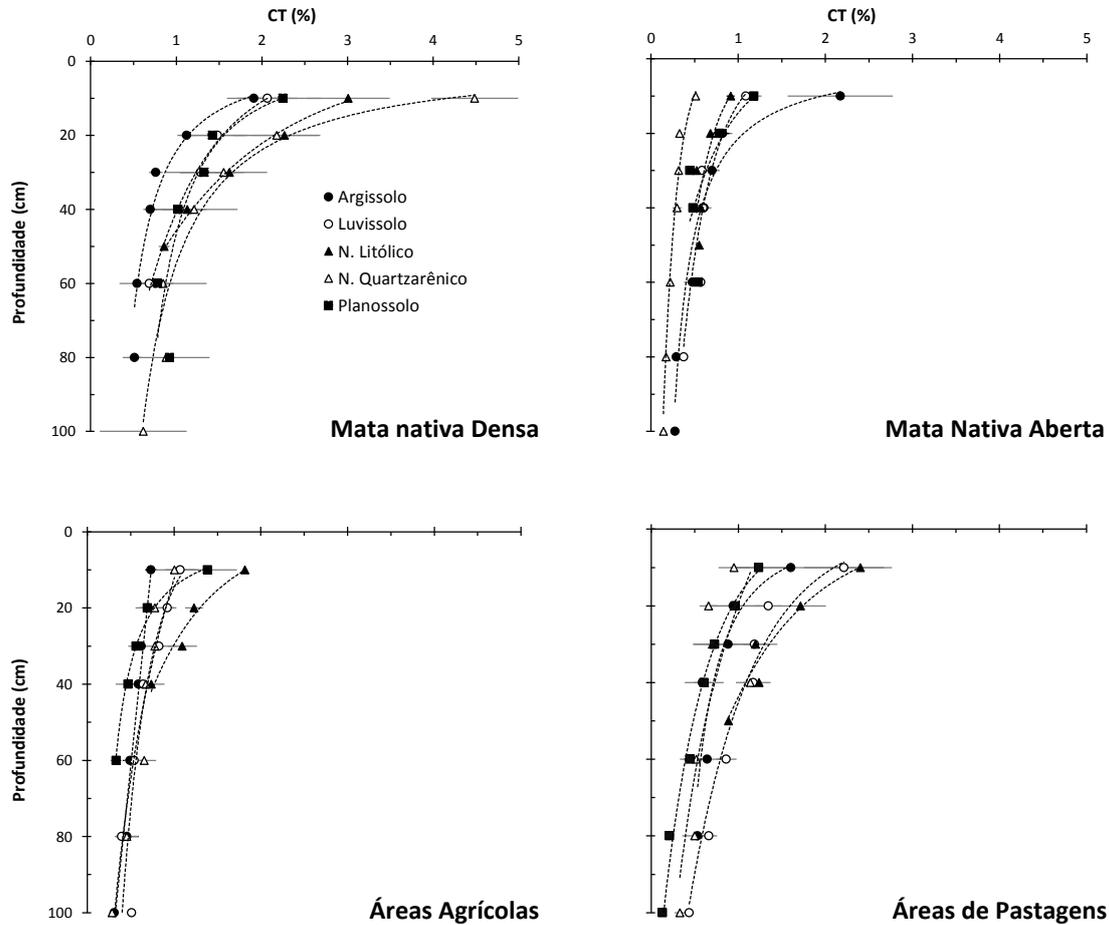
Reduções das concentrações de C com a maior profundidade dos solos confirmam os resultados obtidos por diversos autores (ROSCOE e MACHADO 2002; ADUAN *et al.*, 2003; LAL, 2005; PAIVA e FARIA, 2007; PAIVA *et al.*, 2011), assim como o fato do modelo exponencial ser o que melhor explica a distribuição do C no perfil do solo (ARROUAYS e PELISSIER, 1994; RICHTER *et al.*, 1999; JOBBÁGY e JACKSON, 2000).

Figura 14 - Distribuição em profundidade do C do solo sob diversos usos e coberturas da terra na Zona do Agreste de Pernambuco.



As barras de erro representam o erro padrão da média (n = 3).

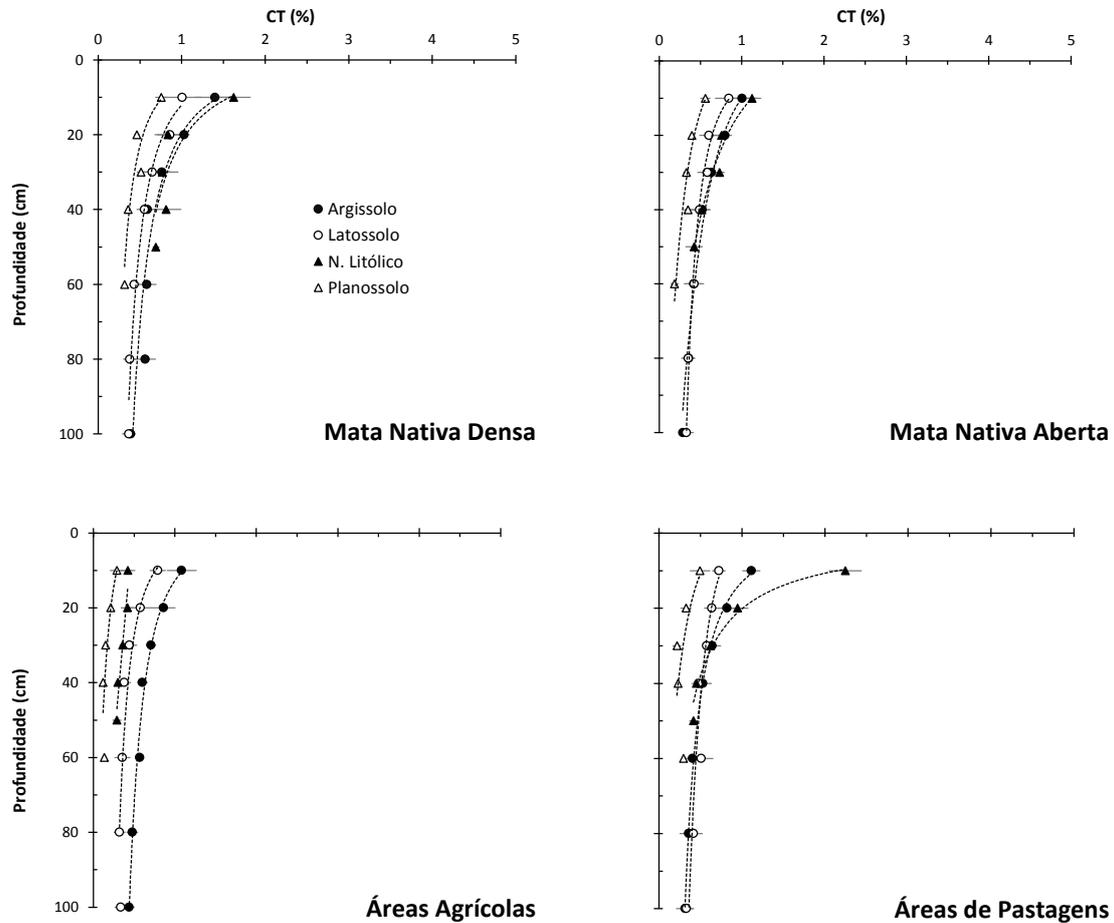
Figura 15 - Distribuição em profundidade do C do solo sob diversos usos e coberturas da terra na Zona do Sertão Leste de Pernambuco.



N. = Neossolo; As barras de erro representam o erro padrão da média (n = 3).

Maiores concentrações de CT foram verificadas nas regiões úmida e subúmida que na semiárida (Figuras 13, 14, 15 e 16), principalmente nas camadas superficiais do solo (0-10 e 10-20 cm) sob mata densa. Esses resultados demonstram a perda no conteúdo de carbono com a antropização da vegetação nativa ou sua substituição por cultivos, sobretudo nas regiões de maior regime pluvial, onde há maior produção de biomassa vegetal e conseqüentemente maior deposição de C ao solo (STEVENSON, 1994). Sob vegetação nativa, a preservação da MOS tende a ser máxima, pois o revolvimento do solo é mínimo e o aporte de biomassa é mais elevado do que em áreas cultivadas (Zech *et al.*, 1997). Nas áreas agrícolas, o revolvimento expõe as frações orgânicas aos microrganismos decompositores e há maior quebra de macroagregados (SILVA *et al.*, 1999) o que acarreta em declínio nas concentrações de C do solo. Outros estudos corroboram o declínio nas concentrações de COS com a conversão de florestas nativas em sistemas agropecuários (HOUGHTON *et al.*, 1991, ZINN *et al.*, 2002; LEITE *et al.*, 2003; LAL, 2005).

Figura 16 - Distribuição em profundidade do C do solo sob diversos usos e coberturas da terra na Zona do Sertão Oeste de Pernambuco.



N. = Neossolo; As barras de erro representam o erro padrão da média (n = 3).

4.2.2 Estoques totais de C no solo

Os estoques totais de C (Mg ha^{-1}) nos solos variaram bastante entre as mesorregiões do estado e foram influenciados significativamente pelos usos e coberturas da terra, bem como pelas concentrações e distribuição do C no perfil. Os maiores estoques de CT ocorreram, de maneira geral, sob vegetações nativas densas e decresceram da região úmida à semiárida Oeste, com grandes variações entre as classes solos (Tabela 10). Esse comportamento é típico de situação sob vegetação nativa, como já mencionado anteriormente, pois o aporte de resíduos vegetais na superfície do solo promove a decomposição lenta e gradual, que garante a constante incorporação de material orgânico no solo, sobretudo nas regiões úmidas e subúmidas, onde há maior produção de biomassa em função da maior disponibilidade de água.

Os usos e coberturas da terra (Mata nativa aberta, áreas agrícolas e áreas de pastagens) não apresentaram diferenças significativas ($P < 0,05$) entre si, dentro das mesorregiões e classes de solos, exceto para os Neossolos Litólicos da região agreste e os Neossolos Quartzarênicos da região do sertão Leste (Tabela 10).

Tabela 10 - Estoques de carbono total (Mg ha^{-1}) na camada de 1 m de profundidade, em solos sob diferentes usos e coberturas da terra em Pernambuco.

Regiões	Tipo de solo	Mata Nativa		Áreas Agrícolas	Áreas de Pastagem
		Densa	Aberta		
Zona da Mata	Argissolo	251,4 aA	152,7 aA	191,5 aA	228,1 aA
	Latossolo	156,6 aA	148,2 aAB	114,7 aAB	73,9 bB
CV% = 6,1					
Agreste	Argissolo	211,6 aA	74,4 abB	83,5 aB	128,3 aAB
	Neossolo Litólico*	65,1 bAB	115,4 aA	52,3 aB	50,6 bB
	Neossolo Regolítico	151,2 aA	134,0 aAB	85,5 aB	81,9 abB
	Planossolo	131,7 aA	46,5 bB	79,7 aAB	68,9 abAB
CV% = 6,6					
Sertão Leste	Argissolo	72,7 bA	61,2 aA	70,0 aA	63,1 aA
	Luvissolo	100,2 abA	72,6 aA	93,2 aA	141,0 aA
	Neossolo Litólico*	77,9 bA	35,7 aA	57,2 aA	75,5 aA
	Neossolo Quartz.	205,6 aA	37,7 aC	90,6 aB	92,5 aB
	Planossolo	128,8 abA	53,7 aB	56,3 aB	76,9 aAB
CV% = 8,2					
Sertão Oeste	Argissolo	98,3 aA	66,7 aA	89,4 aA	75,5 aA
	Latossolo	72,1 abA	63,3 aA	57,2 aA	66,1 aA
	Neossolo Litólico*	54,5 bcA	39,1 abAB	22,2 bB	51,4 aAB
	Planossolo	27,7 cA	25,2 bA	15,1 bA	19,1 bA
CV% = 16,3					

*Neossolo Litólico (até 50 cm de profundidade); CV% = Coeficiente de variação em %; Quartz. = Quartzarênico; Letras minúsculas na coluna comparam as classes de solo dentro de cada uso para uma mesma mesorregião e letras maiúsculas na linha comparam os usos dentro de cada mesorregião e classe de solo isoladamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

É provável que os altos valores encontrados nas áreas de Mata nativa (aberta e densa) sob os Neossolos (Litólicos e Quartzarênicos) das zonas subúmida e semiárida Leste, respectivamente (Figuras 14 e 15; Tabela 10), estejam relacionados ao histórico de usos dessas áreas, e possivelmente à presença de carvão pirogênico, decorrente das queimadas nessas localidades, visto que os cultivos agrícolas e as pastagens são, na maioria das vezes, formados após a retirada das Matas nativas pelo uso do fogo e em áreas declivosas sem um manejo adequado dos solos (SAMPAIO e COSTA, 2011). Conseqüentemente, o uso agropecuário é

comumente seguido pelo abandono das áreas, ocorrendo então a regeneração da vegetação nativa.

Vale salientar também, que não há uma distinção clara entre mata nativa densa e mata nativa aberta (ou pastos nativos), ambos correspondendo principalmente à vegetação de caatinga, quase toda ela ocupada eventualmente com rebanhos domésticos. Admite-se que as matas densas sejam vegetação de maior porte, mais alta, mais fechada e mais arbórea, que as matas abertas (ou pastos nativos). Estes podem ir desde áreas com cobertura quase exclusiva de herbáceas e subarbustos até capoeiras mais densas. Parte deles são áreas em regeneração natural, correspondendo ao ciclo de pousio da agricultura itinerante. Parte mantém-se aberta com retiradas periódicas de lenha e queimadas (SAMPAIO e COSTA, 2011).

De uma maneira geral, os estoques de CT nas camadas dos solos seguiram as mesmas tendências dos teores de C em profundidade (Figuras 13, 14, 15 e 16), com os maiores estoques nas camadas superficiais e decrescendo em direção as camadas mais profundas (Tabela 11). Em geral, a camada superficial até 30 cm estocava cerca de 40 a 60% do carbono total do solo até 1 m de profundidade, mas podia chegar até 80% nas classes de solo com menos de 1 m de profundidade, como alguns Planossolos e até quase 100% em Neossolos Litólicos, com profundidade máxima de 50 cm (Tabela 11). Jobbagy & Jackson (2000) afirmaram que cerca de 50% do carbono total do solo estão estocados em camadas mais profundas e diversos outros autores também chamaram a atenção para a importância do subsolo no armazenamento de CT (LORENZ e LAL, 2005; JANZEN, 2006; SCHÖNING *et al.*, 2006)

Determinações de estoques de CT no solo até um metro de profundidade, sob diferentes usos e coberturas da terra nas diferentes regiões do Nordeste são escassas, dificultando as comparações. Porém, comparações limitadas às camadas mais superficiais dos solos na região semiárida revelam resultados assemelhados aos aqui reportados. Em áreas de mata nativa sob Argissolo no semiárido pernambucano, por exemplo, Kauffman *et al.* (1993) encontraram estoques de C de 26,2 Mg ha⁻¹ na camada de 0-20 cm, enquanto Fraga e Salcedo (2004) reportaram valores de 28,6 Mg ha⁻¹ para a camada de 0-15 cm. Esses valores são próximos aos encontrados nesse estudo para as áreas de mata aberta, tanto no sertão Leste (22,6 Mg ha⁻¹) quanto Oeste (26,9 Mg ha⁻¹), mas inferiores aos da mata densa (29,5 e 36,0 Mg ha⁻¹, respectivamente) considerando a camada de 0-20 cm (Tabela 4) em Argissolos. Já Maia *et al.* (2007), trabalhando em área de caatinga hiperxerófila sobre Luvisolo no semiárido cearense, encontraram valor na camada de 0-20 cm (44,4 Mg ha⁻¹) bem próximo aos do presente estudo em áreas de caatinga densa (46,9 Mg ha⁻¹) sobre Luvisolo (Tabela 11).

Tabela 11 - Estoques de CT (Mg ha⁻¹) em camadas de solos sob diferentes usos e coberturas da terra em Pernambuco.

Solos	Zona da Mata		Agreste				Sertão Leste					Sertão Oeste			
	Argissolo	Latossolo	Argissolo	N. Litólico*	N. Regolítico	Planossolo	Argissolo	Luvissolo	N. Litólico*	N. Quartz.	Planossolo	Argissolo	Latossolo	N. Litólico*	Planossolo
Prof. (cm)	Mata Nativa Densa														
00-10	45	36	49	28	24	28	18	27	21	21	21	20	14	17	10
10-20	44	32	34	16	16	24	11	20	17	32	17	16	11	9	5
20-30	32	22	22	9	21	17	10	18	17	23	18	11	9	9	8
30-40	25	18	23	7	16	18	9	15	11	18	14	9	8	11	2
40-60	42	20	49	5	27	23	13	21	12	26	23	16	11	10	3
60-80	32	15	19	0	25	23	13	0	0	28	28	15	10	0	0
80-100	31	13	15	0	22	0	0	0	0	19	0	11	10	0	0
Prof. (cm)	Mata Nativa Aberta														
00-10	33	33	21	37	22	14	15	15	7	7	15	15	12	12	7
10-20	24	26	16	23	13	12	7	11	6	5	10	12	8	8	6
20-30	27	23	11	23	11	11	7	8	7	5	5	9	8	7	3
30-40	15	16	10	17	11	9	6	9	8	5	6	6	7	6	5
40-60	19	20	16	16	22	0	10	17	8	7	17	7	11	5	4
60-80	17	16	0	0	27	0	8	12	0	5	0	9	9	0	0
80-100	19	15	0	0	28	0	8	0	0	4	0	8	9	0	0
Prof. (cm)	Áreas Agrícolas														
00-10	30	24	14	21	11	15	9	14	20	14	20	16	11	5	4
10-20	30	20	11	10	9	11	9	13	14	11	10	13	8	5	3
20-30	25	16	10	7	9	9	8	12	14	11	9	10	6	4	2
30-40	22	14	9	7	10	8	8	10	10	10	7	9	5	4	2
40-60	34	17	15	7	16	14	14	16	0	20	10	16	10	4	4
60-80	27	13	12	0	15	12	13	13	0	14	0	14	9	0	0
80-100	24	12	11	0	15	10	9	15	0	9	0	12	9	0	0
Prof. (cm)	Áreas de Pastagem														
00-10	36	12	30	22	14	13	9	28	26	13	18	16	10	25	7
10-20	32	10	18	16	11	13	5	18	15	10	14	13	8	9	5
20-30	28	9	16	13	12	8	9	17	10	10	11	9	8	6	2
30-40	24	8	10	0	8	9	7	17	12	17	9	8	7	5	2
40-60	38	13	21	0	21	11	18	26	12	16	14	11	14	6	3
60-80	37	11	17	0	9	14	15	21	0	16	6	10	11	0	0
80-100	33	11	17	0	7	0	0	13	0	10	4	9	9	0	0

* Neossolo Litólico (até 50 cm); Prof. (cm) = Profundidade em cm; N. Quartz. = Neossolo Quartzarênico.

Os Argissolos apresentaram os maiores estoques de CT em todas as regiões fisiográficas do estado, exceto na região semiárida Leste, onde ocorreu o inverso e apresentaram os menores estoques (Tabela 10). De acordo com Sollins *et al.* (1996), muitas variáveis ambientais e

antrópicas podem influenciar os estoques de C nas classes de solo, dentre elas composição e quantidade do resíduo vegetal sobre o solo (serapilheira), fertilidade natural, temperatura, precipitação pluvial, manejo e histórico da área, além da composição granulométrica do solo, de modo que se torna difícil estabelecer um padrão definido para uma mesma classe de solo em regiões fisiográficas e usos distintos.

Na região úmida, os Argissolos apresentaram maiores estoques de C que os Latossolos em todos os quatro usos (Tabela 10), embora essa superioridade só tenha sido significativa ($P < 0,05$) nas áreas de pastagem, onde os Argissolos ($228,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) estocaram três vezes mais que os Latossolos ($73,9 \text{ Mg ha}^{-1}$).

A mudança de uso da terra, nessa região, resultou em decréscimo dos estoques de CT do solo nos Latossolos, tendo as áreas de mata densa os maiores estoques ($156,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), chegando a ser duas vezes superiores aos das áreas de pastagem ($73,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Tabela 10).

Dentre as regiões, a subúmida do Agreste foi onde os estoques de CT foram mais influenciados pelos usos e coberturas da terra, em todas as classes de solo (Argissolo, Neossolo Litólico, Neossolo Regolítico e Planossolo), com decréscimos nos usos quando comparados à vegetação densa. Os maiores decréscimos ocorreram nos Argissolos, com reduções de mais de 60% nas áreas de mata aberta ($74,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) e agricultura ($83,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) em relação as áreas de mata densa ($211,6 \text{ Mg ha}^{-1}$). Nas áreas de mata densa e pastagem os menores estoques foram verificados nos Neossolos Litólicos, um fato influenciado pela reduzida profundidade destes solos, que não ultrapassa os 50 cm (Tabela 10).

Na região semiárida Leste, as áreas de mata densa sobre Neossolos Quartzarênicos ($205,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) apresentaram os maiores estoques de C, significativamente superiores aos dos Argissolos ($72,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) e dos Neossolos Litólicos ($77,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) que apresentaram estoques mais de 60% inferiores (Tabela 10). Quanto à mudança de uso da terra, apenas nos Neossolos Quartzarênicos e nos Planossolos houve reduções significativas.

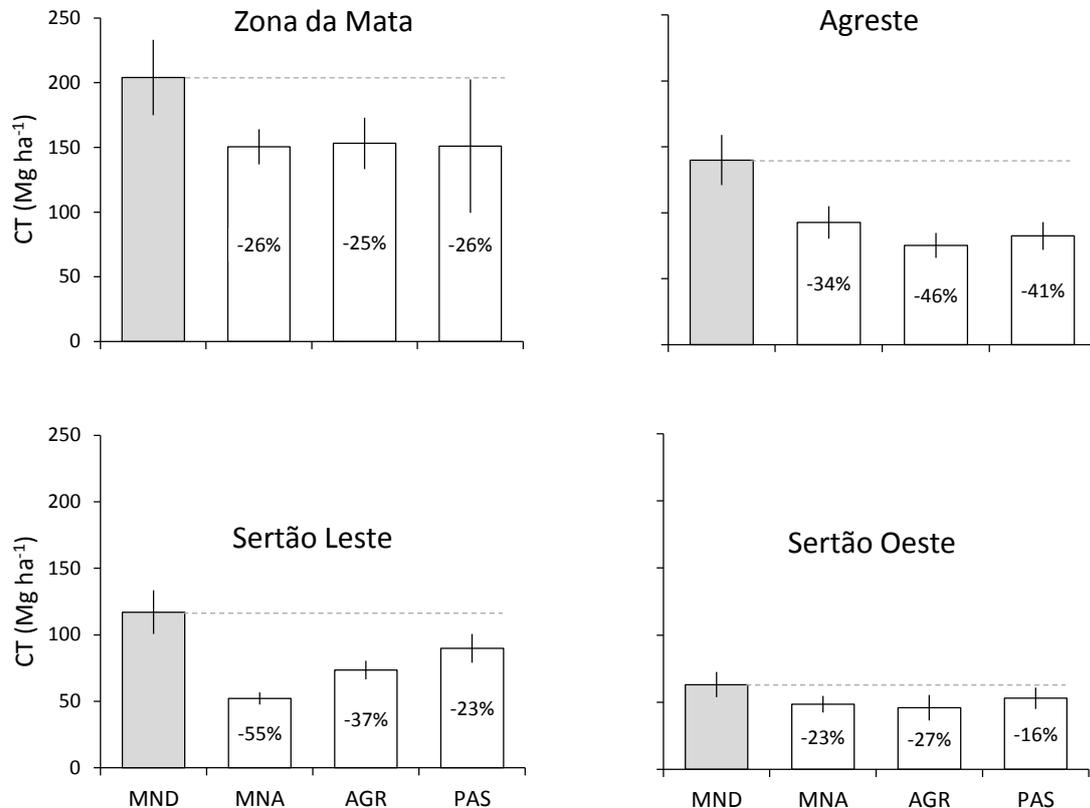
Diferenças em relação à mudança do uso da terra na região semiárida Oeste só foram verificadas nos Neossolos Litólicos, que sob mata densa ($54,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) estocaram mais do dobro ($22,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) que sob cultivos agrícolas (Tabela 10). Sob matas densas os Argissolos ($98,3 \text{ Mg ha}^{-1}$) apresentaram os maiores estoques, superando em 45% os Neossolos Litólicos ($54,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) e em 72% os Planossolos ($27,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), mas não diferindo significativamente dos Latossolos ($72,1 \text{ Mg ha}^{-1}$). Os Argissolos também foram superiores às outras classes (Latosolos, Neossolos Litólicos e Planossolos) nas áreas de mata aberta ($66,7 \text{ Mg ha}^{-1}$), agricultura ($89,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) e pastagem ($75,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), enquanto os menores estoques foram verificados nos Planossolos, em todos os usos.

Comparando os estoques totais de CT (0-100 cm) sob vegetação nativa densa, em todas as classes de solo por região fisiográfica, levando em conta que a principal característica dessas áreas é não ter sofrido antropização recente e de maior monta, a sequência decrescente nos estoques foi: na região úmida, Argissolo > Latossolo; na região subúmida, Argissolo > Neossolo Regolítico > Planossolo > Neossolo Litólico; região semiárida Leste: Neossolo Quartzarênico > Planossolo > Luvisolo > Neossolo Litólico > Argissolo; e na região semiárida Oeste: Argissolo > Latossolo > Neossolo Litólico > Planossolo.

As médias gerais de todas as classes de solo para os usos e coberturas da terra em cada região fisiográfica indicam que as maiores reduções nos estoques de CT do solo em relação as áreas de referência, sob mata densa, ocorrem nas regiões subúmida e semiárida Leste, com reduções que variam de 34 a 55%, e de 16 a 27%, respectivamente (Figura 17).

Sampaio e Costa (2011) estimaram os estoques de carbono em diferentes usos da terra no Nordeste, considerando reduções de 25 e 33%, com a mudança de caatinga para agricultura, nas camadas de 0-20 e 20-100 cm, respectivamente. São valores inferiores aos encontrados nesse estudo para a região semiárida Leste (27%) e Oeste (37%) (Figura 17).

Figura 17 - Redução nos estoques de CT em função das mudanças no uso da terra nas regiões fisiográficas de Pernambuco.



MND = Mata Nativa Densa; MNA = Mata Nativa Aberta; AGR = Áreas Agrícolas; PAS = Áreas de Pastagens. Barras de erro representam o erro padrão da média: ZM (n = 6); AG (n = 12); SL (n = 15) e SO (n = 12). As porcentagens negativas representam as reduções dos usos e coberturas em relação as áreas de referência (Mata Nativa Densa).

As reduções nos estoques de C variaram bastante dentro de cada região e uso e cobertura da terra, mas, de maneira geral, foram maiores com o uso agrícola das terras (AGR), enquanto que os menores impactos foram verificados sob pastagem (Figura 17). O uso agrícola reduz os estoques de forma considerável, uma vez que envolve atividades que afetam as taxas de adição e decomposição da matéria orgânica (ZINN *et al.*, 2005; ROSA *et al.*, 2003). Essa redução pode ser atribuída ao menor aporte de resíduos orgânicos e aos processos mais acelerados de mineralização da matéria orgânica, mas também ao aumento da erosão do solo (HOUGHTON *et al.*, 1991). A maior aeração do solo, a aplicação de fertilizantes e a correção da acidez do solo e o declínio da agregação do solo são outros fatores que contribuem para acelerar a decomposição da MOS nesses sistemas.

Estoques sob pastagem semelhantes aos sob matas também foram encontrados em outros estudos (TARRÉ *et al.*, 2001; SILVA *et al.*, 2004) e têm sido atribuídos ao sistema radicular bem desenvolvido das gramíneas (RANGEL e SILVA, 2007). Segundo Teixeira e

Bastos (1989), as pastagens apresentam distribuição regular do sistema radicular até 1 metro de profundidade, com distribuição de 46% das raízes na camada superficial do solo (0-10 cm). Os estoques de C no solo dependem, dentre outros fatores, do clima, do conteúdo e natureza das argilas e do uso e do sistema de manejo adotado (EBELING *et al.*, 2013). Em áreas de matas nativas de regiões semiáridas, os estoques de CT são menores que os encontrados sob matas nativas de áreas úmidas (POST *et al.*, 1982). Devido à baixa pluviosidade típica dessas regiões, o desenvolvimento da vegetação, seja ela de caatinga, áreas agrícolas ou pastos é limitado.

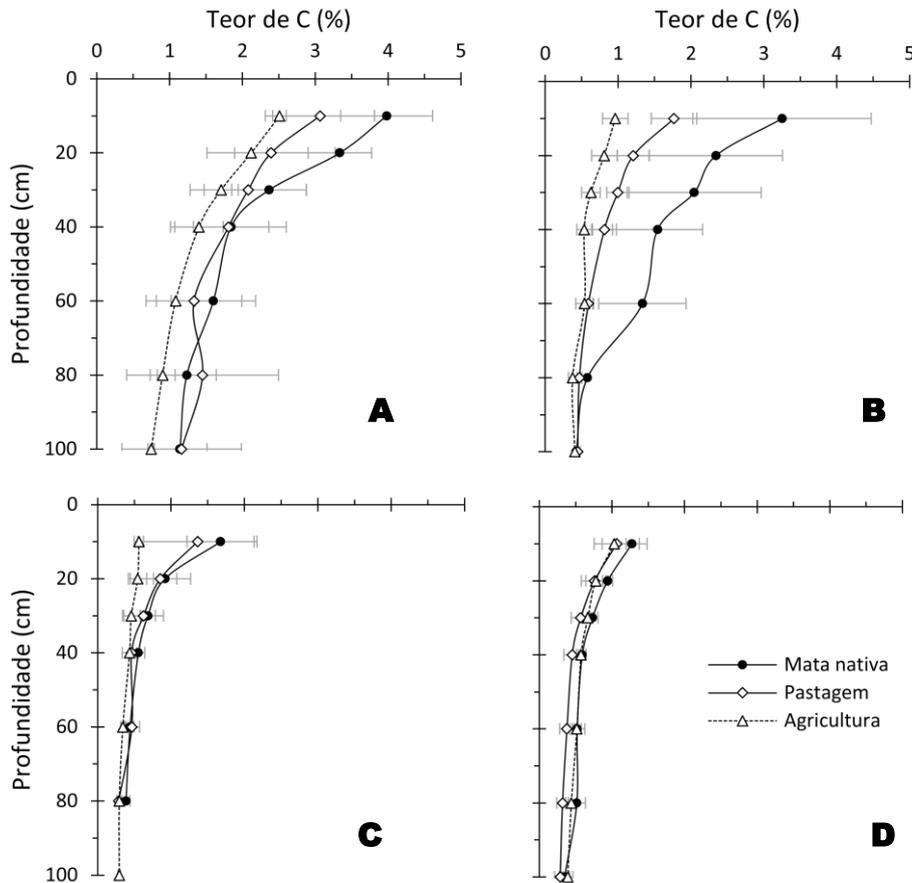
Outros estudos corroboram os resultados aqui encontrados, demonstrando reduções drásticas de CT no solo com a mudança de uso da terra em regiões semiáridas. Liu *et al.* (2010) concluíram que pastagens nativas e áreas com arbustos nativos na região semiárida da China apresentam estoques de C aproximadamente 35% maiores que solos com cultivos convencionais. Já Fracetto *et al.* (2012) observaram perdas de 50% de C em áreas agrícolas quando comparadas a de vegetação nativa no semiárido brasileiro. Enquanto Traoré *et al.* (2015) encontraram reduções de C de 49 e 54% em áreas degradadas sob Cambissolos e Luvisolos quando comparadas as áreas preservadas no semiárido da África.

4.3 Estudo 3 - Carbono, nitrogênio e abundância natural ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) do solo sob diferentes usos ao longo de um gradiente climático em Pernambuco.

4.3.1 Carbono total

As concentrações de CT nos Argissolos variaram entre as mesorregiões e entre os diferentes usos da terra, em todas as camadas. As maiores concentrações foram encontradas nas regiões da Zona da Mata, úmida e do Agreste, subúmido, que diferiram ($p < 0,05$) das demais regiões semiáridas (sertão Leste e Oeste), (Figura 18).

Figura 18 - Teores de C (%) em perfis de Argissolos sob diferentes usos terra nas diferentes regiões fisiográficas de Pernambuco.

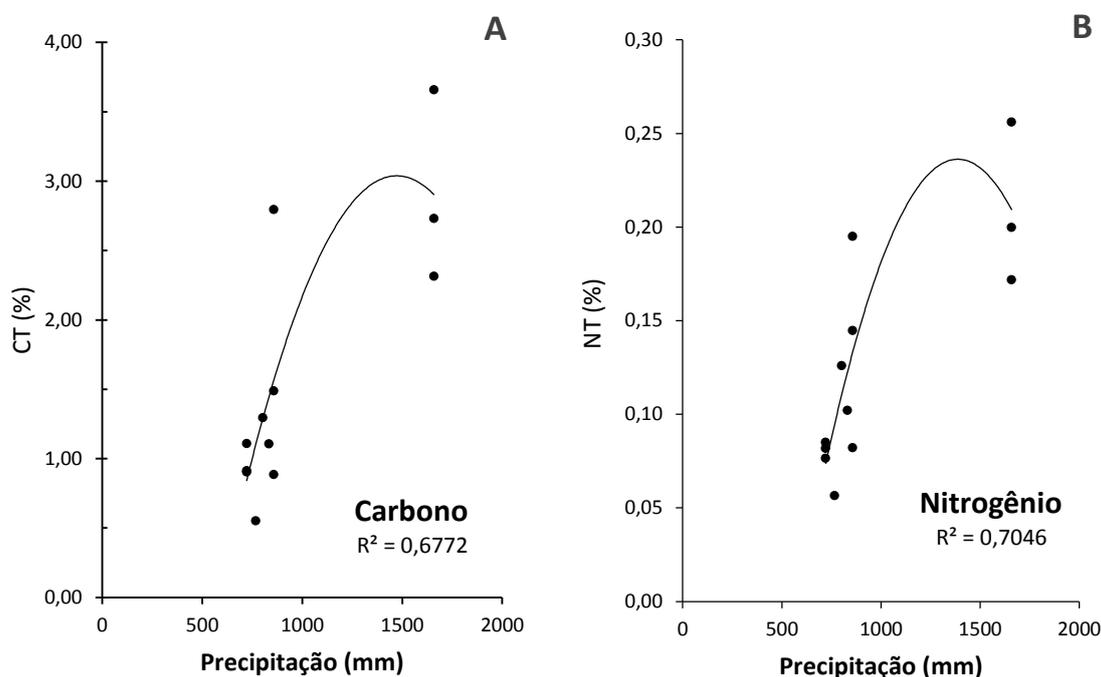


(A) Zona da Mata - ZM; (B) Agreste - AG; (C) Sertão Leste - SL e (D) Sertão Oeste - SO. As barras de erros representam o erro padrão da média ($n = 3$).

As concentrações de CT na camada superficial (0-20 cm) correlacionaram-se quadraticamente com a precipitação pluviométrica média anual (Figura 19A), os maiores valores ocorreram nas áreas com precipitação entre 900 e 1700 mm. Não houve efeito significativo da altitude em relação ao CT do solo.

Entretanto, vale salientar que não foram avaliadas as áreas de Brejos de Altitude (“ilhas” de floresta úmida estabelecidas na região semiárida, associadas à ocorrência de planaltos e chapadas entre 500 a 1100 m de altitude), onde as chuvas orográficas garantem níveis de precipitação superiores a 1200 mm.ano^{-1} .

Figura 19 - Carbono e nitrogênio totais do solo (0-20 cm) em função da precipitação pluvial média anual, em diferentes usos e coberturas da terra em Argissolos de Pernambuco.



As áreas de floresta na Zona da Mata, apresentaram as maiores concentrações de C (%), com valores que variaram de 1,14% a 3,98 ao longo do perfil do solo (0-100 cm), enquanto que os menores valores ocorreram no Sertão Leste, em áreas agrícolas (AGR), com valores que variaram de 0,29 a 0,56 % (0-80 cm).

Maiores concentrações de CT nas mesorregiões úmida (ZM) e subúmida (AG) são esperadas, uma vez que sistemas nativos, apenas refletem o equilíbrio das entradas e saídas de acordo com o regime edafoclimático (MARTINS-NETO e MATSUMOTO, 2010). A concentração de carbono no solo é função de uma variedade de fatores, mas, o clima é o que apresenta um efeito mais pronunciado (LAL, 2005). A precipitação pluvial apresenta relação positiva com o teor de carbono no solo, como verificado na figura 19A, em função da maior disponibilidade de água implicar em maior produção de biomassa vegetal, o que significa maior aporte de C ao solo (STEVENSON, 1994).

Valores semelhantes aos encontrados nesse estudo foram reportados por Araújo *et al.* (2001), em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, na Zona da Mata que encontraram valores de CT variando de 0,3 a 0,7% ao longo do perfil (0-60 cm) de um Argissolo Vermelho-Amarelo latossólico álico. Também em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar na mesma mesorregião, Simões Neto *et al.* (2012) apresentaram valores de 1,79 e de 0,89% para dois Argissolos

Amarelos na camada de 0-20 cm. Já Nascimento *et al.* (2004), reportaram valores mais baixos (0,6%) para a mesma camada de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico de textura média cultivado com milho e feijoeiro na Zona da Mata. Para a região semiárida do Sertão Oeste, em áreas de caatinga degradada, Souza *et al.* (2010) reportaram valores de CT de 0,2 a 0,5 (0-105 cm) em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico cambissólico e Oliveira *et al.* (2003), apresentaram valores de 0,3 a 0,8% (0-100 cm) em dois Argissolos Amarelos Eutróficos.

Os teores de CT tenderam a diminuir em profundidade (Figura 18), um padrão observado em vários trabalhos, decorrente dos maiores aportes de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo (ARROUAYS e PELISSIER, 1994; RICHTER *et al.*, 1999; JOBBÁGY e JACKSON, 2000; ZHOU *et al.*, 2006; BAYER *et al.*, 2006; SALTON *et al.*, 2011). Em geral, não foram encontradas diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os usos e coberturas da terra (floresta, áreas de pastagem e áreas agrícolas), embora, as áreas de floresta e pastagem tenham apresentado maiores concentrações de C ao longo do perfil do solo (0-100 cm) que as áreas de cultivo agrícola, sobretudo nas camadas mais superficiais nas mesorregiões úmidas e subúmidas de Pernambuco (Figura 18).

Os resultados corroboram o trabalho de Barreto *et al.* (2008), que avaliaram os teores de CT sob três diferentes usos e coberturas da terra (Mata Atlântica, cultivo de cacau e pastagem) no sul do Bahia e concluíram que a substituição da mata nativa pelo cultivo de cacau ou pastagem não alteraram os teores de CT e de suas frações nas camadas superficiais do solo. Em estudo semelhante, Tarré *et al.* (2001), compararam os níveis de carbono no solo de áreas de pastagem (*Brachiaria humidicola*) com nove anos de uso e consorciada com leguminosa (*Desmodium ovalifolium*), com uma área de Mata Atlântica adjacente, e também não encontraram diferenças significativas entre os sistemas avaliados. Em contrapartida, os resultados divergem de outros estudos, que apontam diferenças entre os usos e coberturas da terra, após a retirada da vegetação nativa para a introdução de áreas agrícolas e/ou pastoris (SILVA *et al.*, 2004; MAIA *et al.*, 2009; SIQUEIRA NETO *et al.*, 2009).

Os trabalhos encontrados na literatura muitas vezes são contraditórios em relação às diferenças entre os teores de C encontrados em solos de mata nativa e pastagens. Muitos mostram que, pelo maior aporte de matéria orgânica proporcionado pelas raízes, os solos sob pastagens apresentam teores iguais ou superiores aos encontrados em ambientes de mata (GERALDES *et al.*, 1995; CERRI *et al.*, 1996; NEILL *et al.*, 1996; FERNANDES *et al.*, 1997; MARCHIORI JÚNIOR e MELO, 1999; TARRÉ *et al.*, 2001), enquanto outros mostram valores mais altos nos solos de mata (DANTAS, 1979; DADALTO *et al.*, 1986; NOORDWIJK *et al.*,

1997; ZECH *et al.*, 1997 ZINN *et al.*, 2002; LEITE *et al.*, 2003; LAL, 2005), proporcionado pelo maior aporte global de matéria orgânica.

É provável, que o baixo número amostral, bem como o histórico de usos das áreas agrícolas e os fatores relacionados as diferenças texturais e mineralógicas existentes na própria classe dos Argissolos, em segundo e terceiro nível categórico, tenham contribuído para a alta variabilidade dos dados, proporcionando dessa maneira uma ausência de diferenças estatísticas significativas entre os usos da terra nas mesorregiões do estudo, sobretudo entre as áreas de cultivos agrícolas e as áreas de vegetação nativa. Sendo assim, torna-se difícil estabelecer padrões quanto à mudança da vegetação nativa para outros usos da terra, devido à complexidade da dinâmica do C no solo, e de outros fatores como a variabilidade espacial, tipos de clima, diferenças texturais e mineralógicas e histórico de manejo das áreas, como já reportado por diversos autores na literatura (FREITAS *et al.*, 2000; BAYER *et al.*, 2006; MARCHÃO *et al.*, 2009; MAIA *et al.*, 2009) e também constatadas nesse estudo.

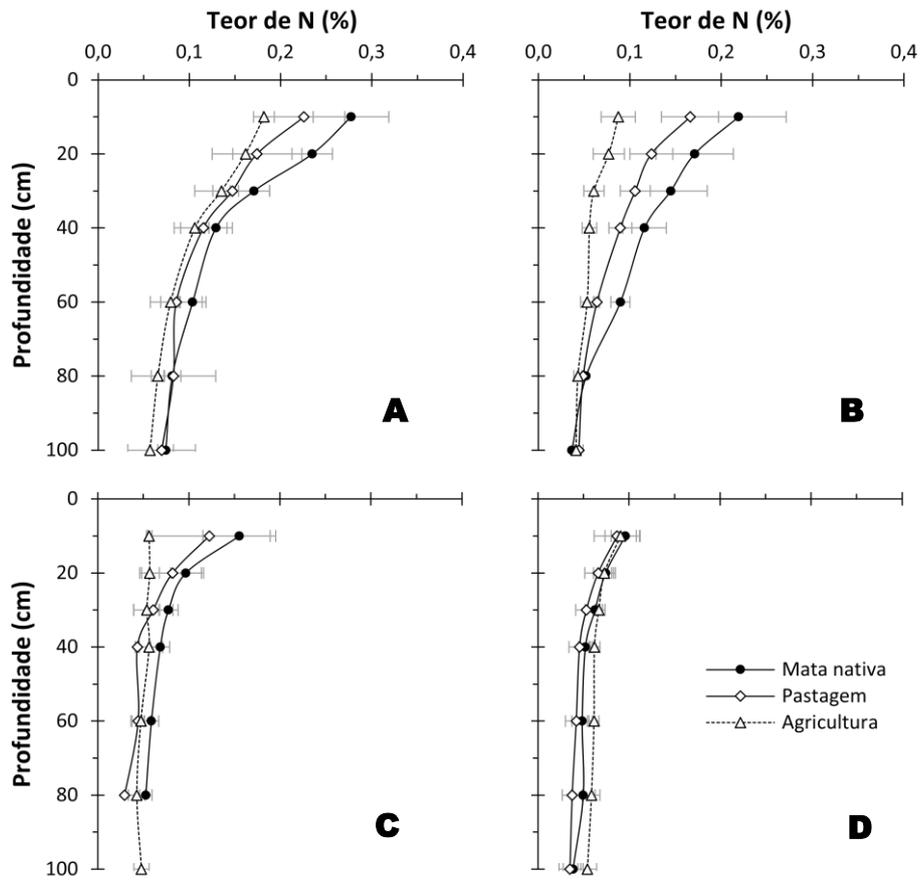
4.3.2 Nitrogênio total

As concentrações de N seguiram a mesma tendência das de C sendo superiores ($p > 0,05$) nas regiões da Mata e Agreste que aos dos Sertões, correlacionando-se quadraticamente com a precipitação pluvial média anual na camada superficial do solo (Figura 19B) e sem efeito significativo para a altitude. Também não foram verificadas diferenças significativas entre os usos e coberturas do solo nas camadas estudadas, exceto para as áreas agrícolas, onde o Argissolo da mesorregião do AG é significativamente inferior ao da ZM (Figura 20).

Os usos e coberturas da terra também não apresentaram diferenças significativas, assim como para as concentrações de C nas regiões da ZM, SL e SO, apenas nas camadas subsuperficiais (20-30 e 30-40 cm) nos Argissolos da mesorregião AG. Para essas camadas do solo, as concentrações foram maiores nas áreas de floresta e pastagem do que nas de agricultura (Figura 20), tendência essa, também verificada nas demais camadas do perfil, embora sem diferirem estatisticamente.

As concentrações de N nas áreas de floresta na região úmida (ZM) e subúmida (AG), variaram de 0,07 a 0,28% e 0,04 a 0,22% ao longo do perfil do solo (0-100 cm), respectivamente. Já as menores concentrações, foram encontradas nas áreas de agricultura na mesorregião do Sertão Leste, com valores que variaram de 0,06% na camada de 0-10 cm e 0,04% na camada de 80-100 cm (Figura 19).

Figura 20 - Teores de N (%) em perfis de Argissolos sob diferentes usos e cobertura da terra nas diferentes mesorregiões do estado de Pernambuco.

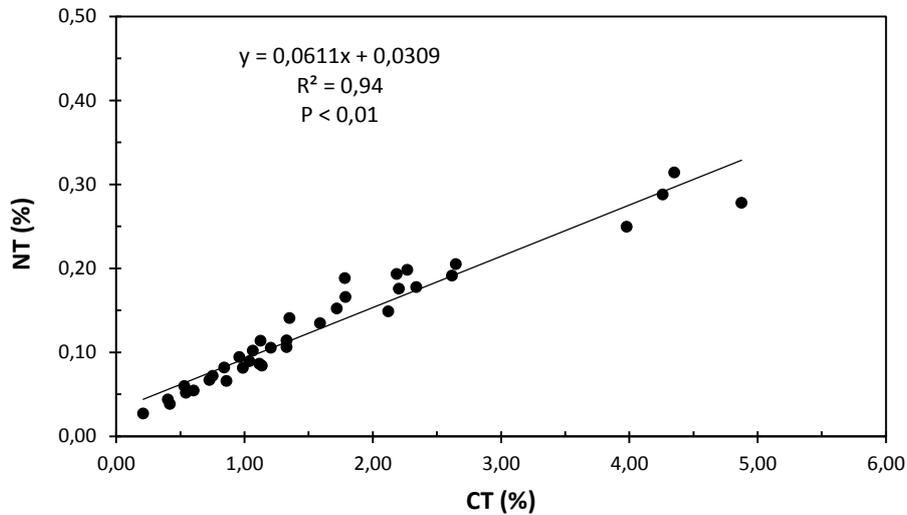


(A) Zona da Mata; (B) Agreste; (C) Sertão Leste e (D) Sertão Oeste. As barras de erros representam o erro padrão da média (n = 3).

Os resultados encontrados nesse estudo estão de acordo com os valores reportados na literatura. Em estudo realizado por Araújo *et al.* (2001), onde verificaram as tendências no potencial de mineralização de N, ao longo de 10 anos de cultivo de cana-de-açúcar sob um Argissolo Vermelho-Amarelo latossólico álico no município de Goiana, Zona da Mata, úmida de Pernambuco, os autores encontraram valores de N (%) que variavam de 0,03 a 0,06 ao longo do perfil do solo (0-60 cm). Enquanto Oliveira *et al.* (2003) em Argissolos do Sertão Oeste de Pernambuco, sob áreas de Caatinga degradada, reportaram valores de N (%) da ordem de 0,03 a 0,04 (0-100 cm) em um Argissolo Amarelo Eutrófico planossólico solódico e de 0,04 a 0,06 (0-90 cm) para um Argissolo Amarelo Eutrófico plíntico sódico.

Em diferentes estudos realizados nos biomas brasileiros, de maneira geral, os autores comprovaram existir uma relação linear entre os teores de COT e NT do solo (DOU *et al.*, 2007; SÁ e LAL, 2009; SIQUEIRA NETO *et al.*, 2009, 2010; MAIA *et al.*, 2009, 2010; FRAZÃO *et al.*, 2010), resultados esses que corroboram os encontrados nesse estudo (Figura 21).

Figura 21 - Nitrogênio total do solo (0-20 cm) em função do carbono total do solo sob vários usos e coberturas em Argissolos de Pernambuco.



4.3.3 Relação C: N

As relações C:N variaram de acordo com as mesorregiões e com os diferentes usos e coberturas da terra. Os Argissolos do Sertão Leste sob floresta tiveram as menores relações C:N em todas as camadas estudadas, sendo significativamente inferiores ($p < 0,05$) aos Argissolos da mesorregião do SL (Tabela 12).

As áreas sob Floresta da região úmida apresentaram as maiores relações C:N em todas as profundidades analisadas, exceto nas camadas de 30-40 e 60-80 cm, variando de 13,6 a 14,7, enquanto as áreas de pastagens apresentaram valores de 13,2 a 15,3 e as áreas agrícolas de 12,5 a 13,8 entre as camadas de 0-100 cm de profundidade. As menores relações C:N foram encontradas nas áreas agrícolas do SL do estado com valores que variaram de 7,2 a 9,9. De uma maneira geral, os usos da região úmida (ZM) do estado tiveram as maiores relações C:N, seguidas pelas mesorregiões subúmida (AG) e semiárida em sua porção mais oeste (SO), seguindo a mesma tendência das concentrações de C e N do solo.

A MOS apresenta, em geral, uma relação C:N bastante estável, variando de 8 a 14, quando atinge a condição de húmus (BRADY, 1989; STEVENSON 1994; BATJES, 1996; LUCHESE *et al.*, 2002). Áreas sob florestas e cultivos agrícolas apresentam valores de relação C:N entre 9 e 14, com valor médio de 12, enquanto áreas sob pastagem, tendem a apresentar valores mais elevados (BATJES, 1996). As relações são mais baixas em solos de zonas áridas e semiáridas, que nas zonas úmidas e subúmidas (LUCHESE *et al.*, 2002), o que está de acordo com o presente estudo.

Tabela 12 - Relação C:N em perfis de Argissolos sob diferentes usos e coberturas da terra nas diferentes regiões do estado de Pernambuco.

Profundidades/ Usos	MESORREGIÕES			
	Zona da Mata	Agreste	Sertão Leste	Sertão Oeste
0-10 cm	CV% 11,94			
Floresta	14,31 aA	14,03 aA	10,72 bA	13,31 aA
Pastagem	13,30 aA	10,69 bB	10,09 bA	12,20 aA
Agricultura	13,84 aA	11,14 bB	09,93 bA	11,47 bA
10-20 cm	CV% 14,37			
Floresta	14,18 aA	12,83 aA	9,54 bA	12,76 aA
Pastagem	13,15 aA	9,84 aA	9,56 aA	11,33 aA
Agricultura	13,12 aA	10,55 aA	9,48 aA	10,58 aA
20-30 cm	CV% 2,45			
Floresta	13,56 aA	12,84 aA	8,85 bA	11,94 aA
Pastagem	13,40 aA	9,44 aA	9,45 aA	10,63 aA
Agricultura	12,52 aA	10,23 aA	8,67 aA	9,93 aA
30-40 cm	CV% 2,46			
Floresta	13,79 aA	12,30 aA	8,14 bA	11,59 aA
Pastagem	14,41 aA	8,98 aA	10,71 aA	9,88 aA
Agricultura	12,89 aA	9,47 bA	8,07 bA	9,27 bA
40-60 cm	CV% 3,02			
Floresta	14,63 aA	13,84 aA	7,58 bA	10,94 aA
Pastagem	14,08 aA	09,21 aA	10,27 aA	9,08 aA
Agricultura	13,26 aA	9,90 aA	7,77 bA	8,41 bA
60-80 cm	CV% 3,83			
Floresta	14,57 aA	11,09 aA	7,32 bB	10,57 aA
Pastagem	15,31 aA	9,62 bA	9,72 bA	8,67 bA
Agricultura	13,62 aA	8,63 bA	7,21 bB	7,52 bA
80-100 cm	CV% 4,60			
Floresta	14,74 aA	11,55 aA	-	9,19 aA
Pastagem	14,58 aA	10,35 bA	-	8,49 bA
Agricultura	13,17 aA	9,86 aA	-	7,29 bA

CV% = Coeficiente de variação. Letras minúsculas na linha comparam cada uso em relação as regiões para cada profundidade e letras maiúsculas na coluna comparam os usos dentro de cada região e profundidade. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

De acordo com Mello *et al.* (1983), existe também uma tendência de decréscimo da relação C:N no perfil de solo com aumento da profundidade. Fato esse, observado em todos os usos e coberturas da região semiárida em sua porção mais oeste (SO) e apenas nas áreas de

Floresta da porção leste (SL). Os demais usos e coberturas das mesorregiões úmida (ZM) e subúmida (AG) não apresentaram tal característica (Tabela 12).

Os valores de relação C:N em áreas agrícolas encontrados nesse estudo são maiores aos encontrados por Pedra *et al.* (2012) que reportaram valores de relação C:N da ordem de 11 a 13 em áreas sob cultivo convencional com uso de aração e gradagem na camada de 0-20 cm em um Argissolo Vermelho-Amarelo da região úmida de Sergipe e aos encontrados por Fracetto *et al.* (2012), que avaliaram a camada superficial (0-30 cm) de áreas agrícolas cultivadas com mamona e também de áreas de caatinga preservada em um Latossolo Vermelho Eutrófico de textura argilosa no semiárido da Bahia. Os autores reportaram valores de relação C:N da ordem de 8 a 9, e de 5 a 12, para as áreas agrícolas cultivadas com mamona e caatinga preservada, respectivamente.

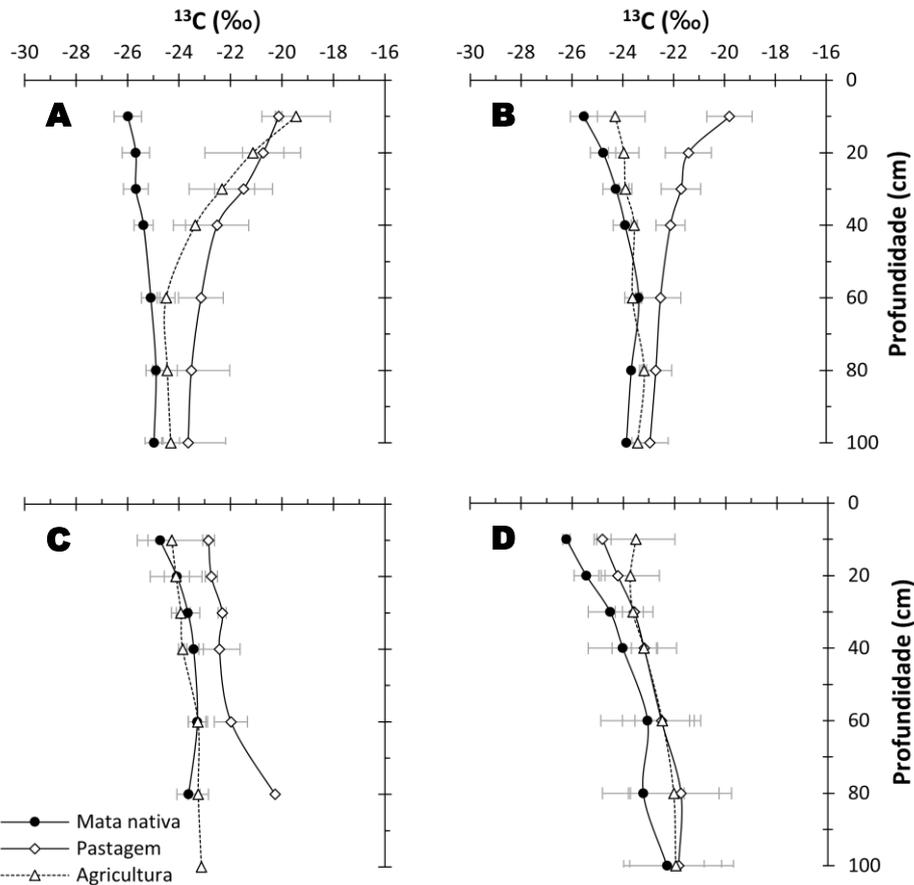
Os usos e coberturas da terra avaliados nesse estudo (floresta, pastagem e agricultura) não diferiram entre si nas mesorregiões, exceto na camada de 0-10 cm na zona subúmida (AG), onde as áreas de floresta foram superiores as demais, e na camada 80-100 cm no SL, onde as áreas sob pastagem foram superiores (Tabela 12).

4.3.4 Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$

As abundâncias naturais de ^{13}C (‰) praticamente não variaram entre as regiões em todas as camadas de solo, com exceção das camadas de 0-10 cm, onde foram maiores nas áreas de pastagem e agricultura e na camada de 80-100 cm nas áreas de Floresta. Não houve efeito significativo da precipitação ou altitude ou CT com a abundância natural de ^{13}C na camada superficial do solo (0-20 cm). Já os usos e coberturas da terra (Floresta, Pastagem e Agricultura), apresentaram diferenças significativas entre si dentro das mesorregiões ZM, AG e SO, exclusivamente nas camadas superficiais do solo (até 40 cm) (Figura 22).

As áreas sob Pastagem das regiões do SL (-22,85) e SO (-24,81) apresentaram os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ ‰ na camada de 0-10 cm, diferindo estatisticamente ($p < 0,05$) das mesorregiões úmida (-20,13) e subúmida (-19,80). Nas áreas de Floresta, não foram observadas diferenças significativas entre as mesorregiões estudadas para a camada de 0-10 cm. Entretanto, tais diferenças foram observadas na última camada do perfil (80-100 cm), onde as áreas de Floresta da zona úmida (ZM) apresentaram os menores valores (-24,98) diferindo das demais mesorregiões para esse uso (Figura 22).

Figura 22 - Composição isotópica de ^{13}C (‰) em perfis de Argissolos sob diferentes usos e cobertura da terra nas diferentes regiões do estado de Pernambuco.



(A) Zona da Mata; (B) Agreste; (C) Sertão Leste e (D) Sertão Oeste. As barras de erros representam o erro padrão da média (n = 3).

As diferenças entre os usos e coberturas (floresta, pastagem e agricultura) na mesorregião da ZM, foram evidenciados nas camadas superficiais do solo (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm), tendo as Florestas apresentado os valores mais negativos em relação as áreas de pastagem e agricultura, que não diferiram entre si. Enquanto que nas demais regiões (subúmida e semiáridas), em geral, não foram observadas diferenças significativas entre os usos da terra, exceto nas pastagens da região subúmida, que apresentou os maiores valores em relação as áreas de Floresta e Agricultura, que não diferiram entre si.

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) refletem os usos e coberturas de cada mesorregião (Figura 22). As áreas de Floresta da zona úmida (ZM) e da semiárida oeste (SO), cuja principal característica é de não ter sido convertida em outros usos, apresentaram os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$, sendo verificada variação de -25,98 ‰ (0-10 cm) a -24,98 ‰ (80-100 cm) e de -26,23‰ (0-10 cm) a -22,29‰ (80-100 cm). Estes resultados demonstram a predominância de plantas C_3 e são

característicos de solos sob florestas nativas no Brasil. Valores semelhantes aos encontrados nesse estudo foram obtidos por Tarré *et al.* (2001), Balbinot (2009) e Pinheiro *et al.* (2010), em estudos também realizados na Mata Atlântica, assim como os realizados em outros biomas brasileiros (ROSCOE *et al.*, 2000; JANTALIA *et al.*, 2007; MARTINELLI *et al.*, 2009; COSTA JÚNIOR *et al.*, 2011; ARAÚJO *et al.*, 2011).

As mudanças mais significativas nos valores de ^{13}C ocorreram nos Argissolos sob pastagem e agricultura na região úmida (ZM), e sob pastagem na região subúmida (AG) até a profundidade de 40 cm (Figura 22), indicando alterações na cobertura vegetal que, em um passado recente, passou por transformação antrópica, mudando de vegetação do ciclo C_3 para vegetação do ciclo C_4 . Estes resultados indicam que a contribuição de plantas C_4 na matéria orgânica do solo nessas regiões para esses usos é de vários anos atrás (± 50 anos) porque já atingiu camadas mais profundas do solo, como também observado por Smith e Epstein (1971).

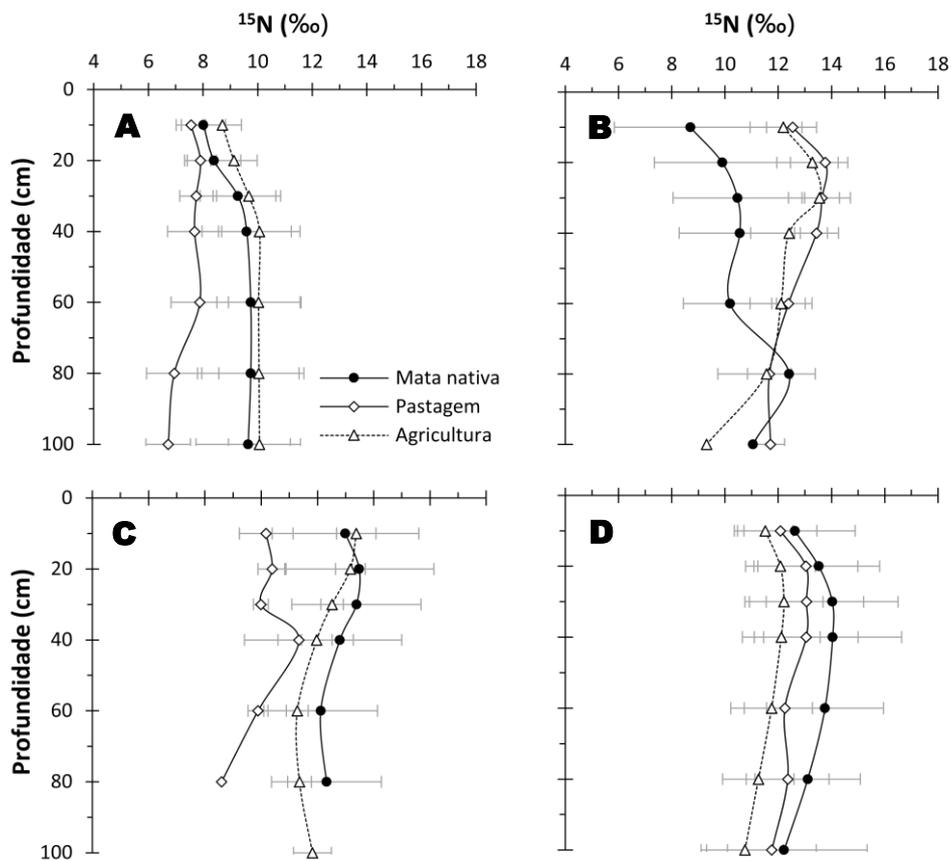
Nas áreas sob Mata nativa de uma maneira geral, os perfis de $\delta^{13}\text{C}$ (0-100 cm) não apresentaram alterações bruscas, indicando ocupação contínua por vegetação do ciclo C_3 (Figura 22). Verificou-se nessas mesmas áreas um enriquecimento isotópico em profundidade, com diferenças de 1,00; 1,67; 1,11 e 3,94 ‰ menos negativo, da superfície até o intervalo entre 80-100 cm para as mesorregiões úmida (ZM), subúmida (AG), semiárida Leste (SL) e semiárida Oeste (SO), respectivamente. Esse padrão de enriquecimento de $\delta^{13}\text{C}$ em profundidade, também tem sido reportado por outros autores (SALIMON, 2003; TELLES *et al.*, 2003) e pode estar relacionado tanto com a migração e redeposição de partículas de argila que normalmente carregam maior valor de $\delta^{13}\text{C}$, como as diferenças que ocorrem nas taxas de decomposição de resíduos orgânicos com diferentes assinaturas de $\delta^{13}\text{C}$, como celulose e hemicelulose, que são frequentemente 1-2 ‰ mais enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$, enquanto a lignina é 2-6 ‰ inferior em relação ao valor $\delta^{13}\text{C}$ do tecido total da planta (LIU *et al.*, 2014).

De acordo com Martinelli *et al.* (2009), quando a vegetação predominante é do tipo C_3 e não existem vestígios de mudança no tipo de vegetação em tempos longínquos, o valor de $\delta^{13}\text{C}$ da MOS aumenta em direção as camadas mais profundas do solo. Geralmente, o incremento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ da MOS é cerca de 3 a 4‰ entre a camada superficial e as camadas mais profundas. Padrão esse, também observado nas áreas de Floresta do semiárido Oeste (SO), indicando que aquela vegetação sempre foi composta por plantas C_3 e menos evidente nas demais mesorregiões do estado.

4.3.5 Abundância natural de $\delta^{15}\text{N}$

Os valores referentes a abundância natural de $\delta^{15}\text{N}$ (‰), apresentaram diferenças estatísticas entre as mesorregiões para cada uso e cobertura da terra. Embora, não tenham apresentado diferenças entre os usos dentro de cada mesorregião isoladamente (Figura 23).

Figura 23 - Variação dos valores de ^{15}N (‰) em perfis de Argissolos sob diferentes usos e cobertura da terra nas diferentes mesorregiões do estado de Pernambuco.



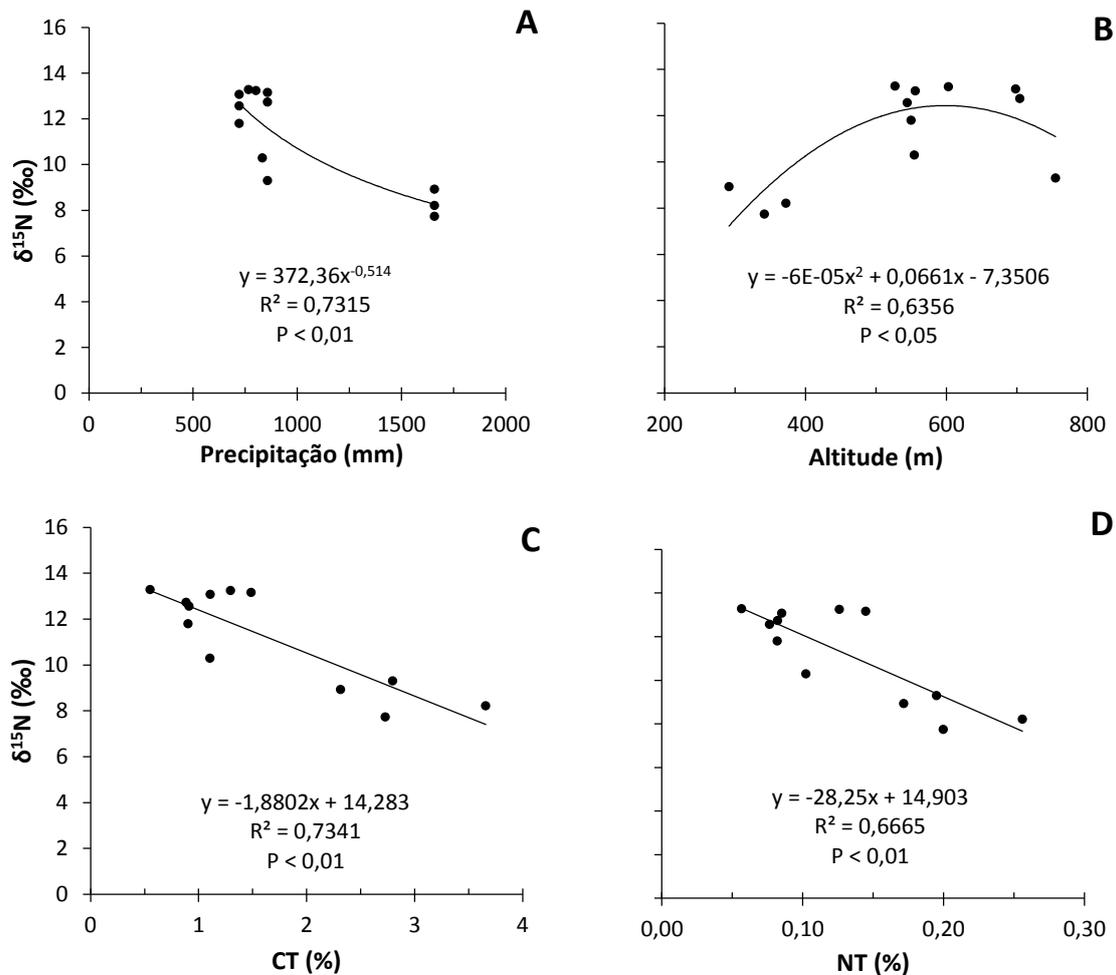
(A) Zona da Mata; (B) Agreste; (C) Sertão Leste e (D) Sertão Oeste. As barras de erros representam o erro padrão da média (n = 3).

Nas áreas sob floresta, os maiores valores foram encontrados nas regiões semiáridas do sertão (SL e SO), que apresentaram-se significativamente superiores aos Argissolos da regiões úmida (ZM) e subúmida (AG), embora essas diferenças só tenham sido evidenciadas nas camadas superficiais de 0-10 cm e 10-20 cm do solo (Figura 23).

A abundância natural de $\delta^{15}\text{N}$ da camada superficial do solo (0-20 cm) variou significativamente entre as mesorregiões, correlacionando-se negativamente de forma potencial com a precipitação pluvial (Figura 24 A) e linearmente com os teores de CT e NT do solo

(Figura 24 C, D) e de forma quadrática com a altitude, sendo os maiores valores encontrados com altitudes intermediárias (entre 500 e 700 m), figura 24 B.

Figura 24 - Abundância natural de ^{15}N do solo (0-20 cm) em função da precipitação pluvial, altitude, carbono total e nitrogênio total do solo sob diversos usos e coberturas em Argissolos de Pernambuco.



Os resultados encontrados nesse estudo, demonstram haver um enriquecimento isotópico de $\delta^{15}\text{N}$ das mesorregiões semiáridas onde as temperaturas são mais altas e as chuvas mais escassas em relação as áreas úmidas e subúmidas do estado. A explicação é que, em locais úmidos, a reciclagem interna de N em forma orgânica é grande e as perdas de N mineral são pequenas, causando dessa maneira um enriquecimento em ^{15}N . Em locais mais secos, proporcionalmente mais N pode permanecer em formas inorgânicas e ser perdido por volatilização ou lixiviação. Em escalas menores, no nível de paisagem, locais com maior disponibilidade de água, como depressões topográficas, em geral possuem vegetação com

folhas mais enriquecidas que locais mais secos, o que é relacionado a maiores taxas de mineralização e desnitrificação (GARTEN, 1993; HANDLEY e SCRIMGEOUR, 1997).

Outros trabalhos publicados na literatura, também encontraram fortes correlações entre a composição isotópica do N do solo disponível para as plantas e a disponibilidade de água (Precipitação). Esse padrão de enriquecimento ou empobrecimento é diferente para comparações em diferentes escalas. Em escalas globais (HANDLEY e SCRIMGEOUR, 1997; HANDLEY, 1999), grandes transectos geográficos (ARANIBAR *et al.*, 2004; SWAP *et al.*, 2004) e em escalas regionais (OLIVEIRA, 2014; FREITAS *et al.*, 2015), a tendência é sempre de diminuição do sinal de ^{15}N das folhas à medida que a precipitação pluvial média anual aumenta. Dessa forma, estando também associada a quantidade MOS, uma vez que regiões de maior regime pluvial resultam em maiores aportes de C no solo.

Os resultados também corroboram o trabalho de Mendonça *et al.* (2010) que ao avaliar o teor de $\delta^{15}\text{N}$ de áreas de Cerradão e de Caatinga em solos da Chapada do Araripe, CE, observaram que os menores valores de $\delta^{15}\text{N}$ estavam associados à maior quantidade de CT e foram encontrados no solo de Cerradão. Na Caatinga, onde a superfície do solo apresentou menor conteúdo de CT, encontraram-se os maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$, o que é um indício de mineralização. Resultados também reportados por Loss *et al.* (2011 e 2014).

Nas áreas sob Pastagem, as diferenças foram verificadas nas camadas de 10-20, 20-30, 60-80 e 80-100 cm. Em todas essas profundidades observou-se superioridade dos Argissolos das regiões do AG e do SO sobre os Argissolos das regiões da ZM e do SL (Figura 24). Não correspondendo dessa forma, a tendência observada nas áreas de floresta, de enriquecimento isotópico ao longo do gradiente climático (precipitação) à medida que se afasta das áreas mais úmidas do estado em direção as regiões semiáridas.

Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo encontrados nas áreas de pastagem e de floresta da ZM foram os menores entre todos os usos e mesorregiões do estado. Os valores variaram de 6,72 a 7,90 ‰ e de 8,02 a 9,75 ‰ de 0-100 cm para as áreas de pastagem e floresta, respectivamente. Os menores valores para as áreas de PAS foram encontrados nas duas camadas mais profundas do perfil (6,95 ‰ de 60-80 cm e 6,72 ‰ de 80-100 cm), enquanto que nas áreas de floresta os menores valores foram verificados nas camadas superficiais (8,02 ‰ de 0-10 cm e 8,40 de 10-20 cm).

Os resultados encontrados nessas áreas, diferem dos resultados encontrados por Freitas *et al.*, 2015 em áreas de floresta da zona úmida da região Nordeste do Brasil. Os autores reportaram valores médios de $\delta^{15}\text{N}$ do solo variando entre 3 e 6 ‰ na camada de 0-20 cm e sugeriram portanto, que essas áreas com baixos valores de $\delta^{15}\text{N}$ podem ter ciclos fechados com

imobilização rápida ou absorção de N mineralizado ou, alternativamente, elevadas perdas compensadas pela alta fixação e baixa deposição. Por outro lado, os resultados desse estudo corroboram o trabalho de Mendonça *et al.*, 2010, que reportaram valores médios de $\delta^{15}\text{N}$ do solo (0-140 cm) entre 5 e 9 ‰ para áreas de floresta úmida, transição floresta úmida/cerradão, e 3 tipos de cerradão/gramíneas, e de 13 a 15‰ para áreas de caatinga no extremo sul do estado do Ceará, no nordeste do Brasil.

5 CONCLUSÕES

Estudo 1 - Levantamento dos estoques de carbono nos solos de Pernambuco.

1. As estimativas dos estoques de carbono nos solos de Pernambuco evidenciaram o elevado potencial das classes dos Chernossolos, Nitossolos, Vertissolos e Gleissolos em estocar C, principalmente nos biomas Mata Atlântica e Caatinga sem intervenção antrópica.

2. Ainda que, as classes dos Argissolos, Neossolos Litólicos, Planossolos e Latossolos não estoquem as maiores quantidades de C por área, são essas classes, que recobrem as maiores extensões territoriais do Estado e conseqüentemente, apresentam os maiores estoques totais de C no solo para a camada de 0-30 cm.

3. Estão estocados em Pernambuco, aproximadamente 368 Tg de C (0-30 cm) e a média geral dos estoques de C, ponderada pela proporção de área das classes de solo, é da ordem de 38 Mg ha⁻¹ na camada de 0-30 cm.

Estudo 2 - Distribuição em profundidade e estoques de carbono em solos sob diferentes coberturas e usos da terra em Pernambuco.

1. Os teores de CT correlacionam-se negativamente com a profundidade do solo de forma quadrática (exponencial ou potencial);

2. Os maiores estoques de CT ocorreram nas vegetações nativas densas e decresceram da região úmida à semiárida Oeste, com grandes variações entre as classes solos. As camadas superficiais até 30 cm de profundidade estocam cerca de 40 a 60% do CT total do solo até 1 m;

3. As maiores reduções nos estoques de CT do solo com a mudança de uso da terra (agricultura e pastagem) em relação as áreas de referência (vegetação densa) foram verificadas nas regiões subúmidas e semiárida Leste, com reduções que variam de 34 a 55% e de 16 a 27%, respectivamente.

Estudo 3 - Carbono, nitrogênio e abundância natural ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) do solo sob diferentes usos ao longo de um gradiente climático em Pernambuco.

1. Não foram encontradas diferenças nas concentrações de C e N nos Argissolos entre as áreas antropizadas (áreas agrícolas e áreas de pastagem) e as áreas de Floresta.

2. As maiores concentrações de CT e NT foram encontradas nas áreas de floresta das regiões úmidas e subúmidas com precipitações entre 900 e 1700 mm;

3. A substituição da vegetação de floresta por pastagens ou cultivos agrícolas levou a aumentos do sinal de $\delta^{13}\text{C}$ do solo, pela incorporação de C derivado de plantas C_4 , sendo maiores nas áreas úmidas e subúmidas do estado em relação às áreas semiáridas;

4. Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo são inversamente relacionados às concentrações de C e de N. O enriquecimento de $\delta^{15}\text{N}$ encontrados na superfície das mesorregiões semiáridas em relação às áreas úmidas e subúmidas estão associados as menores concentrações de C e N presentes nos Argissolos dessa região, em decorrência das maiores temperaturas e menores índices pluviométricos.

Conclusões gerais

O carbono e o nitrogênio nos solos de Pernambuco são regulados por fatores edafoclimáticos, como a precipitação pluvial, altitude/temperatura, textura e pela profundidade do solo. Em função do maior armazenamento em superfície, é comum o modelo exponencial ou potencial se ajustarem aos teores de C e N no perfil de solo. Os maiores estoques de C nos solos do Estado estão alocados em áreas de florestas preservadas das regiões fisiográficas com maiores precipitações pluviais e sobretudo nas camadas superficiais das classes de solo com maior conteúdo de argila. A intervenção humana nessas áreas através de práticas agropecuárias convencionais, reduz os estoques de carbono no solo a patamares inferiores ao encontrados nas áreas nativas, e modificam a dinâmica do C e do N no solo nessas regiões, contribuindo dessa maneira, para a emissão GEE para a atmosfera. Para se contrapor a esta situação no Estado, são necessárias medidas mitigatórias, como a adoção de sistemas conservacionistas do solo e da água, a exemplo da rotação de culturas (gramíneas + leguminosas), integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) Silviculturais, dentre outras, através de políticas públicas de incentivo às práticas conservacionistas em substituição à agricultura de baixo carbono.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, L. J. O.; SILVA, E. A.; CAVALCANTI JUNIOR, E. A.; SILVA, A.; ALVES, E. S.; PEREIRA, A. G. S.; SILVA, R. S.; RAMOS, R. R. D. **Mapeamento do uso e da cobertura das terras do semiárido pernambucano (escala 1:100.000)**. Boletim de Pesquisa da Embrapa Solos, 2017. *No prelo*.
- ADDSCOTT, T. M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, v.46, n.2, p.161-168, 1995.
- ADUAN, E. A.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres: o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 30 p.
- ALVES, B. J. R.; CAMPOS, D. V.; SISTI, C. P. J.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Emprego do isótopo estável ^{13}C para o estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. (Eds.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, p. 133-161, 2006.
- 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.
- AMORIM, L. B. Caracterização da serapilheira em caatinga preservada e mudanças no carbono do solo após desmatamento sem queima. **Dissertação de Mestrado** (Mestrado em Ciência do Solo) – Recife: Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2009, 66 p.
- AMUNDSON, R.; AUSTIN, A. T.; SCHUUR, E. A. G.; YOO, K.; MATZEK, V.; KENDALL, C.; UEBERSAX, A.; BRENNER, D.; BAISDEN, W. T. Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 1, p. 31.1-31.10, 2003.
- ANDERSON, J. M. Responses of soils to climate change. **Advances in Ecological Research**, v. 22, p. 63-91, 1992.
- ANDREUX, F. Humus in word soils. In PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, p. 45-100, 1996.
- ANTUNES, P. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; FERREIRA JÚNIOR, A. L. G.; GALINDO, I. C. L.; SALCEDO, I. H. Distribuição de ^{137}Cs em três solos representativos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 34, p. 935-943, 2010.
- ARANIBAR, J. N.; OTTER, L.; MACKO, S. A.; FERAL, C. J. W.; EPSTEIN, H.E.; DOWTY, P. R.; ECKARDT, F.; SHUGART, H. H.; SWAP, R. J. Nitrogen cycling in the soil-plant system along a precipitation gradient in the Kalahari sands. **Global Change Biology**, v. 10, p. 359-373, 2004.

ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. H. B. B.; MEDEIROS, L. A. R.; MELO FILHO, H. F. R.; PARAHYBA, R. B. V.; CAVALCANTI, A. C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, F. B. R.; LEITE, A. P.; SANTOS, J. C. P.; SOUSA NETO, N. C.; SILVA, A. B.; LUZ, L. R. Q. P.; LIMA, P. C.; REIS, R. M. G.; BARROS, A. H. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa solos, Boletim de Pesquisa, n. 11, 382 p., 2000.

ARAÚJO, A. M. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. Mineralização do C e do N em amostras de solo cultivado com Cana-de-açúcar, ao longo de dez anos com e sem fertilização nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 43-53, 2001.

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com Cana-de-açúcar na região Nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 21, p. 643-650, 1997.

ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVEIRA, M. M. L. Estoques de fósforo em solos do semiárido de Pernambuco e da Paraíba. In: MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. **Fertilidade do solo e produção de biomassa no semiárido**. Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 47-61, 2008.

ARAÚJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em Latossolos e Luvisolos do semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 259-268, 2004.

ARROUAYS, D.; PELISSIER, P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. **Soil Science**, v. 157, n. 157, p. 185-192, 1994.

ASSIS, C.P.; OLIVEIRA, T.S.; DANTAS, J.A.N. & MENDONÇA, E.S. Organic matter and phosphorus fractions in irrigated agroecosystems in a semi-arid region of Northeastern Brazil. **Agric. Ecosystem Environment**, v. 138, p. 74-82, 2010.

AUSTIN, A. T.; VITOUSEK, P. M. Nutrients dynamics on a precipitation gradient in Hawaii. **Oecologia**, v. 113, p. 519-529, 1998.

BALBINOT, R. Carbono, nitrogênio e razões isotópicas $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo e vegetação de estágios sucessionais de Floresta Ombrófila Densa Submontana. **Tese de Doutorado**, Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009.

BALESDENT, J.; CHENU, C., BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 215-230, 2000.

BALESDENT, J.; WAGNER, G. H.; MARIOTTI, A. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by ^{13}C natural abundance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 118-124, 1988.

BALESDENT, J.; MARIOTTI, A.; GUILLET, B. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, p. 25-30, 1987.

BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FERIRE, F. J.; INÁCIO, E. S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1471-1478, 2008.

BATJES, N. H. Options for increasing carbon sequestration in West African soils an exploratory study with special focus on Senegal. **Land Degradation Development**, v. 12, p.131-142, 2001.

BATJES, N. H. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 21, p. 22-24, 2005.

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

BAYER, C. e MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 105-112, 1997.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETTA, C. A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil and Tillage Research**, v. 53, p. 95-104, 2000.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v.86, p.237-245, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTINNETO, L.; FERNANDES, S. A. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 54, p. 101-109, 2000.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating bulk density of Brazilian soils. **Geoderma**, Amsterdam, NL, v. 139, p. 90-97, 2007.

BERNOUX, M. and VOLKOFF, B. Soil carbon stock in soil ecoregions of 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. 65-75, 2006.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 743-749, 1998.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbono stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 66, p. 888-896, 2002.

BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P.; SIQUEIRA NETO, M.; METAY, A.; PERRIN, A.; SCOPEL, E.; BLAVET, D.; PICCOLO, M. C. Influence du semis direct avec couverture végétale sur la séquestration du carbone et érosion au Brésil. In: ROOSE, E.; DE NONI, G.; PRAT C.; GANRY, F.; BOURGEON, G. (Eds.). **Gestion de la biomasse, érosion et séquestration du carbone**. Bulletin Du Réseau Erosion, v. 23, p. 323-337. 2004.

BLAIR N.; LEU A.; MUNOZ, E.; OLSEN, J.; KWONG, E.; D. DESMARAIS. Carbon isotopic fractionation in heterotrophic microbial metabolism. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 50, p. 996–1001, 1985.

BONFIM, E. M. S.; FREIRE, F. J.; SANTOS, M. V. F.; SILVA, T. J. A.; FREIRE, M. B. G. S. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 28, p. 281-288, 2004.

BORGES, A. L.; KIEHL, J. C. Alterações da matéria orgânica de um Latossolo amarelo Álico de Cruz das Almas (BA), pelo cultivo com frutíferas perenes e mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 313-318, 1996.

BOUTTON, T. W. Stable carbon isotope ratios of natural materials: I. Sample preparation and mass spectrometric analysis. In: COLEMAN, D. C.; FRY, B. **Carbon isotope techniques**. Academic Press, Inc. 1991.

BOUTTON, T. W. Stable carbon isotope ratios of soil organic matter and their use as indicators of vegetation and climate change. In BOUTTON, T. W.; YAMASAKI, S. I. (Ed.). **Mass spectrometry of soils**. Marcel Dekker, p. 47-82, 1996.

BOUTTON, T. W.; TYRRELL, H. F.; PATTERSON, B. W; VARGA, G. A.; KLEIN, P. D. Carbon kinetics of milk formation in holstein cows in late lactation. **Journal of Animal Science**, v. 66, p. 2336-2645, 1988.

BOX, G. E. P. and COX, D. R. An Analysis of Transformations. **Journal of Royal Statistical Society**. B, 39, 211-252, 1964.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 898p.
BUSTAMANTE, M. M. C.; MARTINELLI, L. A.; SILVA, D. A.; CAMARGO, P. B.; KLINK. C. A.; DOMINGUES T. F.; SANTOS R. V. ¹⁵N natural abundance in woody plants and soils of central brazilian savannas (cerrado). **Ecological Applications**, Nova York, v. 14, p. 200-213. 2004.

CADISCH, G.; IMHOF, H.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; GILLER, K. E. Carbon turnover (delta-c-13) and nitrogen mineralization potential of particulate light soil organic matter after rainforest clearing. **Soil Biology Biochemistry**, v.28, p. 1555–1567, 1996.

CAMPOS, D. V. B. Uso da técnica ¹³C e fracionamento físico da matéria orgânica em solos sob cobertura de pastagens e cana-de-açúcar na região da mata atlântica. **Tese de Doutorado**, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2003, 220 p.

CANADELL, J. G.; MOONEY, H. A.; BALDOCCHI, D. D.; BERRY, J. A.; EHLERINGER, J. R.; FIELD, C. B.; GOWER, S. T.; HOLLINGER, D. Y.; HUNT, J. E.; JACKSON, R.B.; RUNNIG, S. W.; SHAVER, G. R.; STEFFEN, W.; TRUMBORE, S. E.; VALENTINI, R.; BOND, Y. Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: a multitechnique approach for improved understandin. **Ecosystems**. v. 3, p. 115-130. 2000.

CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. In: REES, R. M., BALL, B. C., CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. (Ed.). **Sustainable management of soil organic matter**. CABI Publishing, p. 9-22, 2001.

CARVALHO J. L. N., CERRI C. E. P., FEIGL B. J., PICOLLO M. C., GODINHO V. P., CERRI C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v.103, n. 2, p. 342-349. 2009.

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.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B.; MORAES, J. L. Dinâmica do carbono nos solos da Amazônia. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. Os solos nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentável. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 61-69, 1996.

CERRI, C.C.; BALESSENT, J.; FELLER, C.; VICTORIA, R.; PLENECASSAGNE, A. Application du tracement isotopique naturel en ^{13}C , à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris**, t. 300, Série II, n° 9, p. 423-428, 1985.

CHAPIN F. S.; MOONEY, H. A.; CHAPIN, M C.; MATSON, P. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. Springer. 2002.

CLAY, D. E.; CLAPP, C. E.; RESSE, C.; LIU, Z.; CARLSON, C. G. WOODARD, H; BLY, A. Carbon-13 fractionation of relic soil organic carbon during mineralization and effects calculated half-lives. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 3, p. 1003-1009, 2007.

CONDEPE/FIDEM - AGÊNCIA ESTADUAL DE PLANEJAMENTO E PESQUISAS DE PERNAMBUCO. Aspectos geoambientais e socioeconômicos da bacia hidrográfica do Rio Una, grupos de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos GL 4 e GL 5. Recife, PE: **Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco**, v. 3, 85 p. 2006.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 23, p. 425-432, 1999.

COSTA JUNIOR, C.; PICCOLO, M. C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Carbono total e ^{13}C em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, 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: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 15, p. 47-66, 2011b.

COSTA, A. R.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. M.; MACHADO, P. L. O. A. BERNARDES, T. G.; SILVEIRA, P. M. Uso do nitrogênio na agricultura e suas implicações na emissão do gás de efeito estufa óxido nitroso (N_2O). Santo Antônio de Goiás, GO: **Embrapa Arroz e Feijão. Documentos**, v. 249, 47 p. 2009.

COSTA, J. B. **Caracterização e Constituição do Solo**. 7ª ed. Lisboa, Ed. Fundação Calouste, 2004.

COSTA, L. A. M. Radiação solar global: Algumas considerações sobre seus efeitos no solo em que se incorporou efluente de biodigestor. **Dissertação de Mestrado** (Mestrado em produção vegetal), São Paulo: Departamento de Agronomia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, 1995, 133p.

CPRM. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea no Estado de Pernambuco, **Diagnósticos dos Municípios, CPRM**, 2005.

CRAINE, J. M.; ELMORE, A. J.; AIDAR, M. P. M.; BUSTAMANTE, M.; DAWSON, T. E.; HOBBI, E. A.; KAHMEN, A.; MACK, M. C.; McLAUCHLAN, K. K.; MICHELSEN, A.; NARDOTO, G. B.; PARDO, L. H.; PEÑUELAS, J.; REICH, P. B.; SCHUUR, E. A. G.; STOCK, W. D.; TEMPLER, P. H.; VIRGINIA, R. A.; WELKER J. M.; WRIGHT, I. J. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability. **New Phytologist Journal**, v. 183, p. 980-992, 2009.

DADALTO, G. G.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W. Alterações em características químicas de solos cultivados com pastagens. **Revista Ceres**, v. 3, p. 395-403, 1986.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; DICK, D. P.; KLAMT, E.; KNICKER, H.; KÖGEL-KNABNER, I. Organic matter characteristics and distribution in Ferralsols profiles of a climosequence in Southern Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 57, p. 644-654, 2006.

DANTAS, M. Pastagens da Amazônia Central: Ecologia e fauna do solo. **Acta Amazônica**, v. 9, p. 5-51, 1979.

DAWSON, T. E.; MAMBELLI, S.; PLAMBOECK, A. H.; TEMPLER, P. H.; TU, K. P. Stable isotopes in plant ecology. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.33, p.507-559, 2002.

DE BONA, F. D. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional. **Dissertação de Mestrado**, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 130p.

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. IX - Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. F. e ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo: Parte II – Aplicações**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS, v. 2, 685 p., 2009.

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**, 263:185- 190, 1994.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. **Global Change Biology**, v.17, n.4, p.1658-1670, 2011.

DORAN, J. W. e PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F. e STEWART, B. A. eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, n.35, p. 3-22, 1994.

DOU, F.; WRIGTH, A. L.; HONS, F. M. Depth distribution of soil organic C and N after long-term soybean cropping in Texas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 530-536, 2007.

EBELING, A. G.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; PÉREZ, D. V. Substâncias húmicas e suas relações com o grau de subsidência em Organossolos de diferentes ambientes de formação no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, 2013.

EHLERINGER, J. R., RUNDEL, P. W., Stable isotopes: history, units, and instrumentation. In: RUNDEL, P. W., EGLERINGER, J. R., NAGY, K. A. (Eds.). **Stable isotopes in ecological research**. Ecological Studies, 68. Springer-Verlag, p.1-15, 1989.

ELLERT, B. H. e BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, p. 529-538, 1995.

ELLERT, B. H.; JANZEN H. H.; McCONKEY, B. G. (2001). Measuring and comparing soil carbon storage. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. (eds) **Assessment methods for soil carbon**. Lewis imprint of the CRC Press, Boca Raton, FL, p. 131–146.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 3ª ed. revisada e ampliada, 353 p., 2013.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Zoneamento Agrícola de Pernambuco**. CD-Rom, 1998.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. 1997. **Manual de Métodos de Análises de Solos**. Rio de Janeiro, 212 p., 1997.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF, 353 p, 2013.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. edição revisada – Rio de Janeiro, 1999.

ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E. e REICH, P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 57:192- 194, 1993.

FANNING, D.S.; FANNING, M.C.B. **Soil: morphology, genesis and classification**. John Wiley e Sons, 395 p., 1989.

FELLER, C.; BEARE, M. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, v. 79, p. 69-116, 1997.

FERNANDES, E. C. M.; MONTAVALLI, P. P.; CASTILLA, C.; MUKURUMBIRA, L. Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems. *Geoderma*, v. 79, p. 49-67, 1997.

FIDALGO, E. C. C.; BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; COELHO, M. R.; MOURA, I. B.; LIMA, C. X. **Estoque de carbono nos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007, 26 p. (Embrapa solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 121).

FRACETTO, F. J. C.; FRACETTO, G. G. M.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; SIQUEIRA NETO, M. S. Estoques de carbono e nitrogênio no solo cultivado com mamona na caatinga. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 1545-1552, 2012.

FRAZÃO, L. A.; SANTANA, I. K. S.; CAMPOS, D. V. B.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 45, p. 1198-1204, 2010.

FREITAS, A. D. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; FERNANDES, A. R.; SANTOS, C. E. R. S. Biological nitrogen fixation in legume trees of the Brazilian caatinga. *Journal of Arid Environment*, v. 74, p. 344-349, 2010.

FREITAS, A. D. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; RAMOS, A. P. S. R.; BARBOSA, M. R. V.; LYRA, R. P.; ARAÚJO, E. L. Nitrogen isotopic patterns in tropical forest along a rainfall gradient in Northeast Brazil. *Plant and Soil*, n. 391, p. 109-122, 2015.

FREITAS, P. L.; BLANCANEUX, P.; GAVINELLI, E.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; FELLER, C. Nível e natureza do estoque orgânico de latossolos sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v. 35, p. 157-170, 2000.

FREIXO, A. A.; MACHADO, P. L. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; SILVA, C. A. FADIGAS, F. S. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 425-434, 2002.

FUJISAKA, S.; CASTILLA, C.; ESCOBAR, G.; RODRIGUES, V.; VENEKLASS, E. J.; THOMAS, R.; FISHER, M. The effects of forest conversion on annual crops and pastures: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 69, p. 17-26, 1998.

GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; SANTOS, M. F. A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataíba-PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1283-1296, 2008.

GANNES, L. Z.; DEL RIO, C. M.; KOCK, P. Natural abundance variations in stable isotopes and their potential uses in animal physiological ecology. **Comparative Biochemistry and Physiology**, v. 119a, n. 3, p. 725-737, 1998.

GARTEN, C. T. e VAN MIEGROET, H. Relationships between soil nitrogen dynamics and natural ^{15}N abundance in plant foliage from Great Smoky Mountain National Park. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 24, n.8, p. 1636-1645, 1994.

GARTEN, C. T. Variation in foliar ^{15}N abundance and the availability of soil nitrogen on Walker Branch watershed. **Ecology**, v. 74, p. 2098-2113, 1993.

GERALDES, A. P. A.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Biomassa microbiana de solo sob pastagens na Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 55-60, 1995.

GIONGO, V.; GALVÃO, S. R. S.; MENDES, A. M. S.; GAVA, C. A. T.; CUNHA, T. J. F. Soil Organic Carbon in the Brazilian Semi-arid Tropics. **Dynamic Soil, Dynamic Plant**, v. 5, p. 12-20, 2011.

GLATZELA, S.; KALBITZ, K.; DALVAC, M.; MOOREC, T. Dissolved organic matter properties and their relationship to carbon dioxide efflux from restored peat bogs. **Geoderma**, Amsterdam, v.113, p.397-411, 2003.

GRACE, J. Carbon cycle. **Encyclopedia of Biodiversity**, v. 1, p. 609-629, 2001.

GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R; ANGERS, D. A; MONREAL C. M.; ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 74 p. 367-385, 1994.

GRIFFITHS, H.; BORLAND, A.; GILLON, J.; HARWOOD, K.; MAXWELL, K.; WILSON, J. Stable isotopes reveal exchanges between soil, plants and the atmosphere. In: PRESS, M. C.; SHOLES, J. D.; BARKER, M. G. (Ed.). **Physiological plant ecology**. Blackwell Science, p. 415-441, 1999.

HALL, S. J.; MATSON, P. A.; ROTH, P. M. NO_x emissions from soil: implications for air quality modeling in agricultural regions. **Annual Review Energy and the Environment**. v. 21, p. 311-46, 1996.

HANDLEY, L. L. e RAVEN, J. A. The uses of natural abundance of nitrogen isotopes in plant physiology and ecology. **Plant Cell and Environment**, v. 15, p. 965-985, 1992.

HANDLEY, L. L.; AUSTIN, A. T.; ROBINSON, D.; SCRIMGEOUR, C. M.; RAVEN, J. A.; HEATON, T. H. E.; SCHMIDT, S.; STEWART, G. R. The ^{15}N natural abundance ($\delta^{15}\text{N}$) of ecosystem samples reflects measures of water availability. **Australian Journal Plant Physiology**, v. 26, p. 185-199, 1999.

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

HÖGBERG, P. Transley review No 95 – N-15 natural abundance in soil-plant system. **New Phytologist**, v. 137, n.2, p. 179-203, 1997.

HOLTZ, G. P., Dinâmica da decomposição da palhada e da distribuição do carbono, nitrogênio e fósforo numa rotação de culturas sob plantio direto na região de Carambeí-PR. **Dissertação de Mestrado** - Universidade Federal do Paraná, 129 p.,1995.

HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L.; LEFKOWITZ, D. S. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985: II net release of CO_2 to the atmosphere. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 38, n. 3/4, p. 173- 199, Feb. 1991.

HOWARD, P. J. A.; LOVELAND, P. J.; BRADLEY, R. I.; DRY, F. T. HOWARD, D. M.; HOWARD, D. C. The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain. **Soil Use and Management**, v. 11, p. 9-15, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?lang=&coduf=26&search=pernambuco>>. Acesso em setembro, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Demográfico de Pernambuco, 2000**. Rio de Janeiro, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro, IBGE: Manuais técnicos em geociências, n. 4, 3ª ed., 430 p. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2014. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartogramas/estadual.html>> (acesso em novembro, 2014).

IPCC - **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Climate change 2007. Climate change impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.

JACOMINE, P. K. T.; CAVALCANTI, A. C.; BURGOS, N.; PESSOA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco**. Recife, SUDENE, 1973. v.1. (Boletim Técnico, 26. Série Pedologia, 14).

JANTALIA, C. P.; RESCK, D. V. S.; ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Tillage effect on C stocks of a clayey oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado. **Soil and Tillage Research**, v. 95, n. 1-2, p. 97-109. 2007.

JANZEN, H. H. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it? **Soil Biology and Chemistry**, Elmsford, v. 38, n. 3, p. 419-424, 2006.

JENNY, H. **Factors of soil formation. A system of quantitative pedology**. Dover, 281p., 1994. (Reimpresso do original de 1941).

JOBÁGY, E. G. and JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 423-436, 2000.

KALBITZ, K.; SCHMERWITZ, J.; SCHWESIG, D.; MATZNER, E. Biodegradation of soil derived dissolved organic matter as related to its properties. **Geoderma**, Amsterdam, v.113, p. 273-291, 2003.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**, v.29, p.27-39, 1983.

KAUFFMAN, J. B.; HUGHES, R. F.; HEIDER, C. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agricultural abandonment in the neotropics. **Ecological Applications**, v. 19, n. 5, p. 1211-1222, 2009.

KAUFFMAN, J. B.; SANFORD JR., R. L.; CUMMINGS, D. L.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biomass and nutrient dynamics associated with slash fires in neotropical dry forests. **Ecology**, v. 74, n.1, p. 140-151, 1993.

KREILEMAN, G. J. J.; BOUWMAN, A. F. Computing land use emissions of greenhouse gases. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 76, p.231-250, 1994.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, n. 1/3, p. 242-258, 2005.

LAL, R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. **Climatic Change**, v. 51, p. 35-72, 2001.

LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. **Environmental Pollution**, v.116, p. 353-362, 2002.

LAURENCE, W.F. et al. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. **Forest Ecology and Management**, v.118, n. 1-3, p.127-138, 1999.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L.; MACHADO, P. L. O. A.; GALVÃO, J. C. C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 821-832, 2003.

LIMA, D. A.; Estudos Fitogeográficos de Pernambuco. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 4, p. 243-274, 2007.

LIMA, M. A. Emissão de gases de efeito estufa provenientes de sistemas agrícolas no Brasil. **Biociência, Ciência e Desenvolvimento**, v. 3, p. 38-43, 2000.

LIU, N.; GALLINO, R.; BISTERZO, S.; DAVIS A. M.; SAVINA, M. R.; PELLIN, M. J. The ¹³C-pocket structure in AGB models: Constraints from zirconium isotope abundances in single mainstream SiC grains. **The Astrophysical Journal**, v. 788, n. 2, p. 1-7, 2014.

LIU, X.; FENG-MIN, L.; DA-QIAN, L.; GUO-JUN, S. Soil Organic Carbon, Carbon Fractions and Nutrients as Affected by Land Use in Semi-Arid Region of Loess Plateau of China. **Pedosphere**, v. 20, n. 2, p. 146-152, 2010.

LOPES, C. A. e BENEDITO-CECILIO, E. Variabilidade isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) em produtores primários de ambientes terrestres e de água doce. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 2, p. 303-312, 2002.

LORENZ, K.; LAL, R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. **Advanced in Agronomy**, San Diego, v. 88, n. 8, p. 35-66, 2005.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; DOS ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1269-1276, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; DOS 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**, v. 30, p. 604-615, 2014.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da Química do Solo Teoria e Prática**. 2ª ed. Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 2002.

MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, n. 1-2, p. 119-130, 2001.

MAIA, S. M. F.; OGLE, S. M.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 106, p. 177-184, 2010.

MAIA, S. M. F.; OGLE, S. M.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, v. 149, p. 84-91, 2009.

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAUJO FILHO, J. A. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry System**, v. 71, p. 127-138, 2007.

MAIA, S.M.F.; XAVIER, F.A.S.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. & ARAUJO FILHO, J.A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. **Revista Árvore**, v. 30, p. 837-848, 2006.

MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BRUNET, D.; BALBINO, L. C.; VILELA, L.; ROSSARD, M. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop-livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p. 442-450, 2009.

MARCHIORI JÚNIOR, M. e MELO, W. J. Carbono da biomassa microbiana, e atividade enzimática em um solo sob mata natural, pastagem e cultura do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 257-263, 1999.

MARTIN NETO, L.; ROSELL, R.; SPOSITO, G. Correlation of spectroscopy indicators of humification with mean annual rainfall along a temperate grassland climosequence. **Geoderma**, v. 81, p. 305-311, 1998.

MARTINELLI, L. A.; PICCOLO, M. C.; TOWNSEND, A. R.; VITOUSEK, P. M.; CUEVAS, E.; McDOWELL, W. H.; ROBERTSON, G. P.; SANTOS, O. C.; TRESEDER, K. Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: Tropical versus temperate forests. **Biogeochemistry**, v. 46, p. 45-65, 1999.

MARTINS, C. M.; GALINDO, I. C. L.; SOUZA, E. R.; POROCA, H. A. Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1883-1890, 2010.

MARTINS-NETO F. L.; MATSUMOTO S. N. Qualidade do solo e nutrição de plantas em sistemas de produção de café (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, v. 5, p. 206-213, 2010.

MATSON, P.A.; DOWELL, M. C.; TOWNSEND, A.R.; VITOUSEK, P. M. The globalization of N deposition: ecosystem consequences in tropical environments. **Biogeochemistry**, v. 46, p. 67-83, 1999.

MELLO, F. A. F.; SOBRINHO, M. O. C. B.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; NETTO, A. C.; KIELH, J. C. **Fertilidade do Solo**. NOBEL, São Paulo, 1983.

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

MENEZES, R. C. S.; GARRIDO, M. S.; PEREZ M., A. M. **Fertilidade dos solos no semi-árido**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30. Recife, 2005. Palestras... Recife, UFRPE/SBCS, 2005. CD-ROM.

MENEZES, R. S. C. e SAMPAIO, E. V. S. B. Simulação dos fluxos e balanços de fósforo em uma unidade de produção agrícola familiar no semi-árido paraibano. In: SILVEIRA, L.M.; PETERSEN, P. e SABOURIN, E., orgs. **Agricultura familiar e agroecologia no semi-árido: Avanços a partir do Agreste da Paraíba**. Rio de Janeiro, AS-PTA, 2002. p.249-260.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA, 626p., 2003.

NARDOTO, G. B. Abundância natural de ^{15}N na Amazônia e Cerrado – implicações para a ciclagem de nitrogênio. (**Tese de Doutorado**) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP, 100 p., 2005.

NARDOTO, G. B.; OMETTO, J. P. H. B.; EHLERINGER, J. R.; HIGUCHI, N.; BUSTAMANTE, M. M. C.; MARTINELLI, L. M. Understanding the influences of spatial patterns on N availability within the Brazilian Amazon Forest. **Ecosystems**, v. 11, p. 1234–1246, 2008.

NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C.; OLIVEIRA, A. B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 28, p. 385-392, 2004.

NEILL, C.; FRY, B.; MELILLO, J.; STEUDLER, P.; MORAES, F. L. & CERRI, C. C. Forest- and pasture-derived carbon contributions to carbon stocks and microbial respiration of tropical pasture soils. **Oecologia**, v. 107, p. 113-119, 1996.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2016. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>> Acesso em Setembro, 2016.

NOORDWIJK, M. V.; CERRI, C. C.; WOOMER, P. L.; NUGROHO, K. e BERNOUX, M. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. **Geoderma**, v. 79, p. 187-225, 1997.
O'LEARY, M. H. Carbon isotopes in photosynthesis. **Bioscience**, v. 38, p. 328-336, 1988.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Editora Guanabara Koogan S. A. 434 p. 1983.

OLIVEIRA, L. B.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Morfologia e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas do semiárido do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 33, p. 1333-1345, 2009.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; FERRAZ, F. B.; JACOMINE, P. K. T. Classificação de solos planossólicos do Sertão do Araripe (PE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 685-693, 2003.

OLIVEIRA, T. E. G. Estudo da bolota *Quercus rotundifolia* Lam. como indicador precoce dos stress hídrico ao longo de um gradiente climático no Alentejo (SE, Portugal). **Dissertação de Mestrado** (Mestrado em Biologia da Conservação) - Lisboa: Departamento de Biologia Animal, Universidade de Lisboa, 2014, 62 p.

PACHECO, M. R. P. S. e HELENE, M. E. M. **Transcrições e notas: Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂**. Estudos Avançados, v.4, n.9, p. 204–220, 1990.

PAIVA, A. O.; FARIA, G. E. Estoque de carbono do solo sob Cerrado *Sensu Stricto* no Distrito Federal, Brasil. **Revista Tropica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 1, p. 59-65, 2007.

PAIVA, A. O.; REZENDE, A. V.; PEREIRA, R. S. Estoque de carbono em cerrado *sensu stricto* do Distrito Federal. **Revista Árvore**, v. 35, p. 527-538, 2011.

PARK, R e EPSTEIN, S. Metabolic fractionation of ¹³C and ¹²C in plants. **Plant Physiology**, v. 36, p. 133-138, 1961.

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

PEDRA, W. N.; PEDROTTI, A.; SILVA, T. O.; MACEDO, F. L.; GONZAGA, M. I. S. Estoques de carbono e nitrogênio sob diferentes condições de manejo de um Argissolo Vermelho Amarelo, cultivado com milho doce nos tabuleiros costeiros de Sergipe. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, p. 2075-2090, 2012.

PEIXOTO, M. F. S.; **Atributos físicos, químicos e biológicos como indicadores da qualidade do solo**. Bahia: UFRB, 2008. 22 p. (Documento 01).

PINHEIRO, E. F. M.; LIMA, E.; CEDDIA, M. B.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Impact of pre-harvest burning *versus* trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. **Plant and Soil**, v. 333, p. 71-80, 2010.

POST, W. M.; EMANUEL, W. R.; ZINKE, P. J.; STANGENBERGER, A. Soil carbon pools and world life zones. **Nature**, v. 298, p.156- 158, 1982.

PROBIO - Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira. Subprojeto – **Levantamento da Cobertura Vegetal e do Uso do solo do Bioma Caatinga**. 2007.
http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/caatinga/documentos/relatorio_final.pdf

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1609-1623, dez. 2007.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. C.; ZINN, Y. L. Dinâmica da Matéria Orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. Ed. rev. e atual. – Porto Alegre: Metropole, 2008. 654 p.

RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; LIMA, J. F. W. F. **Caracterização e classificação de solos de referência do Estado de Pernambuco**. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1999. 140p.

RICHTER, D. D.; MARLEWITZ, D.; TRUMBORE, S. E.; WELLS, C. G. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in an aggrading forest. **Nature**, v. 400, p. 56-58, 1999.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. de A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p.

ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; MENDES, I. C.; REIS-JÚNIOR, F. B.; SANTOS, J. C. F.; HUNGRIA, M. Biomassa microbiana do solo: fração mais ativa da matéria orgânica. In: **Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo em Sistemas Conservacionistas - Modelagem Matemática e Métodos Auxiliares**, Embrapa, Dourados-MS, p. 163-198, 2006.

RUSSOW, R.; SICH, I.; NEUE, H. U. The formation of the trace gases NO and N₂O in soils by the coupled processes of nitrification and denitrification: results of kinetic ¹⁵N tracer investigations. **Chemosphere – Global Change Science**, n. 2, p. 359-366, 2000.

SÁ, J. C. M.; LAL, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 46-56, 2009.

SALIMON, C. I. Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia Sul-Occidental, Acre. **Tese de Doutorado**, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2003.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, 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**, v. 46, p. 1349-1356, 2011.

SAMPAIO, E. V. S. B. Caracterização do bioma caatinga: características e potencialidades, in: GARIGLIO, M. A., KAGEYAMA, P. Y. (Eds.), **Uso Sustentável e Conservação dos Recursos Florestais da Caatinga**. GARIGLIO, M. A. SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. (Orgs.), Brasília: Serviço florestal brasileiro, p. 29-48. 2010.

SAMPAIO, E. V. S. B.; COSTA, T. L. Estoques e Fluxos de Carbono no Semiárido Nordeste: Estimativas Preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1275-1291, 2011.

SANTOS, J. C. B.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 683-695, 2012.

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

SCHIMEL, J. P. e BENNETT, J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. **Ecology**, v. 85, n. 3, p. 591-602, 2004.

SCHLESINGER, W. H. **Biogeochemistry: an analysis of global change**. 2nd. ed. Academic Press, 588 p., 1997.

SCHÖNING, I.; TOTSCHKE, K. U.; KÖGEL-KNABNER, I. Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol. **Geoderma**, v. 136, n. 3/4, p. 631-642, 2006.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A Cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, v.30, p.507-512, 1974.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance teste for normality (complete samples). **Biometryka**, v. 52, p. 591-611, 1965.

SILVA, C. A.; ANDERSON, S. J.; VALE, F. R. Carbono, nitrogênio e enxofre em frações granulométricas de dois Latossolos submetidos a calagem e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 593-602, 1999.

SILVA, F. A. S.; **ASSISTAT Versão 7.7 beta** (2016) - Homepage <http://www.assistat.com>; DEAG - CTRN-UFMG – Atualizado em 01/03/2016.

SILVA, J. E. RESCK, D.V.S.; CORAZZA, E. J.; VIVALDI L. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the “Cerrado” region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 103, p. 357-363, 2004.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrado do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 541-547, 1994.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; CORAZZA, E. J.; VIVALDI, L. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the “Cerrado” region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 103, p. 357-363, 2004.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com Cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 840-848, 2009.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, A. T.; FREIRE, F. F.; FREIRE, M. B. G.; NASCIMENTO, C. W. A. Características agroindustriais da Cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 347-354, 2012.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 4, p. 709-717, 2009.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58. 2004.

SMITH, B.N.; EPSTEIN, S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. **Plant Physiology**, v. 47, p. 380-384, 1971.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v. 74, p. 65-105, 1996.

SOUSA, F. P.; FERREIRA, T. O.; MENDONÇA, E.S.; ROMERO, R.E. & OLIVEIRA, J.G.B. Carbon and nitrogen in degraded Brazilian semi-arid soils undergoing desertification. **Agric. Ecosystem Environment**, v. 148, p. 11-21, 2012.

SOUZA, R. V. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JUNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; ALMEIDA, M. C.; CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SCHULZE, M. B. B. Caracterização de solos em uma topoclimossequência no maço de Triunfo – Sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1259-1270, 2010.

SPRENT, J. I. **The ecology of the nitrogen cycle**. Cambridge studies in ecology, Cambridge University Press, 1987.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 496 p.

SWAP, R.J.; ARANIBAR, J.N.; DOWTY, P.R.; GILHOOLY III, W.P.; MACKO, S.A. Natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in C_3 and C_4 vegetation of southern Africa: patterns and implications. **Global Change Biology**, v. 10, p. 350-358, 2004.

TARRÉ, R.; MACEDO, R.; CANTARUTTI, R. B.; REZENDE, C. P.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R. M. The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Plant and Soil**, v. 234, p. 15-26, 2001.

TATE, K. R. Assessment, based on a climosequence of soils in tussock grasslands, of soil carbon storage and release in response to global warming. **Journal of Soil Science**, v. 43, p. 697-707, 1992.

TEIXEIRA, L. B.; BASTOS, J. B. **Matéria orgânica nos ecossistemas de floresta primária e pastagem na Amazônia central**. Belém: EMBRAPACPATU, 1989. 26 p. (Boletim de pesquisa, 99).

TELLES, E. D. C.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; TRUMBORE, S. E.; COSTA, E. S.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 2, p. 1-12, 2003.

TIESSEN, H.; FELLER, C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GARIN, P. Carbon sequestration and turnover in semiarid savannas and dry forest. **Climatic Change**, v. 40, p. 105-117, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, p. 190-202, 1998.

TRAORÉ, S.; OUATTARA, K.; ILSTEDT, U.; SCHMIDT, M.; THIOMBIANO, A.; MALMER, A.; NYBERG, G. Effect of land degradation on carbon and nitrogen pools in two soil types of a semi-arid landscape in West Africa. **Geoderma**, v. 241-242, 2015.

TREVISAN, R.; MATTOS, M. L. T.; HERTER, F. G. Atividade microbiana em Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico coberto com aveia preta (*Avena* sp.) no outono, em um pomar de pessegueiro. **Ciência Rural**, v. 7, n.2, p. 83-89, 2002.

UNKOVICH, M.; PATE, J.; MCNEILL, A.; GIBBS, D. J. **Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems**. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 291 p., 2001.

VITOUSEK, P. M. Global environmental change: an introduction. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 23, p. 1-14, 1992.

VITOUSEK, P. M.; MOONEY, H. A.; LUBCHENCO, J.; MELILLO, J. Human domination of Earth's Ecosystems. **Science**, n. 277, p. 494-499, 1997.

VOGEL, J. C. Variability of carbon isotope fractionation during photosynthesis. In: Ehleringer, J. R.; Hall, A. E.; Farquhar, G. D. (ed.). **Stable isotopes and plant carbon – Water relations**. Academic Press, p. 29-38, 1993.

WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N. H.; VERARDO, D. J.; DOKKEN, D. J.; **Land use, land-use change and forestry: A special report of the IPCC**, Cambridge University Press, 2000.

WATSON, R. T.; RODHE, H.; OESCHGER, H.; SIEGENTHALER, U. I. Greenhouse gases and aerosols. In: HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J.; EPHRAUMS, J. J. (Eds.), **Climate Change**. Cambridge University Press, p. 1-40, 1990.

YEO, I. K., JOHNSON, R. A. A New Family of Power Transformation to Improve Normality or Symmetry. **Biometrika**, v. 87, 954-959, 2000.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v. 79, n. 1/4, p. 117-161, 1997.

ZHOU, G.; LIU, S.; LI, Z.; ZHANG, D.; TANG, X.; ZHOU, C.; YAN, J.; MO, J. Old-growth forest can accumulate carbon in soils. **Science**, v. 314, p. 1417-1418, 2006.

ZINN, Y. L.; RESK, D.; SILVA, J. E. Soil organic as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology e Management**, v. 166, n. 1/3, p. 285-294, 2002.