



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
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

RAFAEL RODRIGUES DA SILVA

**USO DE GEOTECNOLOGIAS PARA ESTIMATIVAS DAS EMISSÕES E
REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BIOMA CAATINGA**

Recife

2019

RAFAEL RODRIGUES DA SILVA

**USO DE GEOTECNOLOGIAS PARA ESTIMATIVAS DAS EMISSÕES E
REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BIOMA CAATINGA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Energéticas e Nucleares para
obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Aplicação de
radioisótopos na agricultura e meio ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes

Coorientadora: Prof. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias

Recife

2019

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

S586c Silva, Rafael Rodrigues da.
Uso de geotecnologias para estimativas das emissões e remoções de gases de efeito estufa no Bioma Caatinga. / Rafael Rodrigues da Silva. - Recife, 2019.
74 f. : il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes.
Coorientadora: Profa. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2019.
Inclui referências.

1. Ciência dos solos. 2. Uso da terra. 3. Estoques de C no solo. 4. Mapeamento. 5. Pernambuco. I. Menezes, Rômulo Simões Cezar, orientador. II. Candeias, Ana Lúcia Bezerra, coorientadora. III. Título.

RAFAEL RODRIGUES DA SILVA

**USO DE GEOTECNOLOGIAS PARA ESTIMATIVAS DAS EMISSÕES E
REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BIOMA CAATINGA**

Dissertação ou Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Aprovada em: _20_/_02_/_2019_.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Dário Costa Primo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Eliza Rosário Gomes Marinho de Albuquerque (Examinadora Externa)
Associação Plantas do Nordeste - APNE

Prof^o. Dr. Alexandre Hugo Cezar Barros (Examinador Externo)
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA UPE Recife

Prof^o. Dr. Josimar Gurgel Fernandes (Examinador Externo)
Instituto Agrônômico de Pernambuco - IPA

Aos meus familiares, professores e amigos pelo apoio e incentivo em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Foram muitas as pessoas que estiveram ao meu lado durante esse período. Gostaria de deixar aqui meus sinceros agradecimentos.

À Deus pelo dom da vida.

A minha esposa Geysel por todo amor e incentivo ao longo dessa caminhada.

A minha filha Larissa por me mostrar que tenho mais a aprender com ela que ensinar.

Os meus amados pais Linaldo e Rosineide, pelo carinho e cuidado dispensados.

A minha querida irmã Rafaela e meu sobrinho/afilhado Heitor.

Ao meu orientador Dr. Rômulo Menezes, pela oportunidade de ter desenvolvido esse trabalho sob sua orientação, pela confiança e por todo conhecimento transmitido ao longo desses anos.

A minha coorientadora Dr^a Ana Lúcia Bezerra Candeias, pelo incentivo, conselhos e pela disposição em me ajudar.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco - FACEPE - que me concedeu a bolsa de doutorado, fato este que contribuiu para a viabilização desta tese.

Ao ITEP, pela bolsa de cooperação técnica concedida para a realização deste trabalho. Agradeço em especial ao setor de geoprocessamento, Wanderson Santos e Ana Mônica por todo apoio.

Ao comitê de avaliação pelos ensinamentos prestados, críticas e pelas sugestões que foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Ao MSc Luiz Malheiros, pela ajuda no desenvolvimento do software CABALA-C, disponibilidade e principalmente pela amizade.

As alunas de iniciação científica Margaret Thatcher e Sabrina Gomes pela ajuda nas atividades de geoprocessamento.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares por todo conhecimento transmitido.

Ao Professor Dr. Jose Dubeux pela disponibilidade em me receber para o doutorado sanduíche.

Ao Professor Dr. Estoécio Maia por me ajudar com os dados do IPCC.

Ao Dr. Dário Primo por toda ajuda e incentivo ao longo destes anos.

Aos meus amigos de turma de doutorado por todos os momentos de descontração e aprendizado que tivemos.

A Dr^a Eliza Albuquerque, Dr. Kennedy Jesus e a MSc. Mônica Santana pela disponibilização dos dados de carbono que foram utilizados nesta pesquisa.

Aos professores, Samuel Alves e Felipe Duarte pelas aulas de estatística.

Ao Frans Pareyn e ao Dr. Rodrigo Vasconcelos pela ajuda na utilização dos dados do MapBiomias.

Por fim agradeço a todos que direta ou indiretamente ajudaram na concretização desta tese.

Muito obrigado!

RESUMO

O solo e a vegetação são importantes reservatórios de carbono e seu manejo adequado pode contribuir para a remoção de carbono da atmosfera e sua estocagem em longo prazo. O Brasil, devido a suas dimensões e aptidão para a produção agropecuária e florestal, tem grande potencial para contribuir na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Para o desenvolvimento de um sistema global de monitoramento de emissões e remoções, os países devem reportar e atualizar seus inventários por setor, com o intuito de discutirem-se ações de compensação. No Bioma Caatinga ainda são limitados os dados sobre os estoques e fluxos de GEE decorrentes de mudanças de uso da terra, o que dificulta a elaboração de inventários. Assim, o objetivo geral do presente trabalho foi desenvolver, a partir do uso de ferramentas geotecnológicas, uma metodologia para o mapeamento dos estoques de carbono no solo e na vegetação e dos balanços de carbono no bioma Caatinga. A região de estudo compreendeu a área de Pernambuco inserida no Bioma Caatinga. Foram sistematizados os dados disponíveis sobre estoques de carbono no solo e na vegetação em diferentes áreas e tipos de solo e de cobertura e uso no bioma. Com base nessas informações, foi elaborado um software, denominado Calculadora dos balanços de carbono - CABALA-C, capaz de otimizar os cálculos das emissões líquidas de carbono no solo, mapear e estimar os estoques e fluxos de carbono em áreas sob diferentes usos da terra, utilizando medidas *in situ* e técnicas de geoprocessamento. Além disso, foram elaborados mapas de estoques de carbono no solo e na vegetação para os anos de 2000 e 2016, na escala 1:100000, estratificados por tipo de cobertura e uso da terra e pelo tipo de solo. Neste período, houve emissões líquidas de carbono do solo em 28% da área, ou seja, perdas de carbono do solo para a atmosfera, enquanto em 13% da área houve acúmulo líquido de carbono no solo e em 57% não houve alteração líquida. As maiores perdas foram observadas nas bacias hidrográficas do Ipanema e do Una e os maiores aumentos na bacia do rio Terra Nova. As áreas correspondentes a corpos d'água, áreas urbanas e outros usos não classificados não foram contabilizados, mas representaram apenas 2% da área. Todo este trabalho tem como ênfase a identificação de vulnerabilidades ambientais, com o intuito de subsidiar políticas públicas para a adoção de estratégias de adaptação às mudanças climáticas projetadas para o bioma caatinga.

Palavras-chave: Uso da terra. Estoques de C no solo. Mapeamento. Pernambuco.

ABSTRACT

Soil and vegetation are important carbon reservoirs and their proper management can contribute to the removal of carbon from the atmosphere and its carbon accumulation for long periods. Brazil has a great potential to contribute to the mitigation of greenhouse gas emissions (GHG), due to its size and suitability for agricultural, livestock and forest production. To develop a global emissions and removal monitoring system, countries should report and update their inventories by sector, in order to discuss compensation actions. In the Caatinga Biome, however, data on GHG stocks and fluxes resulting from changes in land use are still limited, making it difficult to draw up inventories. Thus, the general objective of the present work was to develop, using geotechnology tools, a methodology to map soil and vegetation carbon stocks and carbon balance in the Caatinga biome. The study area comprised the area of Pernambuco state inserted in the Caatinga Biome. The available data on soil and vegetation carbon stocks in different areas and soil and land use types in the biome were collected and organized. Based on this information, a software called Carbon Balance Calculator - CABALA-C - was developed, capable of optimizing calculations of soil net carbon emissions, mapping and estimating carbon stocks and flows in areas under different land uses, using in situ measurements and geoprocessing techniques. In addition, maps of carbon stocks in the soil and vegetation for the years 2000 and 2016 were elaborated on the scale 1: 100000, stratified by land use and soil types. In this period, liquid carbon emissions occurred in 28% of the area, that is, carbon losses from the soil to the atmosphere, while in 13% of the area there was liquid carbon accumulation and in 57% there were no liquid changes. The largest losses occurred in the Ipanema and Una hydrographic basins and the largest gains in the basin of the Terra Nova river. The areas corresponding to water bodies, urban areas and other unclassified uses were not accounted for but amounted to only 2% of the area. All this work aimed at the identification of environmental vulnerabilities, with the purpose of subsidizing public policies to adopt strategies adapted to the climatic changes projected for the Caatinga biome.

Keywords: Land use. Soil carbon stocks. Mapping. Pernambuco.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa do Bioma Caatinga	17
Figura 2 - Ciclo Global do Carbono.	21
Figura 3 - Representação esquemática dos ciclos biogeoquímicos do carbono no Bioma Caatinga no Estado de Pernambuco.	22
Figura 4 - Área de estudo	32
Figura 5 - Divisão da área de estudo para o processamento.....	34
Figura 6– Metodologia para a transferência de dados entre as imagens e os arquivos de análise.	35
Figura 7– Buffer de forma circular não contínuo.	37
Figura 8– Buffer quadrado.	37
Figura 9- Fluxograma da metodologia do Estudo 2	39
Figura 10- Levantamento de campo em cada ponto amostral.	40
Figura 11 – Distribuição dos Pontos de coleta	41
Figura 12- Fluxograma da metodologia	45
Figura 13 - "Calculadora dos balanços de carbono - CABALA-C".....	48
Figura 14 - Mapa de Classes de Solos em Pernambuco	49
Figura 15- Mapas de uso e cobertura em 2000.....	50
Figura 16 – Mapas de uso e cobertura em 2016	50
Figura 17 – Mapa do balanço de carbono no solo entre os anos de 2000 e 2016.	52
Figura 18– Mapa do estoque de carbono para o ano de 2000.	55
Figura 19- Mapa do estoque de carbono para o ano de 2016.	55
Figura 20- Mapa do balanço de carbono entre os anos de 2000 e 2016.....	56

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Fatores de alteração do carbono do solo com a mudança do uso da terra, adaptado de MCTIC, (2015).....	43
Tabela 2 - Áreas dos diferentes tipos de uso e cobertura no bioma Caatinga.	51
Tabela 3 - Balanço de carbono no solo (camada 0-100 cm) em função da mudança de cobertura e uso da terra no Bioma Caatinga em Pernambuco, de 2000 a 2016.	53
Tabela 4 - Quantificação do estoque total de C em diferentes compartimentos sob diferentes tipos de uso e cobertura no bioma Caatinga.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CABALA-C	Calculadora de Balanços de Carbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
DEN	Departamento de Energia Nuclear
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FACEPE	Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gt	Giga tonelada
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDT	Modelo digital do terreno
MEM	Modelagem Espectral de Mistura
Mg	Megagrama (corresponde a 1 tonelada)
MNT	Modelo numérico do terreno
NDFI	Índice Normalizado por Diferença de Fração
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
NO _x	Óxidos de nitrogênio
ONG	Organização não governamental
PRI	Índice de Vegetação Fotossintético
SAVI	Índice de vegetação ajustado ao solo
SEEG/OC	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
ZAPE	Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	O Bioma Caatinga	17
2.2	Manejo de áreas de Caatinga	18
2.3	Ciclo biogeoquímico do carbono	19
2.3.1	Biomassa da vegetação	22
2.3.2	Serapilheira	23
2.3.3	Solos	24
2.4	Uso de geotecnologias para estimativas dos estoques de carbono	26
2.5	Mapeamento anual da cobertura e uso do solo no Brasil - MapBiomias	28
2.6	Emissões e remoções de GEE no bioma Caatinga	30
3	MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1	Área de estudo	32
3.2	Estudo 1 – Desenvolvimento do software: Calculadora dos balanços de carbono - CABALA - C.	33
3.2.1	Processamentos dos geodados	33
3.2.2	Método de transferência de dados entre as imagens e os arquivos de análise	35
3.2.3	Utilização do software CABALA-C	38
3.3	Estudo 2 – Mapeamento dos balanços de carbono no solo em função da mudança de uso da terra no Bioma Caatinga	38
3.3.1	Aquisições de dados	39
3.3.2	Organizações do banco de dados espacial	41
3.3.3	Aquisição das informações de solo e uso e cobertura das terras na área de estudo.	42
3.3.4	Emissões e remoções relativas à mudança de estoque de carbono no solo	42
3.4	Estudo 3. Estimativas das variações dos estoques de carbono no bioma caatinga em Pernambuco em função da mudança de cobertura e uso da terra	44
3.3.1	Aquisições de dados	45
3.3.2	Processamentos dos geodados	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47

4.1 Estudo 1. Calculadora dos balanços de carbono - CABALA-C.....	47
4.2 Estudo 2. Mapeamento dos balanços de carbono no solo em função da mudança de uso da terra no Bioma Caatinga.....	49
4.2.1 Mapa de solo e uso e cobertura das terras na área de estudo	49
4.1.2 Mapa do balanço de carbono no solo entre os anos de 2000 e 2016.....	52
4.3 Estudo 3. Estimativas das variações dos estoques de carbono no bioma caatinga em Pernambuco em função da mudança de cobertura e uso da terra.....	54
4.3.1 Quantificação do estoque total de C em diferentes compartimentos sob diferentes tipos de uso e cobertura no bioma Caatinga	54
5. CONCLUSÕES.....	58
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

As alterações climáticas globais decorrentes do acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, dentre os quais se destacam dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), representam um desafio sem precedentes para a humanidade (NOBRE, 2011). O aumento da emissão de GEE interfere no balanço radiativo da terra e, em longo prazo, tende a elevar a temperatura média global, estima-se que este aumento deverá atingir 1,5 ° C entre 2030 e 2052 (KOEHLER *et al.*, 2002; IPCC, 2018). Essa elevação da temperatura, associada a padrões de alta variabilidade pluviométrica são algumas das mudanças esperadas em regiões áridas e semiáridas, podendo intensificar a frequência de secas, inundações e perda de biodiversidade em detrimento da produção de alimentos e da geração de energia (BRASIL, 2004). Essas mudanças têm sido sugeridas em estudos sobre projeções climáticas para a região semiárida do Nordeste do Brasil (Marengo *et al.*, 2017; Marengo e Bernasconi, 2015).

Entre os principais fatores que regulam a emissão de GEE, destacam-se as mudanças de uso e cobertura de terras que geram importantes impactos em atributos do solo, tais como umidade, temperatura, estrutura, exposição da superfície à radiação solar e atividade microbológica (RIBEIRO *et al.*, 2016). As mudanças de uso e cobertura de terras foram responsáveis por cerca de 56 bilhões de Mg de CO₂ equivalente no Brasil entre 1990 e 2014, representando 65% das emissões (SEEG, 2016). Por esse motivo, a redução de emissões geradas por desmatamento e, degradação dos solos é uma importante estratégia para mitigação das mudanças climáticas (MORTON, 2016).

O uso indiscriminado dos recursos naturais, a partir da supressão de grandes áreas de vegetação nativa para o cultivo e criação de animais, prática de queima da vegetação, retirada da lenha, exploração mineral e sobrepastoreio da vegetação de Caatinga, têm causado efeitos negativos na estabilidade e na capacidade da regeneração dos solos e da vegetação local (GIONGO *et al.*, 2011). Estes são importantes reservatórios de carbono (C) e seu manejo adequado pode contribuir para a remoção de C da atmosfera e aumento do estoque, com o objetivo de conter e reverter o acúmulo de GEE.

Estudos quanto à influência de fatores bióticos e abióticos no ciclo global do carbono em solos de regiões áridas e semiáridas são de extrema importância, uma vez que estas correspondem a 41% da superfície terrestre (RIBEIRO *et al.*, 2016; QUESADA *et al.*, 2009). Entretanto, esse conhecimento ainda apresenta muitas limitações no bioma Caatinga devido ao

pouco avanço das pesquisas dessa natureza nessa região. Em parte, a baixa disponibilidade de dados pode ser associada à limitação de recursos financeiros e humanos para a realização das atividades experimentais em campo, assim como à necessidade de maior tempo de acompanhamento dos estudos. Desta forma, existe uma clara necessidade de aprimorar e aprofundar os levantamentos e determinações regionais do balanço de emissões e remoções de gases de efeito estufa, assim como do balanço de carbono em ambientes terrestres para diversas fisionomias vegetais e biomas, solos e suas diferentes características de uso e cobertura das terras.

O uso de dados existentes atualmente, em combinação com ferramentas geotecnológicas é uma alternativa para contornar estas limitações no bioma Caatinga. A geotecnologia é uma ferramenta com alto potencial para manejo, processamento, análise e representação automática de dados georreferenciados, possibilitando informações precisas sobre mudanças de uso e cobertura rapidamente e a um baixo custo (SILVA *et al.*, 2018). A aplicação dessa ferramenta em dados provenientes de sensores remotos orbitais é uma solução promissora na integração da variabilidade espectral e espacial de coberturas vegetais, assim como dos dados obtidos *in loco*, em uma escala regional de estoque e fluxo de CO₂, podendo estimar com precisão aceitável o carbono estocado para ser negociável em acordos internacionais (LE MAIRE *et al.*, 2011).

O bioma Caatinga representa cerca de 85% do território de Pernambuco, no nordeste brasileiro. A partir do estudo do semiárido desse estado, é possível obter uma visão da variabilidade das características climáticas, dos tipos de solo, e das coberturas e usos da terra, que pode ser razoavelmente extrapolada para as outras regiões do Nordeste. O entendimento detalhado da ciclagem biogeoquímica e das interações entre a biosfera e a atmosfera nessas áreas pode auxiliar na identificação dos principais fatores que controlam a ciclagem de carbono na região, assim como das vulnerabilidades e estratégias de adaptação às mudanças climáticas projetadas, contribuindo para a formulação de políticas públicas que orientem o desenvolvimento de sistemas de uso da terra mais sustentáveis em longo prazo (MENEZES *et al.*, 2012).

Com o presente trabalho pretende-se gerar um software capaz de fornecer informações geoespacializadas e que também calcule as emissões líquidas de carbono no solo em uma área de interesse, através da fórmula utilizado pelo protocolo adotado pela equipe responsável pelo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa (MCTIC, 2015). Espera-se também mapear e estimar os estoques e fluxos de carbono em áreas sob diferentes usos e cobertura da terra no bioma Caatinga em Pernambuco, utilizando medidas in

situ e técnicas de geoprocessamento. Todas estas atividades têm como ênfase a identificação de vulnerabilidades, com o intuito de subsidiar políticas públicas para a adoção de estratégias de adaptação às mudanças projetadas.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver, a partir do uso de geotecnologias, o aprimoramento de uma metodologia para o mapeamento dos estoques de carbono no solo e na vegetação e dos balanços de carbono nos ecossistemas do bioma Caatinga.

1.2 Objetivos Específicos

- Sistematizar os dados disponíveis sobre estoques de carbono em diferentes tipos de solo e classes de cobertura e uso da terra;
- Elaborar um software capaz de sistematizar informações geoespacializadas para o cálculo das emissões líquidas de C no solo em uma área de interesse;
- Geoespacializar os dados obtidos de emissões e remoções de GEE e das interações com os tipos de solo, cobertura e uso da terra nas áreas do bioma Caatinga, em Pernambuco;
- Gerar mapas de estoques de carbono na vegetação e solos da Caatinga em diferentes momentos e calcular os balanços ao longo do tempo.

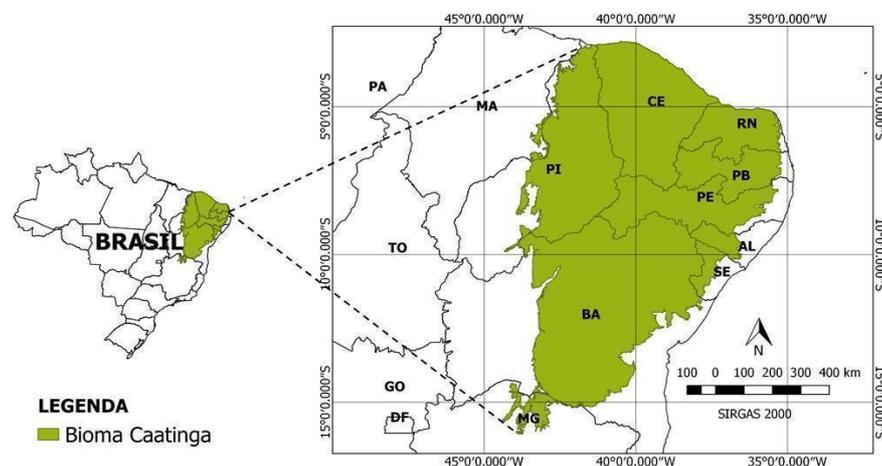
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O Bioma Caatinga

O bioma Caatinga é característico do semiárido brasileiro e tem como aspecto marcante a vegetação com predominância de plantas caducifólias lenhosas e arbustivas muito ramificadas, estendendo-se por cerca de 85 milhões de hectares distribuídos em dez estados compreendidos predominante na região Nordeste do país (Figura 1). Sua localização na faixa Equatorial garante a disponibilidade de abundante intensidade luminosa em todo seu território, durante todo o ano, apresentando forte insolação e baixa nebulosidade com média de 2800 h ano⁻¹ (SAMPAIO; ARAÚJO, 2005; OLIVEIRA-FILHO *et al.*, 2006).

Apesar da irregularidade climática, as temperaturas são altas e pouco variáveis, espacial e temporalmente, com médias anuais entre 25°C e 30°C e poucos graus de diferença entre as médias dos meses mais frios e mais quentes (SAMPAIO, 2003). Assim, luz e temperatura não são limitantes ao crescimento vegetal na área de Caatinga (SAMPAIO, 2010).

Figura 1 - Mapa do Bioma Caatinga



Fonte: Silva (2019)

O regime de chuvas, por outro lado, é mal distribuído e extremamente variável no tempo e no espaço. Essa variabilidade origina-se, dentre outras, das seguintes causas: (i) sistema muito complexo da formação das chuvas, com frentes que vem de vários quadrantes e que vão perdendo sua força à medida que penetram no núcleo do Semiárido. Como resultado, as chuvas

são concentradas em poucos meses do ano e os anos chuvosos são alternados irregularmente com anos de secas; (ii) disposição orográfica, com serras e chapadas mais altas interceptando as frentes mais úmidas, recebendo mais chuvas que o entorno e criando zonas pouco chuvosas a sotavento (SAMPAIO, 2003; SAMPAIO, 2010). Os índices pluviométricos anuais variam de 300 a 1000 mm, extremamente marcados pela sazonalidade, uma vez que o período seco apresenta umidade relativa entre 40-50% e na época chuvosa, entre 80 e 90% (ARAÚJO FILHO, 2013). Essas condições refletem-se em taxas de evapotranspiração potencial que variam entre 1500 a 2000 mm ano⁻¹, resultando em um balanço hídrico negativo durante 7 a 11 meses todos os anos (REDDY, 1983; SÁ *et al.*, 2000; MENEZES *et al.*, 2012).

A disponibilidade da biomassa em áreas secas tem como uma das principais forças motrizes a precipitação pluvial. Essa alta correlação com a cobertura vegetal torna as pastagens semiáridas um indicador sensível das mudanças climáticas e de uso e ocupação do solo (ALVES; AZEVEDO, 2015; HE, 2014; MAO *et al.*, 2012). Quando combinados com o aumento da população, a pressão dos rebanhos e a diminuição da vegetação, as terras ficam susceptíveis à degradação, que se configura como um problema ambiental crescente no semiárido brasileiro (SOUZA *et al.*, 2010; ALVES *et al.*, 2009).

As variações climáticas resultam em uma grande diversidade de condições ambientais e paisagens. O bioma Caatinga apresenta 17 grandes paisagens e sua média da altitude varia de 400 a 500 m, mas pode atingir o nível do mar no Rio Grande do Norte e no Ceará, e cobrir os planaltos regionais com altitudes pouco acima de 1000 m. Cerca de 37% da área é composta de declinações entre 4 a 12% e 20% como declinação acima de 12%, resultando em altos riscos de erosão em áreas cultivadas (LEPRUN, 1983). Jacomine (1996) dividiu a área em três tipos geológicos de acordo com o material de formação: 1) áreas no topo do escudo cristalino; 2) áreas onde o escudo cristalino está coberto por material sedimentar e 3) áreas de depósito sedimentar. Entre as 13 classes de solo, quatro ordens dominam o mosaico espacial que cobre 66% da área (Latosolos, 19%; Litossolos, 19%; Argissolos, 15%; e Luvisolos, 13%).

2.2 Manejo de áreas de Caatinga

Com a mudança no uso da terra, as áreas de vegetação nativa passaram a sofrer fortes modificações antrópicas, acarretando alterações nos ciclos biogeoquímicos dos nutrientes, principalmente do carbono e nitrogênio, que são elementos importantes na dinâmica dos ecossistemas (GIONGO *et al.*, 2011a). O uso indiscriminado dos recursos naturais, através da supressão de grandes áreas de vegetação nativa para cultivo e criação de animais, prática de

queima da vegetação, retirada da lenha, exploração mineral e sobrepastoreio da vegetação de Caatinga, causando efeitos negativos na estabilidade e na capacidade de regeneração dos solos e da vegetação natural (GIONGO *et. al*, 2011b). Acima de 80% da área apresenta alguma limitação no solo em relação ao uso agrícola, o que pode ser relativo à fertilidade do solo, à baixa drenagem e profundidade dos solos ou a sua alta sodicidade (SILVA, 2000).

A intensificação do uso da terra de forma insustentável reduz a produção de biomassa, gerando expansão das áreas cultivadas (SALES, 2017). Anualmente, parte da vegetação nativa de caatinga é derrubada para dar lugar a novas roças e parte das roças que vinham sendo exploradas é abandonada e nela regenera-se a vegetação nativa, fazendo parte dos ciclos de cultivo e de pousio da agricultura itinerante (SAMPAIO; COSTA, 2011).

Já se percebe que o sistema atual de exploração adotado na maior parte da região semiárida do Brasil vem contribuindo para a degradação de sua base de recursos primários, o solo e a vegetação, e para a perda da biodiversidade. A maior pressão populacional e as perdas de solo aparentemente pequenas, mas contínuas, têm levado a queda do potencial de produção, redução das colheitas e empobrecimento geral da população rural da região (SALCEDO; SAMPAIO, 2008).

O manejo florestal sustentável da Caatinga associado ao seu reflorestamento nativo, visando à produção de biomassa energética, pode ser uma solução eficaz para reverter o processo de degradação do sertão, além de ser uma solução econômica mais viável para a região, superando a pecuária e a agricultura. Estudos têm demonstrado que áreas de caatinga sob manejo florestal sustentável mantém a qualidade do solo, a produtividade de lenha e a biodiversidade (RIEGELHAUPT; PAREYN, 2010).

Diante o exposto, tem-se que é preciso desenvolver práticas sustentáveis de manejo que, além de fornecer alimentos e matérias primas necessárias às populações locais, procurem conservar o capital natural de modo a deixá-lo de forma acessível às presentes e futuras gerações. Os modelos de manejo de áreas da caatinga, devem potencializar a conservação do solo, a manutenção da umidade, a estabilidade física dos agregados, a fertilidade natural e o aumento do estoque de carbono e de nitrogênio, tanto no solo quanto na biomassa da vegetação (AQUINO, 2015).

2.3 Ciclo biogeoquímico do carbono

A energia solar que chega ao planeta inclui ondas de comprimento curto, que ultrapassam a atmosfera terrestre e não interagem com os gases presentes. Ao atingir a superfície da Terra,

uma parte da energia destas ondas é absorvida e outra é refletida para atmosfera, em comprimentos de onda mais longos (infravermelho) e que interagem com os gases atmosféricos. Parte dessa radiação é absorvida, o que contribui para manter uma temperatura média no planeta de 15°C. Esse processo de aquecimento da atmosfera é chamado comumente de efeito estufa natural. Se não houvesse esse efeito estufa natural a temperatura média terrestre seria 33° C menor, o que inviabilizaria a vida atualmente existente (CARVALHO et al., 2010, CERRI; CERRI, 2007).

As mudanças climáticas vêm causando ao longo das últimas décadas impactos consideráveis em sistemas naturais e humanos em todos os continentes e oceanos do planeta (IPCC, 2014). Dentro deste contexto, torna-se imprescindível considerar o aumento crescente da concentração de dióxido de C (CO_2) na atmosfera e as possíveis consequências sobre as plantas, principalmente em razão do aumento da temperatura, cuja previsão é de 1,5 a 4,5° C até o ano 2050, e descobrir como a terra vai reagir aos impactos da liberação excessiva deste gás (WATZLAWICK, 2003).

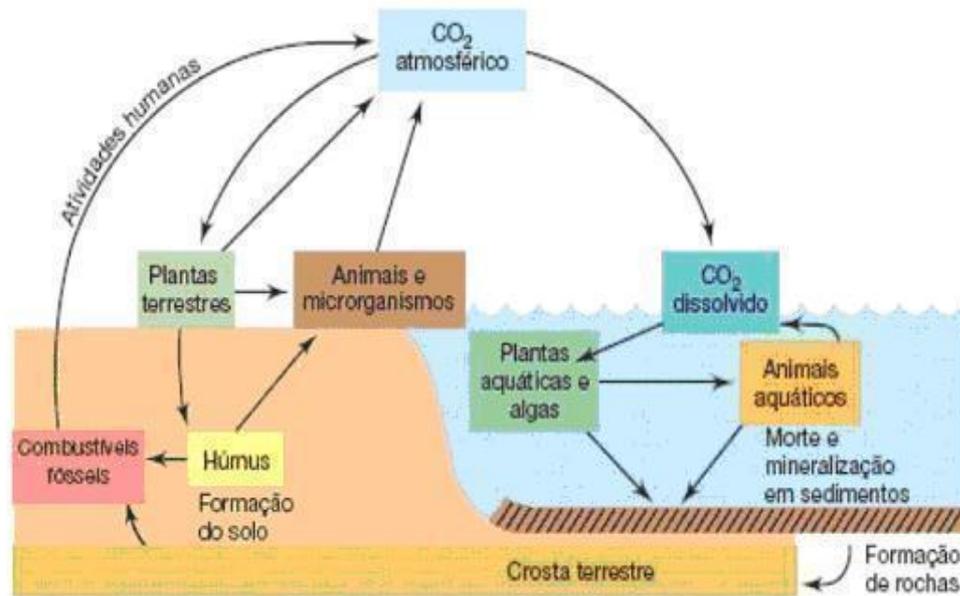
A importância do carbono e de seus compostos é indiscutível. Este é onipresente na natureza e seus compostos (proteínas, carboidratos e gorduras) são constituintes essenciais de toda a matéria viva e fundamentais na respiração, fotossíntese e regulação do clima, sendo de grande importância para a dinâmica dos ecossistemas (MARTINS *et al.*, 2003; YU, 2004).

O armazenamento de C no globo terrestre (Figura 2) é dividido principalmente em cinco compartimentos: oceânico, geológico, pedológico (solo), biótico (biomassa vegetal e animal) e atmosférico. Todos esses compartimentos estão interconectados, e o C circula entre eles, em fluxos de carbono, que podem ser divididos em dois domínios: O primeiro é um domínio rápido, com grande taxa de renovação e um segundo domínio lento que consiste em enormes reservatórios de carbono com uma taxa de renovação mais lenta, como por exemplo, as rochas sedimentares (LEAL, 2004; CIAIS *et al.*, 2014).

Segundo Mele *et al.*, (2015), a degradação desses reservatórios pela atividade antropogênica, em especial consumo de combustíveis fósseis, nada mais é do que um retorno do carbono, acumulado pelos vegetais queimados, à atmosfera. Estas emissões, nos moldes como vem ocorrendo na atualidade, são prejudiciais ao equilíbrio atmosférico do planeta e dificultam a sobrevivência das mais variadas espécies, contribuindo para as alterações climáticas de modo significativo.

Ao longo dos últimos anos, as emissões anuais passaram de 6,3 Gt (Giga tonelada) de C em 1994 para 8,7 Gt de C em 2009 (BODEN *et al.*, 2013), ou seja, um aumento de 39% ao longo deste período.

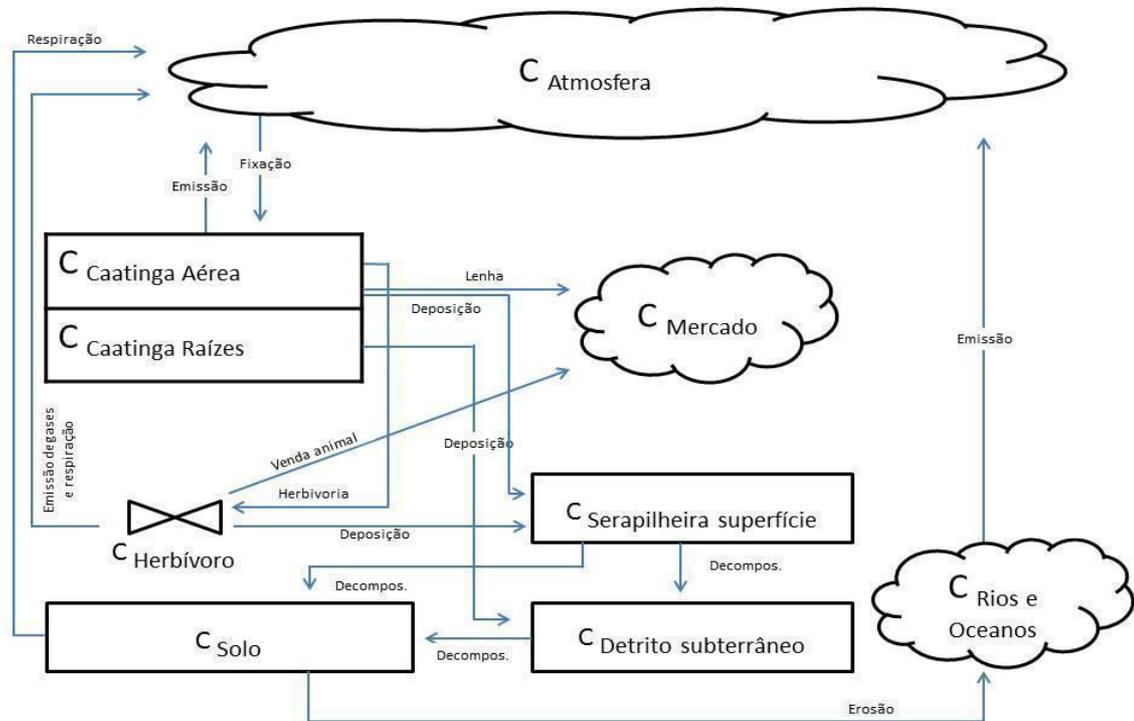
Figura 2 - Ciclo Global do Carbono.



Fonte: MADINGAN *et al.*, (2004)

Visando representar de forma esquemática o ciclo do carbono da área de estudo, foi elaborado um modelo (Figura 3), onde a cada compartimento (caatinga aérea, caatinga raízes, solo, serapilheira superfície e detrito subterrâneo) será atribuído valores de C com base na literatura, com a finalidade estudar o comportamento do carbono através da modelagem.

Figura 3 - Representação esquemática dos ciclos biogeoquímicos do carbono no Bioma Caatinga no Estado de Pernambuco.



Fonte: Silva (2019)

2.3.1 Biomassa da vegetação

As plantas estocam carbono tanto na biomassa acima quanto abaixo do solo e, uma estimativa acurada da biomassa é fundamental para entendimento do ciclo do carbono (SILVEIRA *et al.*, 2008). A vegetação verde retira o gás carbônico da atmosfera através do processo da fotossíntese, convertendo-o em compostos orgânicos utilizados no crescimento e metabolismo vegetal. As plantas lenhosas armazenam o carbono na madeira e em outros tecidos até sua morte e decomposição. Nesta fase, o carbono na madeira pode ser despreendido na forma de gás carbônico, monóxido de carbono, metano, ou pode ficar incorporado no solo como substância orgânica (COSTA *et al.*, 1997).

A vegetação da Caatinga contribui efetivamente no estoque de CO² atmosférico e suas espécies estão adaptadas a longos períodos de seca severa (SANTOS *et al.*, 2014; PEREIRA-JUNIOR *et al.*, 2016). As árvores presentes nas florestas secas tropicais apresentam características peculiares, como a grande capacidade de rebrota de raízes e do tronco após o

corte ou morte do caule, acarretando a ocorrência de árvores bifurcadas com vários fustes e galhos (SAMPAIO *et al.*, 2010).

As herbáceas têm densidades entre dez a cem indivíduos por metro quadrado, mas com distribuição agregada nos locais mais abertos (ARAÚJO *et al.*, 2005, REIS *et al.*, 2006). As folhas, em sua maioria do tipo compostas, com limbo foliar estreito, possuem vida limitada devido à escassez de chuvas. Assim como a vegetação das matas serranas e dos vales, as caatingas das áreas mais úmidas do limite leste praticamente desapareceram suprimidas pela agropecuária. Restam poucas no Agreste da Paraíba (PEREIRA *et al.*, 2002) e de Pernambuco (ALCOFORADO FILHO; NOGUEIRA FERRAZ *et al.*, 2003).

Conforme Cabral *et al.* (2013), em um estudo feito sobre a estrutura da parte aérea da caatinga em Santa Teresinha, Paraíba, a soma das biomassas de apenas duas espécies (*Poincianella pyramidalis* e *Commiphora leptophloeos*) fez mais de 55% da biomassa total aérea na comunidade em estágio tardio de sucessão. Portanto, mesmo em áreas preservadas de caatinga, poucas espécies contribuem com a maior parte de biomassa produzida. Isso se deve ao fato de algumas espécies destacarem-se mais que outras por possuírem forte resistência à seca e boa capacidade de competição por luz, tornando-se espécies dominantes nas etapas posteriores do processo de regeneração (AURINO, 2007).

Freitas e Sampaio (2008) salientaram que a biomassa aérea em áreas de caatinga é função principalmente da disponibilidade de água em cada local e, na maioria destes locais, a biomassa oscila de 30 a 50 Mg ha⁻¹. Para Silva e Sampaio (2008), pouco se sabe sobre as partes e a quantidade de biomassa da caatinga para diversos fins, como pastagem nativa, produção de lenha e para agricultura itinerante, em que, após a queimada da vegetação, é feito o destocamento e a semeadura.

2.3.2 Serapilheira

A serapilheira, em uma floresta, é a principal via de transferência no fluxo de nutrientes. É fundamental para a sustentabilidade da floresta, uma vez que permite o retorno ao solo de uma significativa quantidade de nutrientes absorvida pelas plantas para serem novamente assimilados pelos microrganismos e pelos vegetais. Sua composição se faz pela deposição de materiais vegetais na superfície do solo, tais como folhas, cascas, ramos, troncos, gravetos, flores, inflorescências, frutos, sementes e fragmentos de vegetais e animais não identificáveis, este último denominado miscelânea (FERREIRA *et al.*, 2007; ANDRADE *et al.*, 2008).

O retorno de nutrientes para o solo por meio da serapilheira pode ser estimado de acordo com o estoque na floresta, sendo a quantidade de cada elemento variável de acordo com o órgão da planta e a massa vegetal depositada (AMORIM, 2009).

Uma das formas de acompanhar a produtividade das vegetações arbustivo-arbóreas é medir a queda de folhas e outras frações da planta, como os galhos finos e miscelâneas. Se a vegetação já tiver atingido estabilização em sua formação e perda de biomassa, a medição dos valores da deposição de serapilheira dá uma ideia da capacidade de produção. Dantas (2003), estudando as produções de serapilheira em uma caatinga arbórea na Paraíba, por dois anos consecutivos, encontrou valores de 5,3 e 2,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Já no Ceará, encontrou queda de serapilheira de 3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, dos quais 80% eram folhas. Martins *et al.* (2008) quantificou os estoques de serapilheira em áreas de Caatinga em Pernambuco e encontrou 6,5 a 20,1 Mg ha⁻¹ de matéria seca em áreas preservadas, a partir de 1,9 até 7,2 Mg ha⁻¹ em áreas moderadamente degradadas e 0,14 a 1,02 Mg ha⁻¹ em áreas severamente degradadas.

Santana (2005), Souto (2006) e Costa *et al.* (2007), encontraram produção de serapilheira nas áreas mais secas do bioma Caatinga entre 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, mas esta produção pode chegar a mais de 6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ nas áreas mais úmidas da região (DANTAS, 2003).

Moura *et al.* (2016), estudando por dois anos a deposição de serapilheira no semiárido paraibano, em quatro diferentes estágios de sucessão (pasto recentemente abandonado e caatinga com 15, 37 e 57 anos), encontraram os maiores fluxos de C entre os de regeneração intermediários (15 e 37), e o menor no pasto. Estes níveis de produção de serapilheira são claramente inferiores aos observados em outras formações florestais no Brasil, mas, à semelhança de outros ecossistemas, o período de pico de serapilheira em áreas de vegetação de Caatinga ocorre no final da estação chuvosa e início da estação seca.

2.3.3 Solos

As alterações climáticas e de uso da terra promovem a diminuição de nutrientes do solo e o declínio da sua retenção de água, causando a desagregação da estrutura do solo (SALES, 2017). O estoque de C orgânico no solo é um dos resultados ligados à sustentabilidade e ao manejo florestal em um determinado ecossistema.

As ações humanas podem trazer efeitos positivos à preservação da biodiversidade e da melhoria da qualidade de vida do homem na terra. De acordo com Janzen (2004) e Sommer e Bossio (2014), os solos agrícolas ocupam 37% da superfície da Terra. O carbono encontrado

até 1 m de profundidade do solo é estimado em 2000-2500 Gt e, desse total, 60% são de carbono orgânico e 40% de carbono inorgânico (SOMMER; BOSSIO, 2014). A quantidade de carbono no solo é três vezes maior que a de biomassa acima do solo e 230 vezes maior que o total emitido pelo homem para a atmosfera, indicando não apenas que qualquer manejo ligado ao estoque de carbono no solo pode ter um impacto enorme a nível global, mas também que os solos podem ser os maiores sumidouros de carbono.

Os solos do bioma caatinga têm a maior variabilidade do país (SAMPAIO, 2010). São originários de duas formações geológicas principais, a sedimentar e cristalina. Os solos sedimentares são antigos, intemperizados, profundos e bem drenados, enquanto que os solos do cristalino são derivados do antigo escudo cristalino pré-cambriano que foram expostos à erosão geológica e possuem diferentes graus de intemperização e profundidades. A formação sedimentar predomina na porção oeste e a cristalina, na porção leste.

Segundo Duque (1980), os solos do bioma Caatinga, são geralmente pouco profundos, de baixa permeabilidade, baixo teor de matéria orgânica, mas relativamente ricos em bases trocáveis. Recebem anualmente excesso de calor e luz, o que resulta em uma rápida mineralização da matéria orgânica.

Alguns estudos de estoque de carbono em diferentes tipos de usos da terra compararam diferentes classes de solos. No município de Petrolina, em um estudo com diferentes tipos de cobertura e usos da terra sob Argissolos, Giongo *et al.* (2011) encontraram 10,8 Mg ha⁻¹ de C em caatinga preservada, 7,0 Mg ha⁻¹ em caatinga alterada, 6,8 Mg ha⁻¹ em pastagem com capim buffel e 4,5 Mg ha⁻¹ na camada de 0-10 cm. Amorim (2009), em Argissolos sob Caatinga, no mesmo município, verificou que no período de estiagem os valores de estoques de C foram: 16,5 Mg ha⁻¹, 11,8 Mg ha⁻¹ e 9,8 Mg ha⁻¹; e no período chuvoso 14,2 Mg ha⁻¹, 10,0 Mg ha⁻¹ e 8,99 Mg ha⁻¹, nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, respectivamente. Kauffman *et al.* (1993) encontraram estoque de C de 18 Mg ha⁻¹ na camada de 0-10 cm em Argissolos sob caatinga hiperxerófila, no município de Serra Talhada, em Pernambuco.

Em Sertânia, em estudos com Neossolo Litólico e na chapada do Araripe em Latossolo, ambos em Pernambuco e sob vegetação nativa, os estoques médios de carbono foram de 23,1 e 17,7 Mg ha⁻¹, respectivamente, na camada de 0-12 cm (ANTUNES *et al.*, 2010). Corrêa *et al.* (2009), avaliando os atributos químicos de solos sob diferentes usos em perímetros irrigados no município de Petrolândia, região do sertão do São Francisco, encontraram estoques de carbono de 23,2 Mg ha⁻¹ sob vegetação nativa, 22,7 Mg ha⁻¹ em regeneração sob mata nativa, 17,9 Mg ha⁻¹ em pastagem, 20,8 Mg ha⁻¹ em culturas de ciclo curto e 17,34 Mg ha⁻¹ em

fruticultura, na camada de 0-30 cm. As maiores reduções do estoque de C foram observadas nas áreas com pastagem e fruticultura, possivelmente devido ao uso intensivo desses solos. As áreas em regeneração tiveram estoques semelhantes às da mata nativa, demonstrando a grande capacidade de resiliência da Caatinga.

2.4 Uso de geotecnologias para estimativas dos estoques de carbono

Compreender a distribuição espacial de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço constitui hoje um grande desafio para a elucidação de questões centrais em diversas áreas do conhecimento (CÂMARA, 2002). A obtenção de informações sobre a distribuição geográfica alavancou a análise espacial e a tomada de soluções em inúmeros países. Historicamente, as primeiras tentativas de processamento de dados geográficos surgiram com a evolução da tecnologia da geoinformação e também do sensoriamento remoto, o que tornou possível a obtenção, armazenamento e representação das informações geográficas em ambiente computacional (ROSA, 1996). Com o desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas ficou mais fácil analisar dados tabelados e espaciais, e isto era praticamente impossível com o mapeamento manual (BARBOSA, 1997).

A utilização de geotecnologias é um instrumento de grande potencial que permite a gestão, processamento, análise e representação automatizada de dados georreferenciados, permitindo a obtenção de informações rápidas e precisas a baixo custo e posteriormente, a aplicação no planejamento (TERRA *et al.*, 2016; FLAUZINO *et al.*, 2010).

O conjunto das geotecnologias (Geoprocessamento, Sistema de Informação Geográfica e Sensoriamento Remoto) abriga vários tipos de sistemas e de técnicas para tratamento da informação espacial, permitindo visualizar os dados em forma de mapas, relatórios e tabelas, constituindo ferramenta de análise e subsídio à tomada de decisão (BONATO, 2007).

O termo “álgebra de mapas” foi definido por Tomlin (1990), e visa indicar os procedimentos de análise espacial em geoprocessamento como um conjunto de operações matemáticas sobre mapas, em analogia aos ambientes de álgebra e estatística tradicional, associando um valor quantitativo ou qualitativo para cada local de uma área de estudo (BONHAM-CARTER, 2014).

Segundo Barbosa *et al.* (1998), a álgebra de mapas compõe uma linguagem especializada para realizar operações que tem tanto um sentido matemático quanto cartográfico e espacial. Estas operações podem ser agrupadas em três grandes classes:

- Pontuais: a saída da operação é um mapa cujos valores são função apenas dos valores dos mapas de entrada em cada localização correspondente. Podem operar apenas sobre um mapa ou realizar intersecções entre conjuntos espaciais (ex. operações booleanas entre mapas temáticos).
- Vizinhança: o resultado é um mapa cujos valores dependem da vizinhança da localização considerada. Exemplos são a filtragem espacial de uma imagem e o cálculo de declividade de um modelo numérico do terreno - MNT.
- Zonais: definidas sobre regiões específicas de um mapa de entrada, onde as restrições são fornecidas por outro mapa. Um exemplo seria: “dado um mapa de solos e um mapa de declividade da mesma região, obtenha a declividade média para cada tipo de solo”.

O conhecimento mais profundo de algumas características quantitativas e qualitativas do solo, bem como a definição de técnicas pelas quais as suas condições podem ser avaliadas a nível regional é de fundamental importância. Para isto, é necessário definir as fases no processo de fluxo de carbono baseado na compatibilização de informações oriundas de diversos campos de trabalho (sensoriamento remoto, geocampos, geodados, ferramentas de geoprocessamento adequadas) e gerar mapas em diferentes escalas.

Dados de sensoriamento remoto tornaram-se a principal fonte para a estimativa da biomassa (LU, 2006). Segundo Lima Júnior (2014), a estimativa da biomassa com uso de índices de vegetação e equações alométricas de biomassa em uma área de caatinga é um método eficiente, não destrutivo e de baixo custo, que apresenta toda a distribuição de biomassa na área de interesse, podendo ser utilizado em projetos de manejo florestal sustentável. Araújo *et al.* (2011), comparando os índices SAVI e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) em parcelas de caatinga preservada e degradada, notaram que o NDVI é um ótimo indicador de cobertura vegetal, independente do período.

Coltri *et al.* (2009) salientaram a possibilidade da utilização dos índices de vegetação espectrais para estimar a biomassa e o estoque e o sequestro de carbono, relacionando o NDVI ao Índice de Vegetação Fotossintético (PRI), que expressa a relação entre as bandas do verde e azul, podendo ser relacionado com a taxa fotossintética. O cálculo do sequestro de C a partir da integração desses dois índices (NDVI e PRI) gera um novo índice: O CO₂ Flux (RAHMAN *et al.*, 2001).

Cerqueira e Franca-Rocha (2007) compararam tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no Bioma Caatinga, relacionando dois métodos de estudo. O primeiro modelo convencional é desenvolvido com amostragem destrutiva da biomassa, com o seguinte protocolo: Amostragem direta (destrutiva, derrubada da vegetação) ou indireta; composição de equações alométricas com base nos dados da composição florística; mapeamento da vegetação e extrapolação da amostragem para a tipologia vegetacional. O segundo modelo é utilizado integrando geotecnologias por meio de um SIG, tais como, mapas de vegetação e do fluxo de carbono medida pelo índice CO₂Flux, o modelo digital do terreno (MDT), e pontos de coordenadas levantados com GPS em campo.

Para o caso da abordagem estudada, um Sistema de Informação Geográfica pode reunir as informações de campo que estão organizadas em tabelas, mapas, imagens e outros, para gerar uma análise dos dados para o aprimoramento das estimativas de emissões e remoções de gases de efeito estufa no Bioma Caatinga. Por consequência, pode gerar um mapeamento temático da área analisada.

2.5 Mapeamento anual da cobertura e uso do solo no Brasil - MapBiomias

O MapBiomias é uma iniciativa do SEEG/OC (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima) reunindo uma rede colaborativa de criadores formado por ONGs, universidades e empresas, organizada por biomas e temas transversais em parceria com a empresa Google. Tem como principal objetivo o mapeamento e a classificação das mudanças da cobertura do solo em todos os biomas do Brasil (<http://mapbiomas.org/>).

A diferenciação das classes de uso e cobertura do solo nas imagens Landsat é feita pelo MapBiomias a partir de uma chave de classificação empírica baseada em Modelagem Espectral de Mistura (MEM) após a remoção das nuvens (*Cloud*) através de filtro (ROSA, 2016; TYUKAVINA *et al.*, 2017). O teor de sombra e a elevada proporção de vegetação não-fotossinteticamente ativa em relação à ativa tendem a dificultar a classificação da cobertura de plantios florestais e áreas queimadas, sendo o Índice Normalizado por Diferença de Fração (NDFI) uma forma de diminuir a degradação do sinal (SOUZA; ROBERTS; COCHRANE, 2005). Seus valores normalizados variam de -1 a 1 e são resultantes dos modelos de análise de mistura espectral, cujas variáveis são as frações de vegetação, sombra, vegetação seca e de solo, obtidos através da decomposição linear do pixel (SMALL, 2004).

Teoricamente, a combinação dos valores elevados da vegetação normalizada (vegetação sadia e sombra do dossel) com baixos valores de vegetação seca e solo tende a gerar valores elevados do índice para a floresta intacta, próximos a 1. A degradação dessa floresta está associada ao aumento da vegetação seca e solo, o que diminui os valores do NDFI quando comparado a antes da degradação. Este índice tem a vantagem de combinar, em uma única banda sintética, todas as informações que se mostraram relevantes para identificar e mapear florestas degradadas, aprimorando sua detecção (GANEM, 2017).

As frações e o NDFI são utilizados em uma chave de decisão empírica, permitindo estabelecer padrões para cada região do Bioma, que posteriormente pode ser adaptado para cada carta 1:250.000 e cada ano para refletir características regionais ou sazonais (ROSA, 2016). O NDFI3 foi ajustado para o MapBiomas a partir do índice NDFI convencional, retirando a vegetação não fotossinteticamente ativa do divisor e somando à vegetação verde no dividendo.

A partir disso, é possível minimizar o efeito da sazonalidade da caatinga no NDFI convencional, uma vez que o período seco afeta a vegetação no sentido de promover uma maior predominância da vegetação seca em detrimento da vegetação verde, minimizando os resultados que indicam maior predominância de solo exposto em períodos de seca, ou seja, reduzindo a variação do NDFI convencional. Os valores do NDFI foram reescalados para uma árvore de decisão, passando a variar de 0 a 200, sendo os maiores valores relacionados a maior presença de vegetação verde e sombra.

O reescalamento é feito por meio da soma do pixel após a aplicação do NDFI a 1, seguida da sua multiplicação por 100. Isso possibilita a distinção entre um pixel que pode ser classificado como floresta densa ou floresta aberta, de um pixel que pode ser classificado como outra formação nativa não florestal, como o caso da savana-estépica. A amplitude do índice NDFI ao longo do ano é calculada pelo parâmetro DIF_NDFI, usando todas as imagens da carta.

Isso altera a amplitude das áreas mapeadas, uma vez que, as florestas tendem a ter uma menor amplitude enquanto que áreas agrícolas apresentam uma amplitude maior devido ao solo exposto e à vegetação vigorosa em um mesmo ano. Entretanto, a sazonalidade pode exercer uma influência considerável neste parâmetro, uma vez que, na seca, a amplitude das áreas agrícolas pode diminuir, gerando uma confusão espectral com áreas não vegetadas (GANEM, 2017).

O algoritmo FMASK é um método proposto por Zhu e Woodcock (2012) com o objetivo de detectar nuvens e sombras provocadas pelas mesmas em imagens Landsat, gerando um

produto a partir de dados de reflectância no topo da atmosfera (TOA) e da temperatura de brilho. Critérios baseados das nuvens separam pixels considerados como nuvens potenciais de pixels de céu claro, produzindo a máscara sobre superfícies terrestres (0 – céu claro; 1 – água; 2 – sombra; 3 – neve; 4 – nuvem; e 255 – não identificado) e aquáticas a partir da combinação das probabilidades dos parâmetros temperatura, variabilidade espectral e brilho dos alvos.

Zhu e Woodcock (2012) ainda destacaram que o efeito de sombreamento gerado pelas nuvens na região do infravermelho é usado para gerar uma camada de sombra potencial, que serve como base para a geração dos alvos de nuvem, assim como o ângulo de visada do satélite e a iluminação.

A metodologia do MapBiomias para classificação das coberturas florestais usa como critério uma árvore de decisão. Daychoum (2012) descreve este método como um conjunto de diagramas que apresentam uma sequência de decisões inter-relacionadas e os seus resultados esperados de acordo com a probabilidade. A ramificação das alternativas disponíveis geradas a partir de uma decisão inicial representa graficamente um problema complexo e o decompõe em subproblemas, mostrando caminhos para a tomada de decisão.

2.6 Emissões e remoções de GEE no bioma Caatinga

Ribeiro *et al.* (2016) mostraram que, juntos, o tipo de cobertura do solo e a condição climática podem afetar positivamente a produção de GEE no Bioma Caatinga, levando a uma emissão significativa para a atmosfera.

Costa *et al.* (2014) citou que o Brasil é rico em áreas florestais tropicais secas, ou seja, a caatinga, que tem como característica a pouca disponibilidade de água. A partir do uso do solo, a vegetação original se altera, apresentando vários estágios de regeneração, logo, o bioma apresenta condições para a comparação de biomassa radiculares, apresentando a estimativa de biomassas de raízes e brotos em três estágios de regeneração florestal e em vegetação densa e aberta em diferentes classes de solo na floresta caatinga no Nordeste Brasileiro.

Costa *et al.* (2014) mostraram que a biomassa de raízes na caatinga madura foi 34,2 Mg ha⁻¹ enquanto na vegetação em regeneração por 40 anos foi 7,3 Mg ha⁻¹ e de 18 anos foi 2,6 Mg ha⁻¹. A biomassa lenhosa acima do solo foi, respectivamente, 60, 29,5 e 22,2 Mg ha⁻¹.

Segundo Araújo *et al.* (2009), existem vários fatores que influenciam na taxa de CO₂ para a superfície do solo, como temperatura, umidade do solo, aeração e populações microbianas, como também a emissão de C-CO₂ para a atmosfera é influenciada pela combinação do preparo do solo com o manejo do mesmo, além da influência da umidade e temperatura.

Mata *et. al* (2015) afirmaram que é possível estimar as emissões de CO₂ com o modelo INPE-EM (INPE - Emission Model, versão 1.0), adaptando-o para o estudo do bioma caatinga. Ainda segundo os autores, a partir do modelo utilizado e da dinâmica de corte da vegetação, utilizando uma caracterização de submodelos para a vegetação primária, as médias anuais de emissões de CO₂, com o desmatamento extraindo 100% das raízes e queima, encontrando 2,5 x 10³ (Mg CO₂ ano⁻¹), para o corte de 50% das raízes durante o desmatamento 2,3 x 10³ (Mg CO₂ ano⁻¹) e para a preservação das raízes 2,1 x 10³ (Mg CO₂ ano⁻¹).

Lima (2017), estudando a emissão de carbono para a atmosfera no Agreste pernambucano, encontrou perdas de 1,15 milhões de Mg de C para a biomassa vegetal e 1,14 milhões de Mg de C para o carbono do solo, emitidos ao longo dos 26 anos, em uma área de 3.044 km².

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida em três etapas, que incluíram metodologias específicas para sua execução. As etapas serão descritas nos Estudos: 1, 2 e 3 respectivamente.

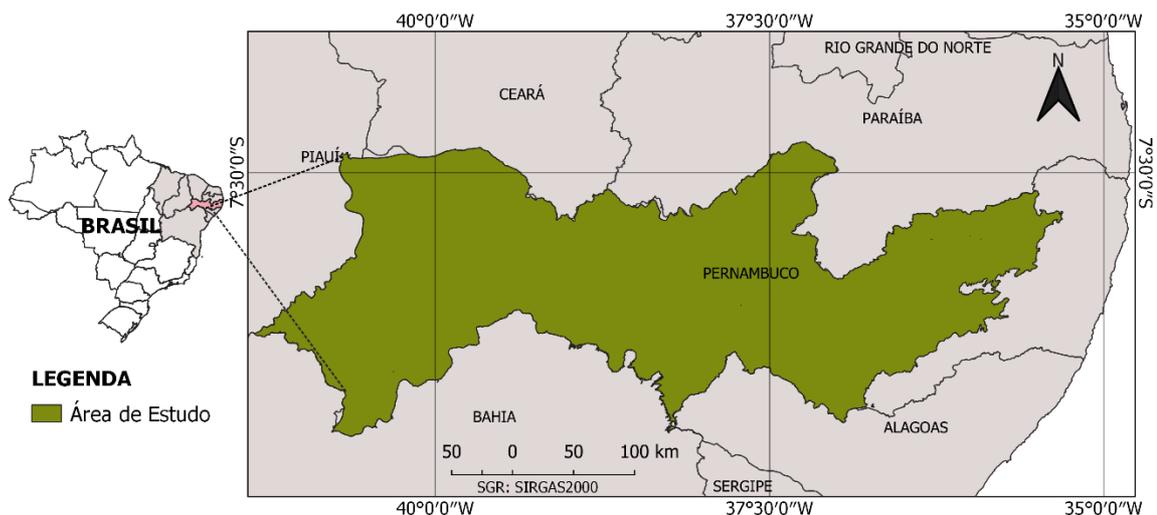
3.1 Área de estudo

A área de estudo foi Pernambuco, localizado no centro leste da Região Nordeste do Brasil, (Figura 4). O Estado encontra-se entre os fusos 24S e 25S e limita-se ao Norte com a Paraíba e Ceará, a leste com o Piauí, e ao sul com a Bahia e Alagoas.

A área do bioma Caatinga em Pernambuco ocupa cerca de 83.507,9km² e representa 85% de todo o Estado. O clima predominante é do tipo Bshw (Köppen, 1948), as chuvas são irregulares, com médias pluviométricas anuais que variam entre 252 e 1200mm (Sampaio, 1996). Essa área cobre três mesorregiões climáticas: Agreste, Sertão do São Francisco e Sertão Pernambucano.

As classes de solos predominantes são: Argissolos; Cambissolos; Latossolos; Luvisolos; Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarênico; Neossolo Regolítico; Planossolos e Vertissolos (Silva *et al*, 2001).

Figura 4 - Área de estudo



Fonte: Silva (2019)

3.2 Estudo 1 – Desenvolvimento do software: Calculadora dos balanços de carbono - CABALA - C.

Devido ao grande volume de informações necessárias para gerenciar e executar o cálculo das emissões líquidas de carbono no solo em decorrência da mudança de uso e cobertura, foi necessário o desenvolvimento de um programa computacional em Visual Basic 6.0 intitulado calculadora dos balanços de carbono CABALA-C. O processo de construção da ferramenta deu-se pelo tratamento dos geodados, seguido de um processo de conversão de arquivos em formato raster para pontos, transferência de dados entre pontos e por fim os cálculos dos balanços de carbono. A seguir são apresentadas as metodologias empregadas para cada uma das etapas supracitadas.

3.2.1 Processamentos dos geodados

Para o processamento dos geodados foram utilizadas duas imagens orbitais obtidas pelo projeto MapBiomias na coleção 2.3. As imagens são provenientes dos satélites LandSat 5 e 8, com uma resolução espacial de 30m x 30m, realizadas em 2000 e 2016, respectivamente. O software utilizado para a organização do geodatabase, nas análises espaciais e na elaboração dos mapas, foi o ArGIS 10.6.1 da empresa ESRI - *Environmental Systems Research Institute* (Esri, 2018).

Para permitir a comparação entre as imagens dos anos de 2000 e 2016, foi necessário o ajuste da posição da imagem mais recente (2016) com base no posicionamento da imagem original (2000). Para isso foram utilizadas as funções de processamento raster existentes no ArcGIS, aplicando-se a localização dos pixels das extremidades da imagem de 2000 como pontos de referência para o ajuste da imagem de 2016.

Na geração dos pontos, aplicaram-se as funções de conversão do raster para pontos existentes no ArcGIS, o que permitiu que cada ponto tivesse o valor original do pixel que determinou a sua posição. Cada valor armazenado dos pontos foi decodificado, com base na tabela de USO DO SOLO, baseada na tematização existente (Tabela de Valores e Usos). Desta forma, foram obtidos dois arquivos do tipo vetorial no formato *shapefile* de pontos, um para cada imagem original (2000 e 2016), contendo a descrição do uso do solo no ano da obtenção da imagem.

Figura 5 - Divisão da área de estudo para o processamento.



Fonte: Silva (2019)

A conversão dos pixels em pontos, gerou uma enorme quantidade de dados e, por este motivo, foi necessária a divisão da área estudada em vinte partes menores (Figura 5) viabilizando o processamento no ArcGIS, uma vez que o ArcGIS não suporta o processamento de arquivos maiores que 2 gigabytes.

Como resultado da conversão foi gerado um arquivo que contivesse os dados de uso, inicialmente registrados nos pixels de cada uma das imagens. Para isso, foi criado um arquivo do tipo *shapefile* de pontos, sendo um ponto para cada pixel de cada uma das imagens, resultando em 101.311.672 pares de coordenadas, referentes ao centroide de cada pixel em cada imagem.

O arquivo resultante da metodologia utilizada é uma tabela que contém as informações das coordenadas do ponto, uso do solo no ano 2000 e uso do solo no ano 2016. Foi incluída no arquivo de pontos a informação de Mesorregião (IBGE) a partir de um *layer* em formato *Shapefile* fornecido pelo Zoneamento Agroecológico de Pernambuco - ZAPE (SILVA *et al*, 2001). Este procedimento foi realizado por transferência de dados entre *shapefiles* considerando como origem o *shapefile* de polígonos da Mesorregiões e como destino o *shapefile* de pontos resultante do processamento anterior.

Os valores de classificação na escala de pixel de 30 x 30m, facilitou a identificação e quantificação das mudanças ocorridas na área entre o período analisado, possibilitando maior agilidade na aquisição dos resultados, uma vez que no CABALA-C os arquivos poderão conter uma quantidade maior de pontos (pixel) a serem processados, otimizando o tempo de processamento dos cálculos e reduzindo o tamanho de arquivo no formato *shapefile*, isso não

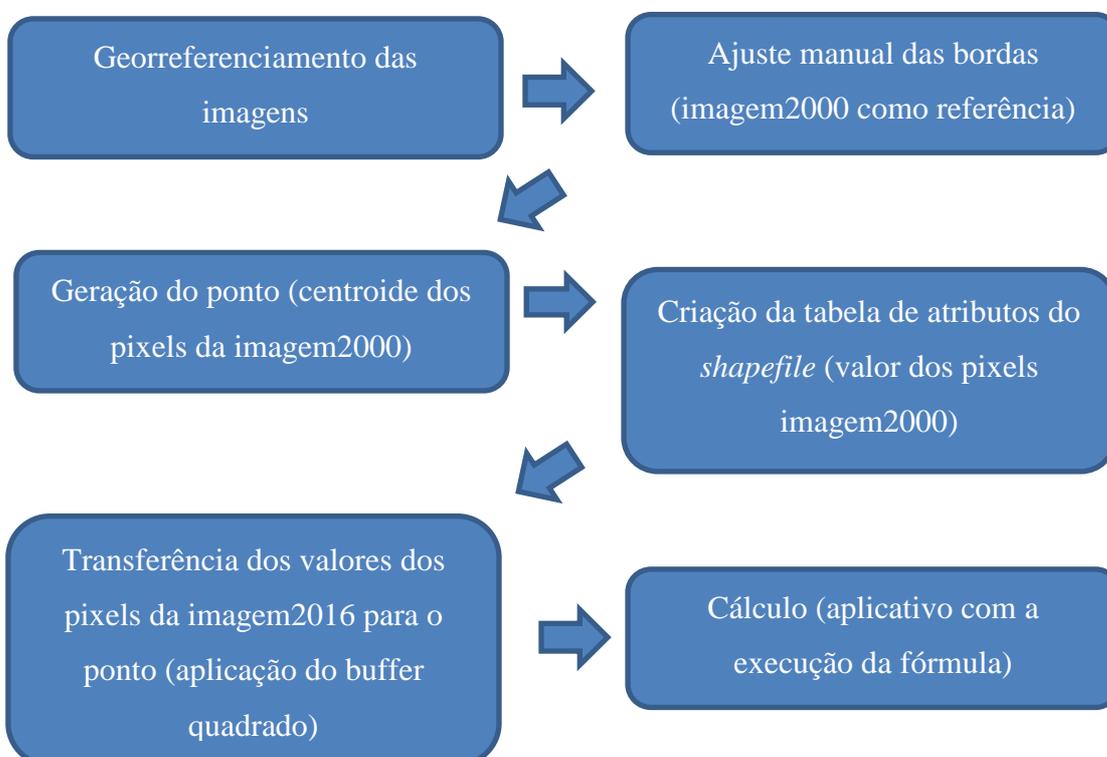
ocorreria caso fosse utilizado planilhas eletrônicas que permite uma quantidade limitada pontos (linhas / coordenadas) por arquivo.

3.2.2 Método de transferência de dados entre as imagens e os arquivos de análise.

O software ArcGIS gera buffer a partir do raio de distância formando círculos que acabam deixando espaços vazios entre eles e onde pontos dos centroides não seriam alcançados, ocasionando pontos que não seriam compatibilizados. A forma de contornar esse problema foi incluir no software desenvolvido, uma função de buffer quadrado (30x30m) permitindo que todos os pontos fossem compatibilizados e as suas informações pudessem ser transferidas para um único arquivo.

Os valores dos pixels das duas imagens foram transferidos pelo aplicativo para a tabela de atributos do arquivo *shapefile* para posterior aplicação da fórmula de cálculo que envolve a vinculação dos dois valores, imagem 2000 e imagem 2016, simultaneamente. Segue um infográfico da metodologia acima descrita (Figura 6).

Figura 6– Metodologia para a transferência de dados entre as imagens e os arquivos de análise.



Fonte: Silva (2019)

O georreferenciamento dos pixels da imagem 2000 foi utilizado como referência para todo o estudo. Desta forma o posicionamento dos pixels da imagem 2016 foi ajustado pela imagem 2000 de maneira a permitir a transferência dos dados das duas imagens para um único arquivo no formato *shapefile* cuja tabela de atributos recebeu os valores dos pixels das duas imagens e outros dados oriundos dos demais arquivos *shapefile* envolvidos no estudo, como os arquivos de classe de solo e delimitação das regiões geográficas estaduais (IBGE Mesorregiões do Estado de Pernambuco).

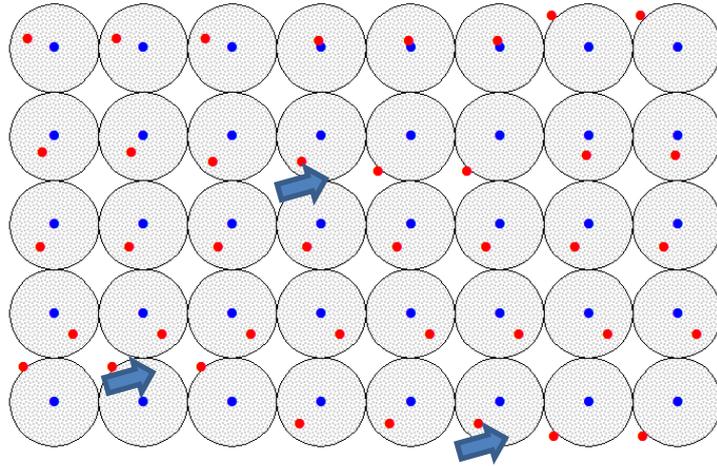
Como as imagens utilizadas foram originárias de estudos distintos e, portanto, apresentavam diferentes desenhos, principalmente, mas bordas e contornos de corpos d'água, foi necessário compatibilizar os desenhos, de forma manual, ajustando as bordas da imagem 2016 para a imagem 2000.

Outro procedimento necessário foi o ajuste de cada pixel da imagem 2016 em relação a imagem 2000, pois apesar das duas imagens possuírem o mesmo georreferenciamento, foram encontrados desvios relativos da posição do centro do pixel entre as imagens, fato que impediu a transferência dos valores das duas imagens de forma direta para um único *shapefile* de pontos, este gerado a partir do centroide dos pixels da imagem 2000.

Assim sendo, foi necessário o uso de um *buffer*, que funcionou como uma tolerância do desvio entre os centroides dos pixels das imagens, para que os dados fossem considerados como similares em sua posição geográfica. O referido *buffer* foi criado com o valor de 900 m² (30 m x 30 m), compatível com o pixel das duas imagens.

A execução da transferência dos dados se deu a partir do CABALA-C, criado na linguagem Visual Basic 6.0, cuja função inicial seria de aplicar a fórmula sobre os dados do arquivo final (ESRI-*shapefile*) de pontos gerados pelo centroide dos pixels da imagem 2000 e que havia recebido, por operação de sobreposição dos centroides da imagem 2016, os valores dos pixels das duas imagens em campos da sua tabela de atributos.

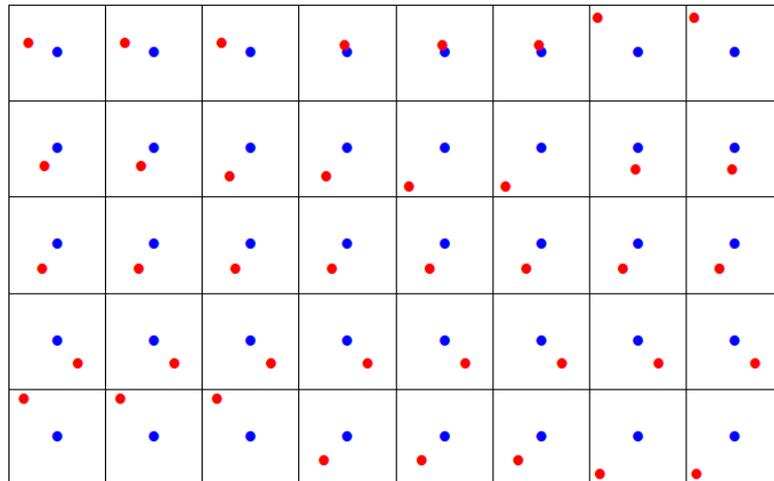
Figura 7– Buffer de forma circular não contínuo.



Fonte: Silva (2019)

Após a conversão dos pixels em pontos, foi observado existência de áreas não cobertas, entre os círculos. Deixando desta forma, que diversos pontos, deixasse de transmitir as informações necessárias para o cálculo das emissões líquidas devido à variação no carbono .

Figura 8– Buffer quadrado.



Fonte: Silva (2019)

Representação do Buffer quadrado (comparação de coordenadas usando uma tolerância), mostrando a compatibilidade de 100% de cobertura.

3.2.3 Utilização do software CABALA-C

Para a utilização do CABALA-C foi preciso seguir algumas etapas. No campo “Tabela de pixels” foi indicado o local do arquivo no formato *.dbf* com as coordenadas geográficas de cada pixel, no campo “Tabela de CSolo do ano inicial da análise” foi indicado a tabela em formato *.dbf* que contém os valores de referência de carbono nos solos. Na sequência, no campo “Tabela do Fc”, foi adicionado a tabela em formato *.dbf* dos valores do fator de alteração de carbono de solo no instante t (IPCC,2003; MCTIC, 2015).

Após a seleção das tabelas, foi informado a área a ser calculada em ha no campo “Área do pixel em ha”. Para este estudo, foi utilizado 0,09 ha devido a resolução espacial do pixel que é de 30 x 30m. No campo “Período da análise em anos”, informar o período a ser analisado.

Com os campos preenchidos, os próximos passos foram: Clicar no botão “Carregar tabelas” e na sequência, clicar no botão “Calcular ES”. O tempo de processamento depende da quantidade de pontos a serem analisadas e da configuração do computador utilizado. Ao final do processamento, o aplicativo gera resultados expressos em toneladas de carbono por hectare, que podem ser usados para os cálculos dos balanços de carbono na área de interesse durante o período indicado.

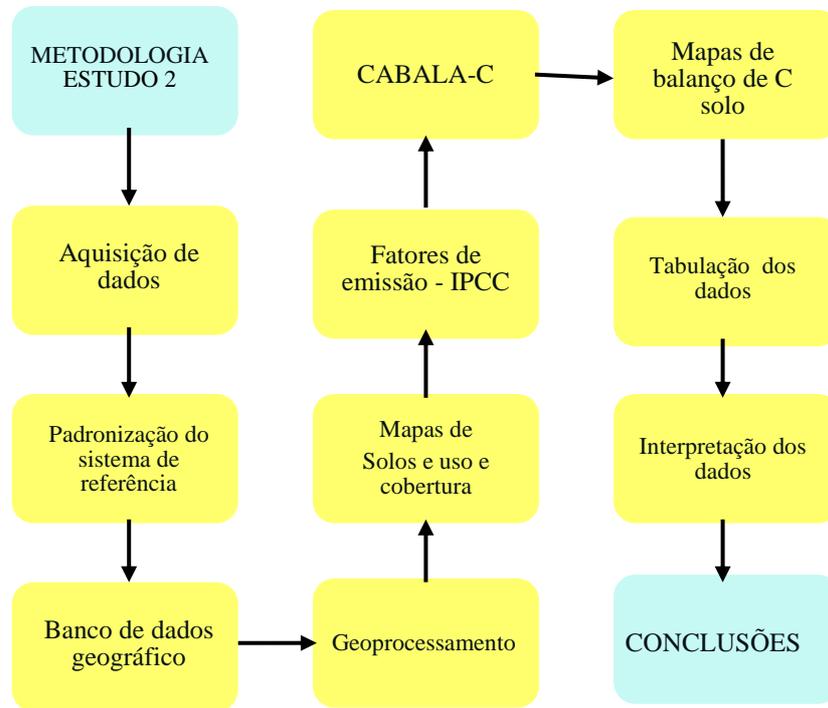
3.3 Estudo 2 – Mapeamento dos balanços de carbono no solo em função da mudança de uso da terra no Bioma Caatinga.

O Estudo 2 consistiu na busca e sistematização dos dados disponíveis sobre estoques e fluxos de carbono no solo, assim como dados sobre a dinâmica da cobertura e uso da terra no Bioma Caatinga, com ênfase em Pernambuco. Após essa etapa, foi utilizada a metodologia proposta pelo IPCC (2003) para calcular o balanço de carbono nos solos de 2000 a 2016.

Posteriormente, buscou-se realizar o mapeamento das estimativas das variações dos estoques de carbono no solo no bioma caatinga em Pernambuco em função da mudança de cobertura e uso da terra.

Seguiu-se o fluxograma da metodologia (Figura 9) com a integração de dados coletados em campo e o uso de geotecnologias, visando facilitar o processo de mapeamento e, para que a metodologia pudesse ser repetida em outros Estados e Biomas.

Figura 9- Fluxograma da metodologia do Estudo 2



Fonte: Silva (2019)

3.3.1 Aquisições de dados

As medidas para estimativa dos estoques de carbono no solo foram oriundas das atividades dos projetos: “Impactos de mudanças climáticas sobre a cobertura e uso da terra em Pernambuco: geração e disponibilização de informações para o subsídio a políticas públicas” e “Consolidação de rede de pesquisa sobre estoques e fluxos de carbono em solos e vegetação na Região Nordeste do Brasil (Biomass Caatinga, Mata Atlântica e Cerrado) e modelagem dos impactos associados às mudanças climáticas e de cobertura e uso”. Após a identificação das classes dos solos, as coletas foram realizadas em trincheiras de 0,7 x 0,7m por 1m de profundidade ou até a camada de impedimento (Figura 10).

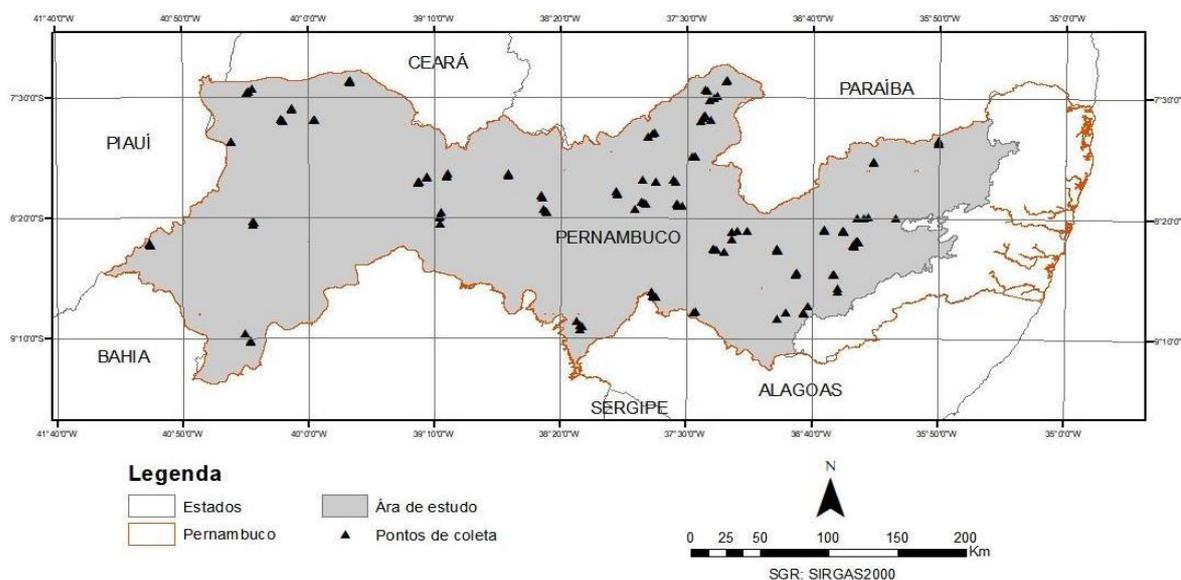
Figura 10- Levantamento de campo em cada ponto amostral.



Fonte: Silva (2019)

A amostragem do solo e as medidas na vegetação foram feitas em 156 pontos (Figura 11), escolhido para representar as principais situações, em função dos tipos de solo e de uso e cobertura em Pernambuco, separados por mesorregião (JESUS 2017; SANTANA 2019). Para cada ponto amostrado em campo foi determinado o estoque de carbono nas camadas de 0-100 ou até a camada de impedimento. Para os dados de C em Cambissolos e Vertissolos, que não tiveram coleta, foram utilizados valores médios de cada classe encontrados na literatura, associada ao uso nos levantamentos de solos realizados por Jacomine (1971), Jacomine (1972), Jacomine *et al.* (1973), Jacomine *et al.* (1975), Jacomine (1976) e FUNCEME (2012). Para as classes de uso e cobertura “Urbana”, “Corpos de água” e “Não observados” os estoques de carbono no solo foram considerados nulos (MCTIC, 2015).

Figura 11 – Distribuição dos Pontos de coleta



Fonte: Silva (2019)

Os valores correlacionados com a classe de solos e o uso e cobertura foram inseridos no mapa gerado e, a partir deste, foi possível realizar as análises espaciais e os cálculos do balanço de carbono na área estudada. Os valores utilizados como referência para o processamento no software foram utilizados de Jesus (2017) e Santana (2019).

3.3.2 Organizações do banco de dados espacial

Os dados espaciais (geodados) foram unificados a partir do Sistema Geodésico de Referência (SGR), de acordo com a resolução 01/2005 do IBGE que define o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000) como o novo sistema oficial para o Brasil (IBGE, 2005). Essa padronização é necessária para que seja possível gerar sobreposição dos geodados em um Sistema de Informações geográficas – SIG.

Um banco de dados geográfico (Geodatabase) foi obtido pela organização dos geodados. Esse banco contém as informações da área de estudo de forma espacializada e georreferenciada, e tem por finalidade armazenar as coordenadas e os atributos quantitativos, sendo utilizado como ponto de partida para a geração dos mapas de estoque e fluxo de carbono no solo e na vegetação.

O Geodatabase consistiu na integração dos seguintes geodados:

- Bioma Caatinga em Pernambuco;
- Limite Estadual;

- Limite das mesorregiões Agreste, Sertão Pernambucano e Sertão do São Francisco;
- Pontos de coleta das amostras em diferentes classes de solo e diferentes tipos de cobertura;
- Classes de solos e;
- Uso e cobertura da terra do bioma Caatinga em 2000 e 2016.

O cruzamento desses planos de informações possibilitou a consulta aos pontos georreferenciados e a identificação se ocorreram ou não mudanças no uso e cobertura da terra no período de interesse.

3.3.3 Aquisição das informações de solo e uso e cobertura das terras na área de estudo.

O Mapa de classes de solos na Escala 1:100000, foi adquirido do ZAPE - Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (SILVA, 2001). A legenda com a nova classificação brasileira de solos foi atualizada de acordo com Jacomine (2013).

Os mapas de solo e de uso e cobertura de terras no bioma Caatinga em Pernambuco foram gerados através da utilização de técnicas de geoprocessamento, seguindo a metodologia proposta na figura 9. Para que fosse possível a comparação entre os planos de informação, foi adotada a escala de mapeamento 1:100.000.

Os mapas de uso e cobertura para os anos 2000 e 2016, foram adquiridos do Projeto de “Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil” (MapBiomias) coleção 2.3, trabalho que visa gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo do Brasil a partir de 1985 até os anos atuais na escala 1:100.000. Para o cálculo o fator de emissão de C, foi feita uma adaptação à metodologia proposta pelo IPCC (2006) visando, relacionar as classes de solos com a mudança de uso e cobertura das terras.

3.3.4 Emissões e remoções relativas à mudança de estoque de carbono no solo.

O cálculo baseou-se no terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa - Relatórios de referência - Setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (MCTIC, 2015). A metodologia para estimativa da variação no carbono no solo tem como referência o valor de carbono médio do solo sob vegetação primária, para cada uma das

associações, solo vegetação descritas na Tabela 1. De acordo com o Guia de Boa Prática para Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (IPCC, 2003), adotou-se que o ganho ou perda de carbono do solo resultante da mudança do uso da terra ocorre durante o período de 20 anos. A estimativa da mudança do estoque de carbono orgânico do solo baseou-se na equação 3.3.3 do Guia de Boa Prática para Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (IPCC, 2003), adaptada para considerar o período T entre os mapas de uso e cobertura das terras:

$$ES_i = A_i \times C_{\text{solo}} (fc(t^o) - fc(t_f)) \times (T/2) / 20$$

Onde:

ES_i: Emissão líquida associada ao polígono i no período T (tC) devido à variação no carbono do solo (tC);

A_i: Área do polígono i (ha);

C_{solo}: Carbono orgânico no solo sob a associação solo-vegetação do polígono (carbono de referência);

fc(t): fator de alteração de carbono de solo no instante t (adimensional).

Os fatores de alteração de carbono do solo foram baseados na tabela 6 do terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa - Relatórios de referência - Setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (MCTIC, 2015), apresentados a seguir na Tabela 1.

Tabela 1: Fatores de alteração do carbono do solo com a mudança do uso da terra, adaptado de MCTIC, (2015).

Uso da terra	Fc	Cod. MapBiomias 2.3	Classes MapBiomias 2.3
FNM – Floresta não manejada	1	3 + 4	Formações Florestais e savânicas (Caatinga Densa)
FM – Floresta manejada	1	3 + 4	Formações Florestais e savânicas (Caatinga Densa)
GNM – Campo não manejado	1	12	Formações Campestres (Caatinga Aberta)
GM – Campo manejado	1	12	Formações Campestres (Caatinga Aberta)
Gsec – Campo secundário	1	12	Formações Campestres (Caatinga Aberta)
AP – Pastagem	0,97	15 -16 - 17	Pastagem
AC – Área agrícola	0,612	18-19-20-21-28	Agricultura
S – Área urbana	0	24	Infraestrutura Urbana

A – Rios e lagos	0	26	Água
Res – Reservatórios	0	26	Água
O - Não observado	0	27	Não observado

Fonte: Silva (2019)

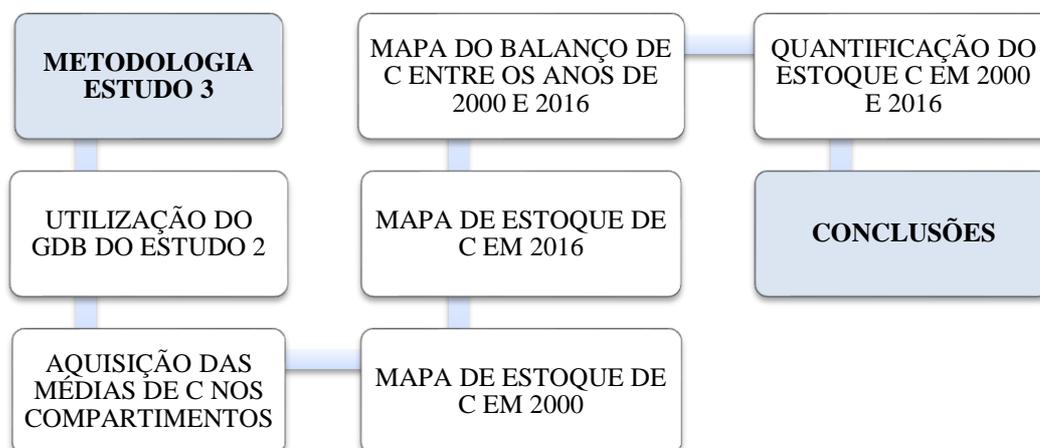
As informações contidas na primeira e segunda coluna da tabela 1, foram extraídas da tabela A1.20 da Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima (MCTIC, 2015) e que, também é uma adaptação baseada no *Good practice Guidance* (IPCC, 2014), tabelas 3.3.4 3.4.5. A terceira e quarta coluna da tabela 1 foram retiradas da coleção 2.3 do projeto MapBiomas, onde “Cod. MapBiomas 2.3” corresponde ao código associado para cada pixel classificado de uso e cobertura .

3.4 Estudo 3. Estimativas das variações dos estoques de carbono no bioma caatinga em Pernambuco em função da mudança de cobertura e uso da terra.

O Estudo 3 consistiu na busca e sistematização dos dados disponíveis sobre estoques de carbono no sistema solo-planta-atmosfera, assim como dados sobre a dinâmica da cobertura e uso da terra no Bioma Caatinga, com ênfase em Pernambuco.

Na figura 12 é apresentado o fluxograma da metodologia que foi seguida para cumprir os objetivos propostos por este estudo através da integração de dados coletados em campo e o uso de geotecnologias, visando facilitar o processo de mapeamento em questão e para que esta metodologia possa ser repetida para outros Estados e Biomas.

Figura 12- Fluxograma da metodologia



Fonte: Silva (2019)

3.3.1 Aquisições de dados

A aquisição das medidas para estimativa dos estoques de carbono necessários para a realização desse estudo foi semelhante ao estudo 2, exceto as informações de vegetação, serapilheira e biomassa subterrânea.

Vegetação: O levantamento do estrato herbáceo foi feito em parcelas de 1 x 1m. O levantamento fitossociológico foi feito em parcela circular com raio de 5m, para relacionar a biomassa aérea com biomassa de raízes. O Levantamento fitossociológico das arbóreas foi realizado em parcelas de 20 x 20m.

Serapilheira: O levantamento da biomassa de serapilheira foi feita em parcela de 1 x 1m.

Biomassa subterrânea: A determinação foi feita em trincheira de 0,7 x 0,7m por 1m de profundidade ou até a camada de impedimento.

Os valores de carbono utilizados como referência foram os encontrados por Albuquerque (2015), Jesus (2017) e Santana (2019), processado no software ArcGIS 10.6.1, correlacionando a classe de solos e o uso e cobertura foram inseridos no mapa gerado, e a partir deste foi possível realizar as análises espaciais e os cálculos de balanço do carbono.

3.3.2 Processamentos dos geodados

Como já havia sido gerado um banco de dados geográfico utilizado no Estudo 2, este, serviu como base para a utilização nesse estudo. Com a união das informações de carbono nos diferentes compartimentos inseridas em um único arquivo foi realizada para facilitar a análise comparativa entre os pixels das imagens e permitir a inclusão de outros dados na análise, e assim foram feitos os mapeamentos dos estoques de C na área estudada.

O arquivo resultante da metodologia utilizada foi um arquivo no formato *shapefile* com uma tabela que tem as informações das coordenadas do ponto, uso do solo no ano 2000, uso do solo no ano 2016, classes de solo, mesorregião e o valor de referência de C nos diversos compartimentos analisados, que neste caso foram somados e inseridos na tabela com o nome de “Ctotal” para o estoque de Carbono em 2000 e 2016, este procedimento foi realizado por transferência de dados entre arquivos *shapefiles*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, os resultados da pesquisa serão apresentados em três etapas, sendo estes divididos em Estudo 1, 2 e 3. A seguir tem-se o detalhamento dos resultados encontrados para cada estudo.

4.1 Estudo 1. Calculadora dos balanços de carbono - CABALA-C.

Na figura 13 é apresentado o CABALA-C, a ferramenta desenvolvida está em processo de registro junto ao INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial), por intermédio da diretoria de inovação da UFPE, para tanto, estamos aguardando o número do registro. Toda metodologia computacional (código fonte) está protegida por lei de propriedade intelectual, uma vez finalizado o processo de registro, o CABALA-C poderá ser utilizado gratuitamente pelos usuários.

O referido aplicativo foi incrementado com uma função simples de comparação das coordenadas das duas imagens, aceitando uma tolerância de $\pm 15\text{m}$ (UTM Norte e Leste) na posição das coordenadas do centroide dos pixels da imagem 2016 em relação à imagem 2000. Os testes usando buffer gerado automaticamente por software de GIS não se mostraram eficientes pois entre 10% e 15% dos pixels se localizavam fora das bordas do círculo das unidades de buffer geradas, ficando os demais pontos entre os círculos dos buffers, gerados ao redor dos centroides. Para atingir 100% dos centroides foi necessário criar a função de “buffer quadrado” que impediu a existência de zonas descobertas entre os buffers circulares.

Como forma de otimizar a transferência entre pontos de diferentes sensores e facilitar o uso da metodologia descrita na tese, todo o procedimento acima citado foi incluído de como um botão no software Cabala – C, assim através de um simples click o usuário poderá corrigir a diferença entre o deslocamento dos pontos.

Figura 13 - "Calculadora dos balanços de carbono - CABALA-C".



Fonte: Silva (2019)

A união das informações de Uso do Solo em um único arquivo, capaz de facilitar a análise comparativa entre os pixels das imagens e permitir a inclusão de outros dados na análise, foi feita através do CABALA-C. Uma vez que a nuvem de pontos foi tratada e transferida para um único arquivo, foi possível a aplicação da fórmula do cálculo do carbono no solo (IPCC,2003 ; MCTIC, 2015), cuja função foi ler da tabela do arquivo vetorial do tipo ponto no formato *Shapefile (.shp)*, as informações de uso nos anos 2000 e 2016, ler a tabela de índices com os valores adequados a cada uso do solo e aplicar a fórmula descrita no item 3.3,4, gravando o resultado do cálculo na tabela de atributos do *Shapefile* de pontos.

Ao utilizar o CABALA- C para o cálculo das emissões líquidas de C no solo, o usuário poderá ajustar o período e a área (pixel) na qual pretende realizar o estudo, com isso, o software poderá ser utilizado independentemente dos documentos cartográficos utilizados para esse estudo.

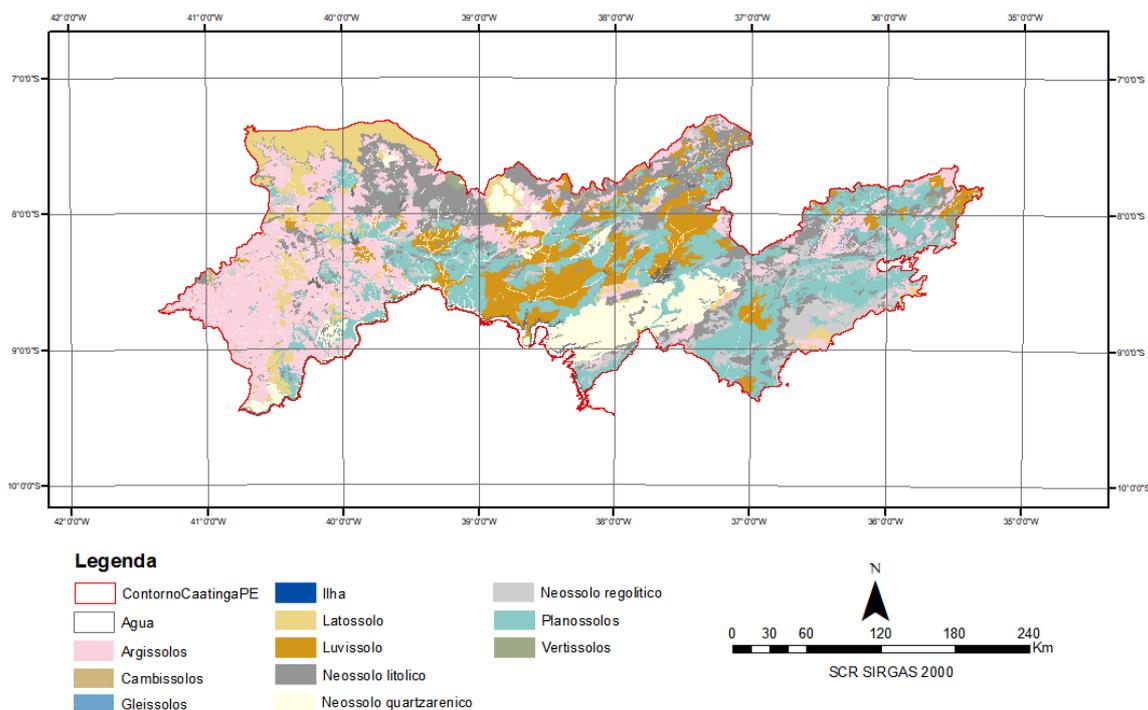
O CABALA-C foi utilizado no desenvolvimento do estudo 2 que apresentará o mapeamento dos balanços de carbono no solo em função da mudança de uso da terra no Bioma Caatinga. Este será abordado na seção 4.2.

4.2 Estudo 2. Mapeamento dos balanços de carbono no solo em função da mudança de uso da terra no Bioma Caatinga.

4.2.1 Mapa de solo e uso e cobertura das terras na área de estudo

No mapa de solo da figura 14, é possível verificar a predominância na área de estudo das classes: Argissolo; Planossolo; Neossolo Quartzarênico, Luvisolo e Latossolo. As demais classes presentes no mapa aparecem em menor representação.

Figura 14 - Mapa de Classes de Solos em Pernambuco

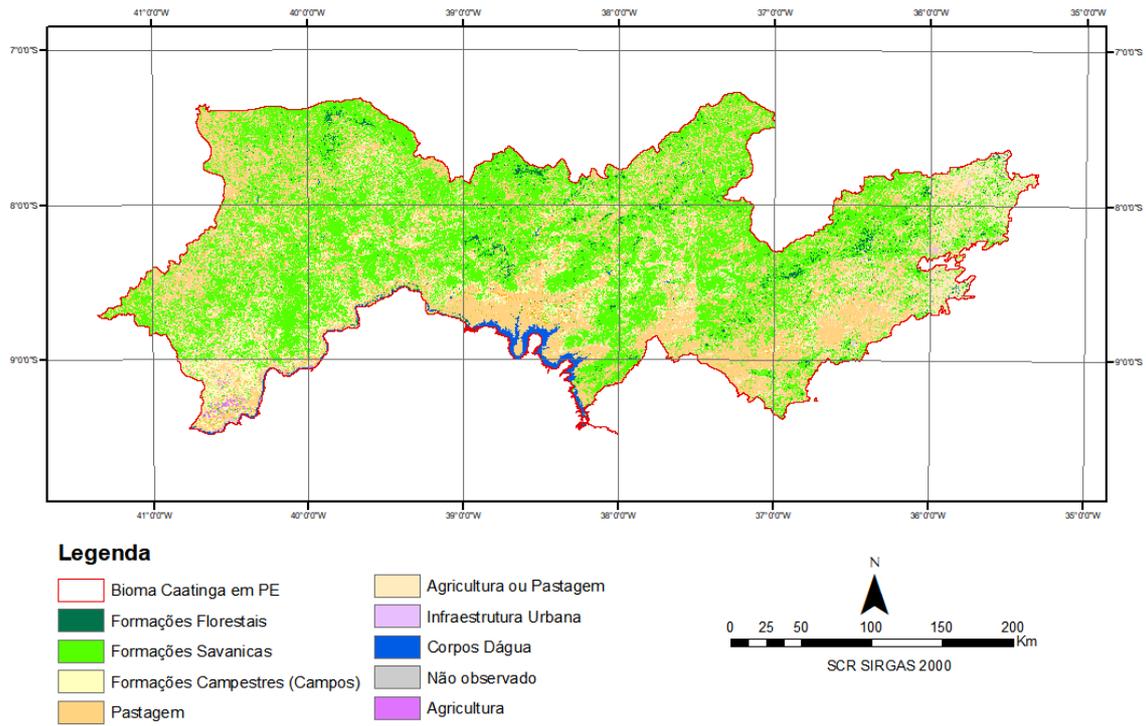


Fonte: Silva (2019)

Comparando as figuras 15 e 16, nota-se uma grande expansão de áreas de agricultura em Petrolina, a mudança do uso e cobertura se deu por aumento das áreas irrigadas e da criação extensiva de forma indiscriminada caprinos e ovinos na região.

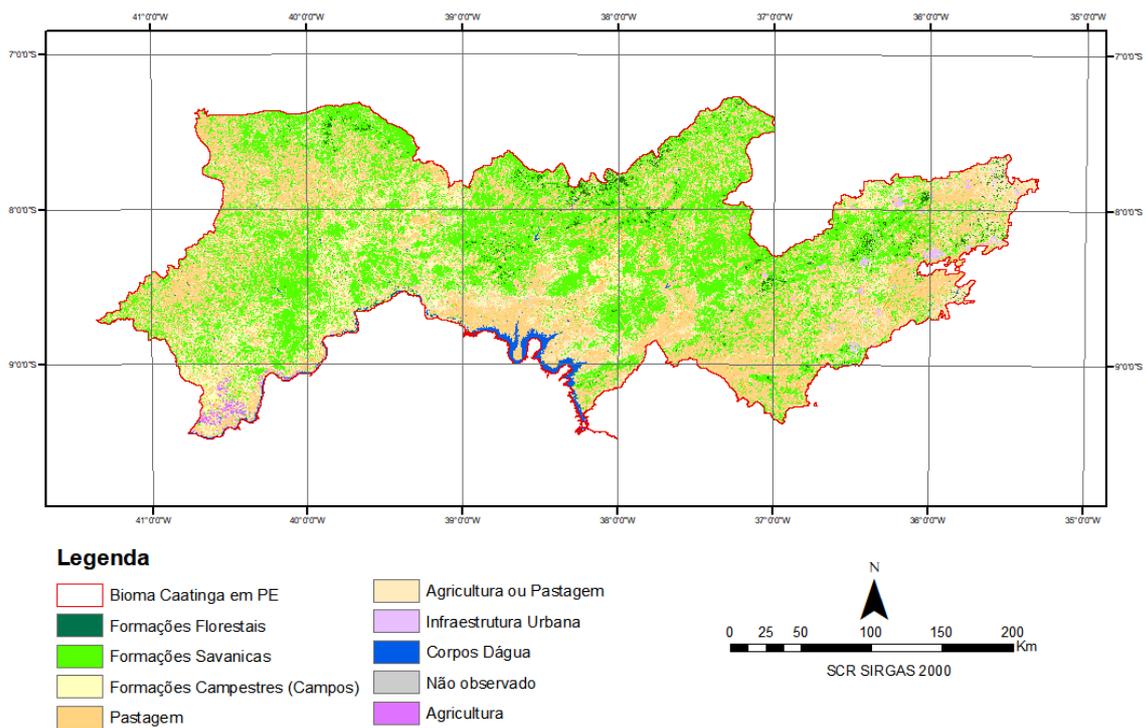
O Polo gessoiro do Estado, demanda uma alta quantidade de lenha gerando uma devastação da vegetação natural, por esse motivo é verificado a redução de vegetação nos municípios de Araripina, Trindade, Ipubi, Bodocó, Ouricuri, Exu, Granito e Parnamirim.

Figura 15- Mapas de uso e cobertura em 2000



Fonte: Silva (2019)

Figura 16 – Mapas de uso e cobertura em 2016



Fonte: Silva (2019)

Ainda em comparação aos mapas gerados, as maiores representações sobre o aumento de área urbana encontram-se nos municípios de Caruaru, Gravatá, Surubim, Toritama, Santa Cruz do Capibaribe, Garanhuns, Belo Jardim e Lajedo.

Tabela 2: Áreas dos diferentes tipos de uso e cobertura no bioma Caatinga.

Uso e cobertura	Área 2000 (km²)	Área 2000 (%)	Área 2016 (km²)	Área 2016 (%)	Mudança (km²)
Formações Savânicas	39148,2	46,9	32257,2	38,6	-6891
Pastagem	24093,7	28,9	26791,8	32,1	2698,1
Agricultura ou Pastagem	11475,3	13,7	12517,8	15,0	1042,5
Formações Campestres (Campos)	6024,9	7,2	8806,3	10,5	2781,4
Formações Florestais	1273,4	1,5	1200,8	1,4	-72,7
Corpos D'Água	1076,1	1,3	1053,0	1,3	-23,1
Agricultura	165,3	0,2	272,5	0,3	107,2
Não observado	158,0	0,2	119,4	0,1	-38,6
Infraestrutura Urbana	93,0	0,1	482,6	0,6	389,6
Total	83507,9	100,0	83501,3	100,0	-

Fonte: Silva (2019)

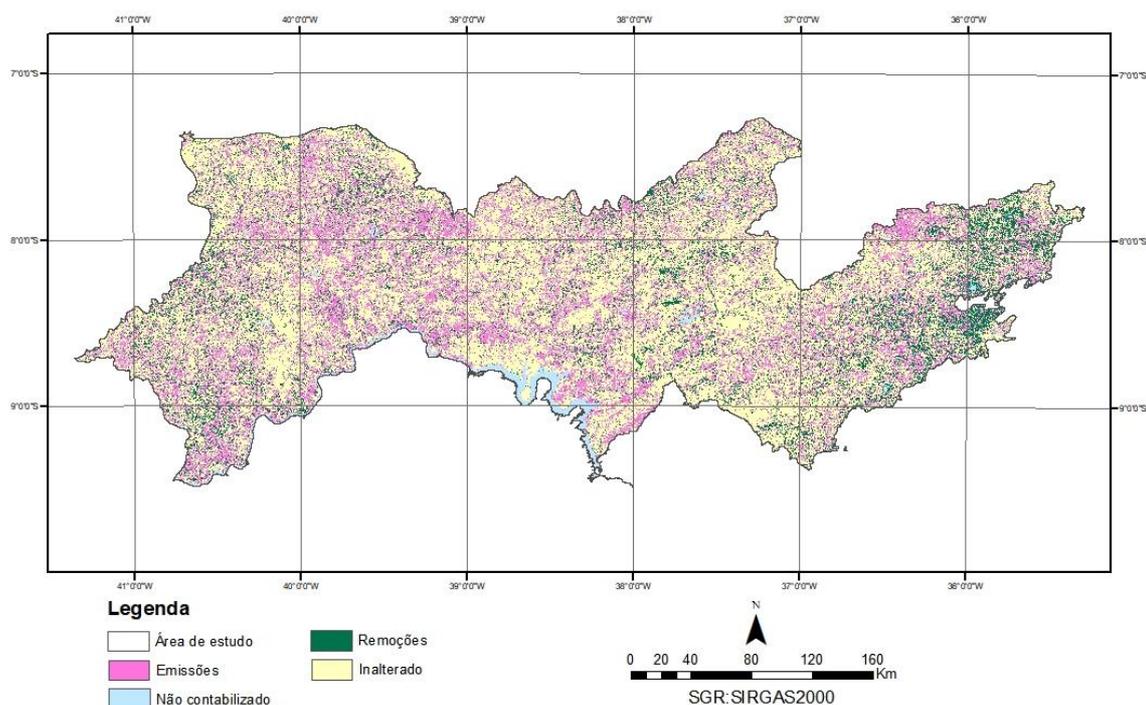
Entre os anos de 2000 e 2016 as pastagens tiveram um crescimento de área de 2698,15 km², as formações campestres (Caatinga aberta) de 2781,37 km² e agricultura ou pastagem de 1042,53 km², enquanto as formações savânicas (Caatinga densa) tiveram diminuição de 6890,99 km². Essas alterações indicam uma diminuição marcante da cobertura florestal na área de estudo, convertida principalmente em pastagens.

A área urbana cresceu significativamente ao decorrer dos dezessete anos, passando de 92,99 km² para 482,61 km², ou seja, um crescimento de 389,62 km², decorrente do aumento populacional mas, principalmente, do intenso processo de urbanização que tem sido observado em todo o país. Outra possibilidade ligada a esse aumento seria considerar algum problema na árvore de decisão do algoritmo utilizado para essa classe, visto que o crescimento parece grande para um período relativamente curto.

4.1.2 Mapa do balanço de carbono no solo entre os anos de 2000 e 2016.

Para o período analisado, é possível identificar através da figura 17 a dispersão das áreas com aumento de C no solo, não contabilizado, perda de C do solo e áreas sem mudança de C do solo.

Figura 17 – Mapa do balanço de carbono no solo entre os anos de 2000 e 2016.



Fonte: Silva (2019)

Analisando o mapa do balanço de carbono no solo entre os anos de 2000 e 2016 apresentado na figura 17, notou-se que na mesorregião do Agreste, mais precisamente nos municípios de Altinho, Agrestina, São Joaquim do Monte, Surubim e Frei Miguelinho, houve um aumento (remoção) de C no solo, esse aumento foi ocasionado pela mudança cobertura que passou de Agricultura em 2000 para áreas de pastagens em 2016. Ainda no Agreste, o município que apresentou as maiores áreas de perda (emissão) de C no solo, foi o município de Santa Cruz do Capibaribe, onde áreas de Caatinga Densa foram convertidas em áreas de Pastagens e ou Agricultura.

Na mesorregião do Sertão Pernambucano, os municípios de Serrita, Salgueiro e Verdejante, foram os municípios que apresentaram as maiores perdas de C no período analisado, ocasionado pela conversão de Caatinga Densa em áreas de Caatinga Aberta e ou Pastagem. No Sertão do São Francisco as maiores perdas de C no solo foram identificadas nos municípios de

Petrolândia, Belém do São Francisco e Petrolina. Em Petrolândia e Belém do São essas perdas, foram ocasionadas pela conversão de áreas de Caatinga Densa para áreas Pastagens e ou Agricultura. Já em Petrolina, as perdas de C foram principalmente pela conversão de área de Caatinga Aberta em áreas de Agricultura

Tabela 3: Balanço de carbono no solo (camada 0-100 cm) em função da mudança de cobertura e uso da terra no Bioma Caatinga em Pernambuco, de 2000 a 2016.

Tipo	ES Total	Área hectares	%
Remoção (aumento de C do solo)	-9.040.877,359	1.115.170,92	13%
Não contabilizado	-	172.910,88	2%
Emissão (perda de C do solo)	45.063.310,46	2.326.448,34	28%
Inalterado (sem mudança de C do solo)	-	4.736.263,95	57%
	Total	8.350.794,09	100%

Fonte: Silva (2019)

O Bioma perdeu no período analisado, cerca 45.063.310 Mg de C, distribuídas em 2.326.448 hectares, que corresponde a 28% da área estudada, esse valor representa em média 19,37 Mg de C perdido por hectare no solo e removeu 9.040.877 Mg de C em 1.115.170 hectares, correspondente a 13%, em média, isso representa 8,11Mg de C por hectare, conforme tabela 4.

De acordo com KABIRI *et al.* (2015), a redução do estoque de C no solo ao longo dos anos, pode ser explicada pela conversão de áreas de floresta nativa em outros usos, uma vez que a conversão destas áreas, contribuem para o declínio da fertilidade natural e do potencial produtivo, acelerando os processos de erosão e desertificação, influenciando diretamente nos teores de matéria orgânica destes solos.

A classe “Inalterado” onde não houve mudança de C do solo em função da mudança de uso e cobertura, apresentou área de 4.736.263 ha sendo esse valor correspondente a 57% do total da área analisada.

As classes de uso e cobertura “Água”, “Área Urbana” e “Não identificado”, foram somadas a classe “Não contabilizado”. No entanto sabe-se que “água” possui valores de C, mas

por não terem sido coletados pontos amostrais para este trabalho, além da escassez de dados na literatura, foi decidido considerar como nulo o estoque de carbono nessas áreas. No entanto, a junção destas classes representa apenas cerca de 2% da área estudada.

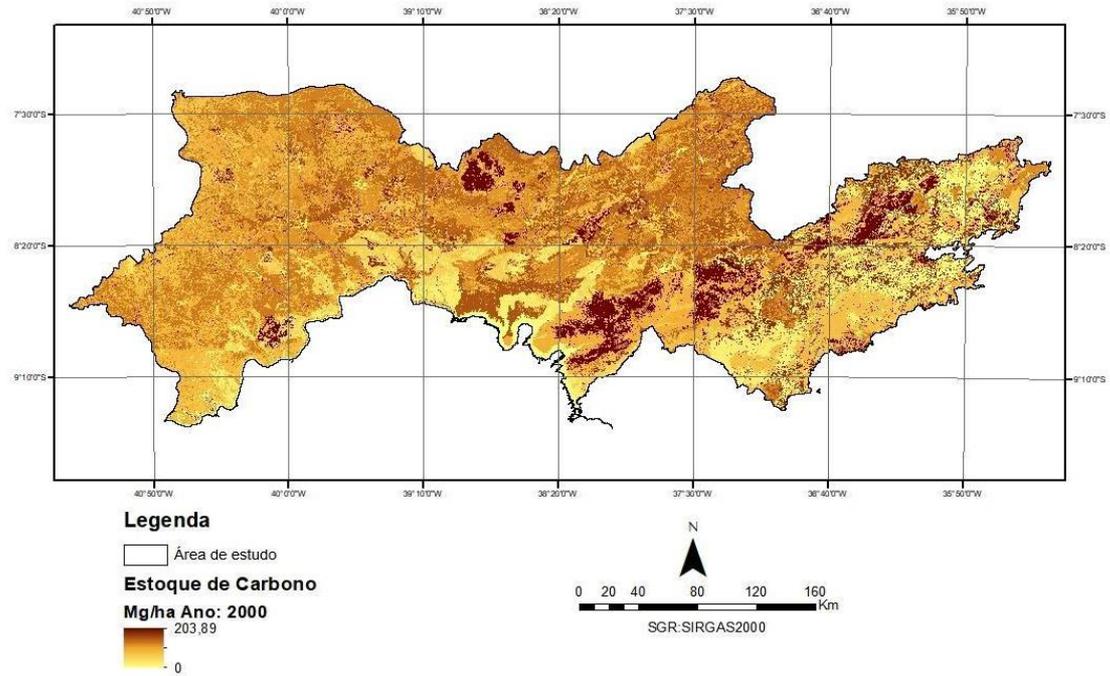
4.3 Estudo 3. Estimativas das variações dos estoques de carbono no bioma caatinga em Pernambuco em função da mudança de cobertura e uso da terra.

Para este estudo, foram calculados os estoques de carbono em Mg ha^{-1} nos compartimentos, solo (camada 0-100) e da vegetação que incluiu os estoques de biomassa aérea, raízes, herbáceas e serapilheira.

4.3.1 Quantificação do estoque total de C em diferentes compartimentos sob diferentes tipos de uso e cobertura no bioma Caatinga

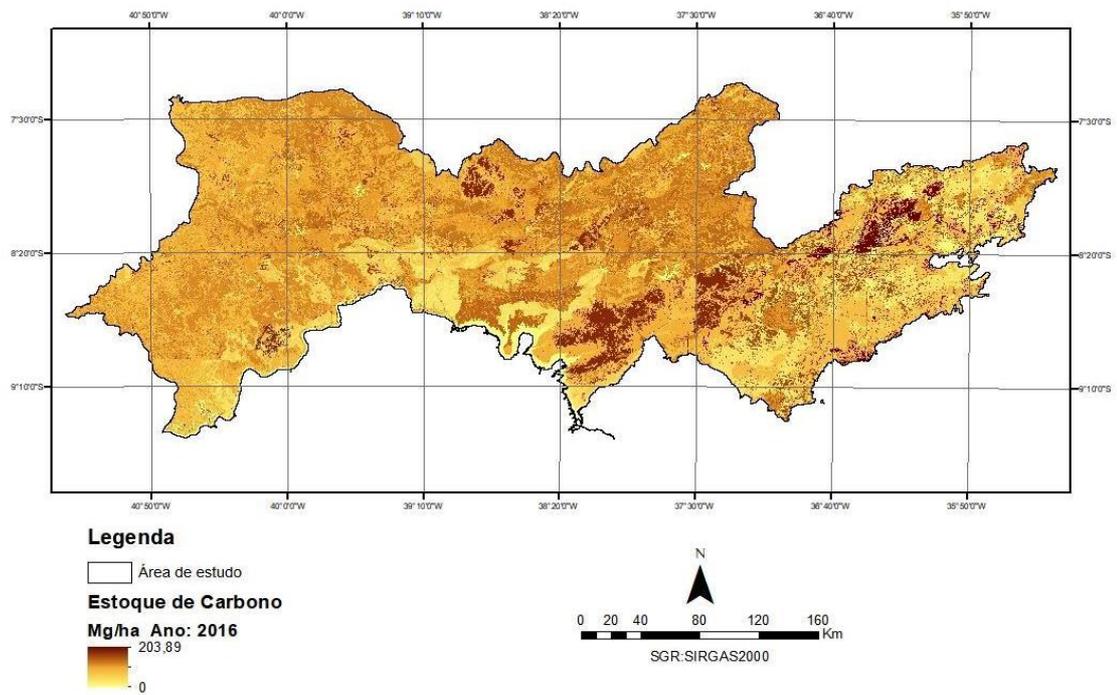
Os Mapas dos estoques de C do solo e da vegetação foram calculados para os anos de 2000 (Figura 18) e para 2016 (Figura 19), onde é observada a distribuição dos estoques em Mg C ha^{-1} nos compartimentos dos solos, biomassa aérea, biomassa de raízes, herbáceas e serapilheira. Estes foram classificados em níveis graduais, onde as cores mais claras representam menor concentração de carbono e as cores mais escuras, representam níveis mais altos de carbono.

Figura 18– Mapa do estoque de carbono para o ano de 2000.



Fonte: Silva (2019)

Figura 19- Mapa do estoque de carbono para o ano de 2016.

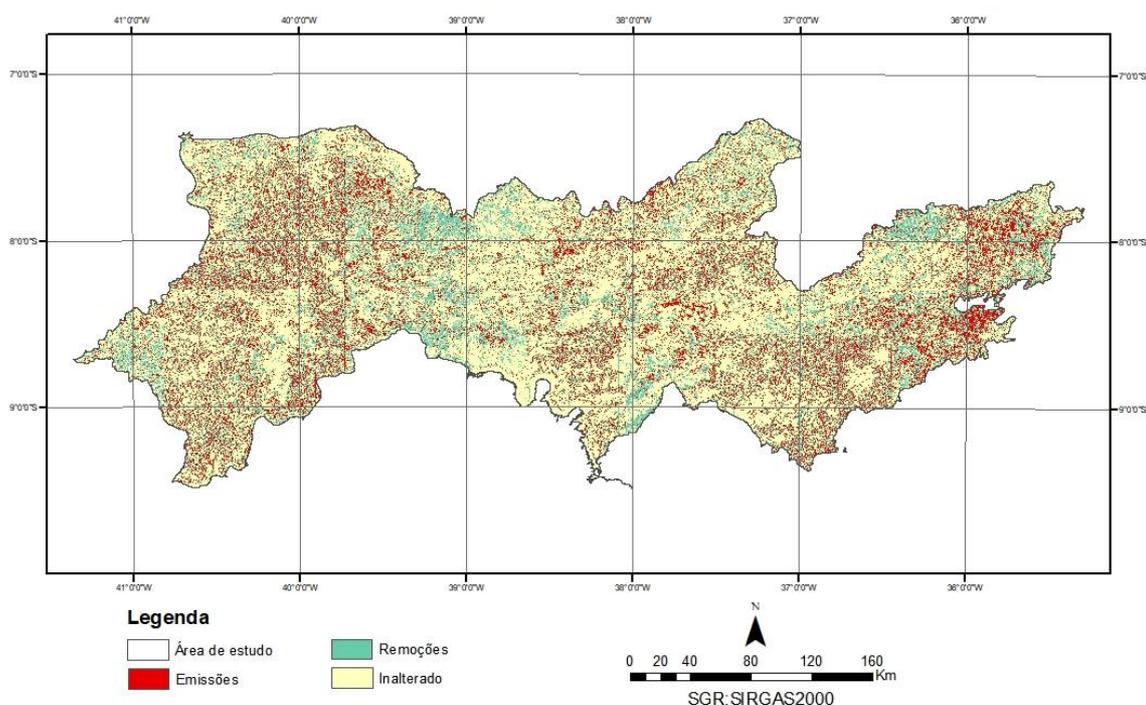


Fonte: Silva (2019)

Comparando os mapas apresentados nas figuras 18 e 19, é observado a diminuição de áreas em cor mais escura relacionada aos valores mais altos de carbono para o ano de 2016. Entre os municípios de maiores mudanças, há de se destacar São José do Belmonte, Tacaratú, Inajá, Ibimirim, Tupanatinga, Sertânia, Belo Jardim e Brejo da Madre de Deus, estes, tiveram uma grande redução do estoque de C em 2016 comparado com o ano 2000.

Analisando o balanço de carbono mostrado na figura 20, é possível verificar que as maiores áreas que perderam carbono entre 2000 e 2016, foram as áreas que compreendem as bacias hidrográficas do Ipanema e Una. Já a área que apresentou aumentos do estoque de carbono no período analisado foi principalmente a área da bacia do Rio Terra Nova.

Figura 20- Mapa do balanço de carbono entre os anos de 2000 e 2016.



Fonte: Silva (2019)

Na tabela 4 é possível analisar a diferença quantitativa entre os estoques totais de carbono nos compartimentos dos solos, biomassa aérea, biomassa de raízes, herbáceas e serapilheira, apresentando uma redução significativa em comparação ao ano de 2000 para o ano de 2016.

Tabela 4: Quantificação do estoque total de C em diferentes compartimentos sob diferentes tipos de uso e cobertura no bioma Caatinga.

Estoque total em Mg C		
2000	2016	Emissões
9.200.055.162,30	8.908.738.486,03	291.316.676,28

Fonte: Silva (2019)

A redução de áreas florestais provocou fortes declínios no armazenamento de carbono. Segundo Araújo Filho (2018), a recuperação deste carbono perdido leva pelo menos seis décadas, tempo necessário para que os estoques de C fiquem semelhantes aos das florestas que não foram cortadas. Mesmo para alcançar a recuperação de 50% seriam necessários pelo menos 33 anos entre as campanhas de corte.

De acordo com Sampaio; Costa (2011), a queda vem da derrubada e queima da vegetação de caatinga para a formação de roçados e pastos e a recuperação da vegetação nativa em áreas nas quais estas atividades foram descontinuadas. Os dois processos têm ocorrido simultaneamente na região. Neste contexto, a direção do balanço, ganho ou perda, é definido por qual deles predomine.

Na área do Bioma Caatinga em Pernambuco foram emitidos 291.316.676 Mg de C distribuídos em 2.326.448 hectares, esse valor corresponde a 28% da área estudada. Essa perda representa em média 125 Mg de carbono por hectare onde houve emissão. Por outro lado, houve acúmulo de C em 13% da área, distribuídas em 1.115.171 ha. Não houve alteração de C nos compartimentos de solo e vegetação em 59% da área estudada, equivalente a 4.909.174 de hectares distribuídos no bioma na área analisada.

5. CONCLUSÕES

Estudo 1

O CABALA-C, software desenvolvido para o cálculo das emissões líquidas de carbono, mostrou-se eficiente na otimização do processo de comparação de análise espacializada dos fluxos de carbono no solo em series temporais e poderá ser utilizado para estudos futuros no Bioma Caatinga, como em qualquer outro Bioma brasileiro.

Estudo 2

No período analisado com o método utilizado, 28% da área estudada emitiram carbono, ou seja, perderam carbono do solo para a atmosfera. Em contrapartida, neste mesmo período 13% da área estudada estocou mais carbono no solo e 57% permaneceram inalterados. As maiores perdas de C foram observadas nas bacias hidrográficas do Ipanema e do Una e os maiores aumentos na bacia do rio Terra Nova.

Estudo 3

De 2000 a 2016, o balanço de carbono no Bioma Caatinga em Pernambuco, levando em consideração a alteração de C dos estoques de solo e vegetação para a atmosfera, decorrentes das alterações de uso e cobertura da terra, foi responsável pela emissão de 291 milhões Mg de C. No período de estudo, em média, as mudanças de uso e cobertura da terra provocaram emissões de 2 Mg C ha⁻¹ por ano nos solos e vegetação na região semiárida do estado de Pernambuco.

O uso das ferramentas de Geotecnologias teve um papel fundamental neste trabalho, tornando possível os mapeamentos, as análises espaciais e quantitativa dos geodados reunidos para analisar balanço de C em função das interações com os tipos de solo, cobertura e uso da terra nas áreas do bioma Caatinga, em Pernambuco.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Adição de novos perfis no banco de dados geográfico, incluindo amostragens em Vertissolos e Cambissolos, se faz necessária para uma avaliação mais precisa dos estoques de C no Bioma Caatinga.

Para que seja possível a repetição da metodologia utilizada neste estudo para todo o Bioma, é necessária disponibilidade de mapa de classes de solos na escala :1:100.000. Além disso, é importante obter amostras de C em corpos d'água.

Os resultados apresentados neste trabalho, poderão servir de base para a geração de simulações com cenários futuros através da utilização de modelos de simulação biogeoquímica, como o modelo Century. Nas simulações seria possível observar a dinâmica do C diante das práticas usuais de mudanças de uso do solo, como também a comparação do tempo de regeneração de uma Caatinga perturbada ou com sinais de degradação devido a práticas convencionais sucessivas. Assim, as simulações dos fluxos e estoques de C no sistema solo-planta dos agroecossistemas, facilitará o entendimento do funcionamento desses processos de transferências desses elementos para uma possível mitigação dos efeitos de mudança climática com práticas de manejos mais conservacionistas e, conseqüentemente, mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, E. R. G. M. **Biomassa de raízes em áreas com diferentes usos da terra e tipos de solos**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 134, 2015.

ALCOFORADO FILHO, F. G.; SAMPAIO, E. V. S. B.; RODAL, M. J. N. Florística e fitossociologia de um remanescente de vegetação caducifólia arbórea em Caruaru, Pernambuco. **Acta Botânica Brasílica**, v. 17, p. 287-303, 2003.

ALVES, J. J. A.; SOUZA, E. N.; NASCIMENTO, S. S. Núcleos de desertificação no estado da Paraíba. **Revista RA'EGA**, v. 17, p. 139-152, 2009.

ALVES, T.L.B.; AZEVEDO, P.V. Análise da variação espacial e temporal do índice de vegetação e sua relação com parâmetros climáticos na bacia hidrográfica do alto curso do Rio Paraíba, Estado da Paraíba, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, p. 530-553, 2015.

AMORIM, L. B. **Caracterização da serapilheira em caatinga preservada e mudanças no carbono do solo após desmatamento sem queima**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) 2009. 66f. – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

ANDRADE, R. L. DE; SOUTO, J. S., SOUTO, P. C., & BEZERRA, D. M. Deposição de serapilheira em área de Caatinga na RPPN “Fazenda Tamanduá”, Santa Teresinha – PB. **Revista Caatinga**, v. 21, p. 223-230, 2008.

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**, v. 34, p. 935-943, 2010.

AQUINO, D. N. A. **Raleamento da caatinga altera a estrutura do solo, estoque de carbono e caracterização espectral do dossel?** Tese (Doutorado) 2015. 174f. – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

ARAÚJO FILHO, J. A. Caracterização física do Semiárido Nordeste. In: **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. Projeto Dom Helder Câmara, Recife, PE, 2013.

ARAÚJO FILHO, R. N., DOS SANTOS FREIRE, M. B. G., WILCOX, B. P., WEST, J. B., FREIRE, F. J., & MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, 407, p. 210-220, 2018.

ARAÚJO, D. M. B.; ROCHA, W.J.S ; GRILO, C.G. Análise dos Índices de Vegetação EVI e SAVI para o Estudo de Mapeamento de Sequestro de Carbono em Caatinga. In: V Simpósio de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto; III Seminário de Geotecnologias, 2011, Feira de Santana. V Simpósio de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto; III Seminário de Geotecnologias: Geotecnologias e Interdisciplinaridade. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana-BA, v. 5. p. 302-305, 2011.

ARAÚJO, E. L.; SILVA, K. A.; FERRAZ, E. M. N.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, S. I. Diversidade de herbáceas em microhabitats rochoso, plano e ciliar em uma área de caatinga, Caruaru, PE. **Acta Botânica Brasílica**, v. 19, p. 285-294, 2005.

ARAÚJO, K. D., PARENTE, H. N., CORREIA, K. G., DANTAS, R. T., ANDRADE, A. P., JUNIOR, E. P. Liberação de dióxido de carbono (CO₂) em área de caatinga no semi-árido da Paraíba. **Revista Eletrônica do Curso de Geografia**, n. 12, P. 42-53, 2009.

AURINO, A.N.B. **Avaliação dos impactos da extração de lenha sobre a diversidade vegetal no município de Tenório, Seridó Oriental paraibano: uma perspectiva biológica e social.** Dissertação (Mestrado) 2007. 100f. - Programa de pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. João Pessoa, 2007.

BARBOSA, C. C. F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento. São José dos Campos.** (INPE-7115-TDI/667) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) 1997. 152f. - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.

BARBOSA, C. C.; CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S.; CREPANI, E.; NOVO, E. M. L. M.; CORDEIRO, J. P. C. Operadores zonais em álgebra de mapas e sua aplicação a zoneamento ecológico-econômico. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Bahia, 1998.

BODEN, T.; ANDRES, B.; MARLAND, G. **Ranking of the World's Countries by 2009 Total CO₂ Emissions from Fossil-fuel Burning, Cement Production, and Gas Flaring.** Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2013.

BONATO, F.; MARTINS, A. K. E.; BARROS, E. K. E. Uso de geotecnologia para a classificação de pastagens em diferentes níveis de degradação da bacia do Ribeirão Matança localizada no Município de Pium-TO. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 791-798, 2007.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. vol. 13. Ed. Elsevier, 2014.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC, Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa - Relatórios de referência - Setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas. 2015. Disponível em: <sirene.mcti.gov.br/publicacoes>. Acesso em: Nov, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**, PAN-BRASIL. Brasília: MMA. 225 p. Edição Comemorativa dos 10 anos da Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca – CCD, 2004.

BRINKMANN, K.; DICKHOEFER, U.; SCHLECHT, E.; BUERKER, A. Quantification of aboveground rangeland productivity and anthropogenic degradation on the Arabian Peninsula using Landsat imagery and field inventory data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, 2011. p. 465-474, 2011.

CABRAL, G. A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. Estrutura Espacial e Biomassa da Parte Aérea em Diferentes Estádios Sucessionais de Caatinga, em Santa Teresinha, Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 3, p. 566-574.: 2013.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; FUCKS, S. D.; CARVALHO, M. S. **Análise espacial e geoprocessamento**. Análise espacial de dados geográficos, v. 2, 2002.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.: 277-289, 2010.

CERQUEIRA, D. B.; FRANCA-ROCHA, W. **Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO2 no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio de Contas-Ba**, XIII SBSR, Florianópolis, Brasil, INPE, p.2413-2419, 2007.

CERRI, C.C.; CERRI, C. E. P. Agricultura e aquecimento global. **Boletim informativo SBCS**, v. 23, p. 40-44, 2007.

CIAIS, P.; SABINE, C.; BALA, G.; BOPP, L.; BROVKIN, V.; CANADELL, J.; JONES, C. Carbon and other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 465-570p. Cambridge University Press, 2014.

COLTRI, P. P., RAMIREZ, G. M., WALTER, M. K. C., ZULLO JUNIOR, J., PINTO, H. S., NASCIMENTO, C. R., GONÇALVES, R. R. DO V. Utilização de índices de vegetação para estimativas não-destrutivas da biomassa, estoque e seqüestro de carbono do cafeeiro Arábica. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 121-128, 2009.

CORRÊA, R. M.; FREIRE, M. B. G. S.; FERREIRA, R. L. C.; FREIRE, F. J.; PESSOA, L. G. M.; MIRANDA, M. A.; MELO, D. V. M. Atributos químicos de solos sob diferentes usos em perímetro irrigado no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.: 305-314, 2009.

COSTA, C. C. A.; SOUZA, A. M.; SILVA, N. F.; VALERA, R. G.C.; DANTAS, I.M. Produção de serapilheira na Caatinga da Floresta Nacional do Açú-RN. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, p. 246-248, 2007.

COSTA, G.S.; ANDRADE, A. G.; FARIA, S. M. Aporte de nutrientes pela serapilheira de *Mimosa Caesalpinifolia* (sabiá) com seis anos de idade. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 3., 1997, Ouro Preto. **Anais...** Viçosa, MG:SOBRADE/UFV, p.344-349, 1997.

COSTA, T. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALES, M. F.; ACCIOLY, L. J. O., ALTHOFF, T. D.; PAREYN, F. G. C., ALBUQUERQUE, E. R. G. M., MENEZES, R. S. C. Root and shoot biomasses in the tropical dry forest of semi-arid Northeast Brazil. **Plant Soil**. 378:p.113-23, 2014.

DANTAS, J.S. **Dinâmica da produção e decomposição de folheto e ciclagem de nutrientes em um ecossistema de caatinga arbórea no agreste da Paraíba**. Areia: UFPB, 53f. Monografia de Graduação em Agronomia. Universidade Federal da Paraíba, 2003.

DAYOCHUM, M. **40 + 8 ferramentas e técnicas de gerenciamento**. 4 ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2012.

DUQUE, G. **Solo e água no polígono das secas**. 5.ed. Mossoró: ESAM, 1980. 273p. (Coleção Mossoroense, 142).

ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10.6.1 Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute; 2018.

FERREIRA, R. L. C.; LIRA-JR, M. A.; ROCHA, M. D.; SANTOS, M. D.; LIRA, M. A.; BARRETO, L. P. Deposição e acúmulo de matéria seca e nutrientes em serapilheira em um bosque de sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.). **Revista Árvore**, v.31, p.7-12, 2007.

FLAUZINO, F. S.; SILVA, M. K. A.; NISHIYAMA, L.; ROSA, R. Geotecnologias aplicadas à gestão dos recursos naturais da bacia hidrográfica do rio Paranaíba no cerrado mineiro. **Sociedade & Natureza**, v. 22, p 75-91, 2010.

FREITAS, A.D.S.; SAMPAIO, E.V.S.B. Fixação biológica do N₂ em leguminosas arbóreas da Paraíba e de Pernambuco. In: Menezes, R.S.C.; Sampaio, E.V.S.B.; Salcedo, I.H. (Eds.) **Fertilidade do solo e produção de biomassa no semi-árido**. Recife: Editora UFPE, p.27-46, 2008.

FUNCEME- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade dos Solos- Mesorregião do Sul Cearense**. 2012. 280p.

GANEM, K.A. **Classificação da cobertura do solo na Caatinga a partir de imagens do Landsat-8 e da ferramenta Google Earth Engine: uma comparação entre dados com e sem correção atmosférica**. Dissertação de Mestrado da UnB, 2017. 202f. Brasília, 2017.

GIONGO, V.; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. M. S.; GAVA, C. A. T. Carbono no sistema solo-planta no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1233-1253, 2011a.

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 5**, Special issue 1, p. 12-20, 2011b.

HE, Y. The effect of precipitation on vegetation cover over three landscape units in a protected semi-arid grassland: Temporal dynamics and suitable climatic index. **Journal of Arid Environments**, v. 109, p. 74-82, 2014.

IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução PR nº 1 de 25 de fevereiro de 2005. **Altera a caracterização do sistema geodésico brasileiro**, Rio de Janeiro (cidade), 2005b. Disponível em: ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de.../rpr_01_25fev2005.pdf. Acesso em: Jan, 2018.

IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry**. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2003.

IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories** Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

IPCC: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects**. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32, 2014.

IPCC: Summary for Policymakers. In: **Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty** [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp, 2018.

JACOMINE P. K. T.; **Levantamento exploratório**-reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte, SUDENE, 1971. V. 1. (Boletim Técnico, 21; DRN-SUDENE. Pedologia, 9).

JACOMINE, P. K. T. **A nova classificação brasileira de solos. Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 5, p. 161-179, 2013.

JACOMINE, P. K. T., Cavalcanti, A. C., Ribeiro, M. R., Montenegro, J. O., Burgos, N., de MÉLO FILHO, H. F. R., & Formiga, R. A. **Levantamento exploratório** – reconhecimento de solos da Margem Esquerda do Rio São Francisco Estado da Bahia. Recife, SUDENE, v.1. (Boletim Técnico, 38. Série Pedologia, 7), 1976.

JACOMINE, P. K. T., CAVALCANTI, A. C., DA SILVEIRA, C. O., & PESSOA, S. C. P., **Levantamento exploratório**-reconhecimento de solos do Estado de Alagoas. Alagoas, SUDENE, v. 1. (Boletim Técnico, 35; Série Recursos de Solos, 5), 1975.

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, v.1. (Boletim Técnico, 26. Série Pedologia, 14), 1973.

JACOMINE, P. K. T.; **Levantamento exploratório** – reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro, SUDENE, v.1. (Boletim Técnico, 15. Série Pedologia, 8), 1972.

JACOMINE, P.K.T. **Solos sob caatinga – características e uso agrícola**. In ALVAREZ, V., FONTES, LEF. and FONTES, MPF. (Eds.). O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e desenvolvimento sustentado. Viçosa: SBCS; UFV-DPS. p. 95-111, 1996.

JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems – a soil science perspective. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, p. 399-417, 2004.

JESUS, K. N. **Estoques e dinâmica do carbono e nitrogênio em solos sob diferentes coberturas e usos da terra em Pernambuco**. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas Nucleares) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 112, 2017.

KABIRI, V.; RAIESI, F.; GHAZAVI, M.A. Six years of different tillage systems affected aggregate-associated SOM in a semi-arid loam soil from Central Iran. **Soil & Tillage Research**, v.154, p.114-125, 2015.

KAUFFMAN, J. B.; SANFORD JÚNIOR, 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.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. As florestas e o carbono. Curitiba, [s.n.], p. 251-264, 2002.

KÖEPPEN, W. Climatologia: Cón un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura económica 478p.1948.

LE MAIRE, G.; MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; GRINAND, C.; HAKAMADA, R.; STAPE, J.L.; LACLAU, J. P. MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.10, p.2613-2625, 2011.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J.M.C. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2004.

LEPRUN, J.C. Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo no nordeste brasileiro (1982-1983). Recife: SUDENE. 290 p. 1983.

LIMA JÚNIOR, C.; GIONGO, V.; TAURA, T. A.; LIMA, R. L. F. A.; MENEZES, R. S. C. Índices de vegetação para estimativa de biomassa e carbono em uma área de caatinga. XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo, Cusco-Perú, 2014.

LIMA, T. A. R. F. **Modelagem do mapeamento das emissões e remoções de carbono decorrentes de mudanças no uso da terra**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 115, 2017.

LU, D. S. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, p. 1297-1328, 2006.

MADINGAN, M.T.; MSRTINKO, J.M.; PARKER, J. **Microbiologia de Brock**. Pearson Education do Brasil. São Paulo, Brasil. 10ª ed. 2004.

MAO, D.; WANG, Z.; LUO, L.; REN, C. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.18, p. 528-553, 2012.

MAPBIOMAS. Disponível em: < <http://mapbiomas.org/>>. Acesso em: Mar, 2018.

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climate Change**, 129, p.103-115, 2015.

MARENGO, JOSÉ A.; ALVES, LINCOLN M.; ALVALA, REGINA C.S.; CUNHA, ANA PAULA; BRITO, SHEILA; MORAES, OSVALDO L.L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 90, p.1973-1985, 2017.

MARTINS, C. M.; GALINDO, I. C. L.; SOUZA, E. A.; POROCA, H. A.; ANDRADE, F. M.; ANDRADE, B.M.T.; ALMEIDA NETO, L. A.; LIMA, J. F. W. F. Fracionamento físico da serapilheira presente em áreas em processo de degradação no semi-árido pernambucano. Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água, 17. 2008, Rio de Janeiro. **Anais**, Rio de Janeiro: UFRRJ/Embrapa Solos/Embrapa Agrobiologia, 2008.

MARTINS, C. R.; PEREIRA, P. A.; LOPES, W. A.; ANDRADE, J. B. Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre. Cadernos temáticos de Química Nova na Escola–Química, **Vida e Ambiente**, p. 28-41, 2003.

MATA, M. V. M.; HOELZEMANN, J. J.; SOUSA NETO, E. R.; AGUIAR, A. P. D.; VIEIRA, R. M. S. P.; OMETTO, J. P. **Emissões de CO₂ Provenientes do Uso e Mudanças no Uso da Terra no Bioma Caatinga no Nordeste Brasileiro**. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 08, n. 01, p. 144-155, 2015.

MELE, J. T. W.; DE MELLO SOUZA, P. P.; JÚNIOR, R. R. N.; BARRELLA, W.; RAMIRES, M. Biomassa vegetal e sequestro de carbono: estudo de caso através de trabalho de campo realizado no município de Santos. **Revista BioScience**, p 52-63, 2015.

MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, AM. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology** (Impresso), v. 72, p. 643-653, 2012.

MORTON, D.C. Forest carbon fluxes: a satellite perspective. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 346–8, 2016.

MOURA, P. M.; ALTHOFF, T. D.; OLIVEIRA, R. A.; SOUTO, J. S.; SOUTO, P. C.; MENEZES, R. S.; SAMPAIO, E. V. Carbon and nutrient fluxes through litterfall at four succession stages of Caatinga dry forest in Northeastern Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, p. 1-14, 2016.

NASCIMENTO, C.R., GONÇALVES, R. R. DO V. Utilização de índices de vegetação para estimativas não-destrutivas da biomassa, estoque e seqüestro de carbono do cafeeiro Arábica. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 121-128, 2009.

NOBRE, P. Mudanças climáticas e desertificação: os desafios para o Estado Brasileiro. In: Lima, R C. C.; Cavalcante, A. M. B.; Marin, A. M. P. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande: INSA-PB, 2011.

NOGUEIRA FERRAZ, E.M.; NOGUEIRA RODAL, M. J.; SAMPAIO, E. V. S. B. Physiognomy and structure of vegetation along an altitudinal gradient in the semi-arid region of northeastern Brazil. **Phytocoenologia**, v. 33, n. 1, p. 71-92, 2003.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; JARENKOV, J. A.; RODAL, M. J. N. Floristic relationships of seasonally dry forests of eastern South America based on tree species distribution pattern. In: PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. **Neotropical savannas and seasonally dry forests**. Boca Raton: CRC Press, p. 159-190, 2006.

OBSERVATÓRIO, DO CLIMA. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG). **SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA**, v. 4, 2016.

PEREIRA, I. M.; ANDRADE, L. A.; BARBOSA, M. R. V.; SAMPAIO, E. V. S.B. Composição florística e análise fitossociológica do componente lenhoso de um remanescente de caatinga no Agreste Paraibano. **Acta Botanica Brasilica**, v. 16, p. 357-369, 2002.

PEREIRA-JUNIOR, L.R.; ANDRADE, E.M.; PALÁCIO, H.A.Q.; RAYMER,P.C.L.; RIBEIRO-FILHO, J.C.; PEREIRA, F.J.S. Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil, **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, p. 32-40, 2016.

QUESADA M, SANCHEZ-AZOFEIFA GA, ALVAREZ-ANˆORVE M, STONERKE, AVILA-CABADILLA L, CALVO-ALVARADO J, CASTILLO A, ESPIˆRITO-SANTO MM, FAGUNDES M, FERNANDES GW, GAMON J, LOPEZARAIZA-MIKEL M, LAWRENCE D, MORELLATO LPC, POWERS JS, NEVES FS, ROSAS-GUERRERO V, SAYAGO R, SANCHEZ- MONTOYA G. Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives. **Forest Ecology and Management**, 258:p.1014–1024, 2009

RAHMAN, A. GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.A.; PRENTISS, D. Modeling distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n.24, p. 579-591, 2001.

REDDY, S.J. Climatic classification: the semi-arid tropics and its environment - a review. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 18, p. 23-847, 1983.

REIS, A. M. S.; ARAÚJO, E. L.; FERRAZ, E. M. N.; MOURA, A. N. Inter-annual variations in the floristic and population structure of an herbaceous community of “caatinga” vegetation in Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 29, p.497-508, 2006.

RIBEIRO, K.; SOUZA-NETO, E. R.; CARVALHO-JUNIOR, J.A.; LIMA, J.R.S.; MENEZES, R.S.C.; DUARTE-NETO, P.J.; GUERRA, G.S.; OMETTO, J.P.H.B. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 1048–1057, 2016.

RIEGELHAUPT, E. M.; PAREYN, F. G. C. A Questão Energética. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. D. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. (Eds.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro**, p. 65-75, 2010.

ROSA, M.R. Comparação e análise de diferentes metodologias de mapeamento da cobertura florestal da Mata Atlântica. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 95, p. 25-34, 2016.

ROSA, R.; BRITO, J. L. S. Introdução ao geoprocessamento. Uberlândia: Universidades Federais de Uberlândia, 1996.

SÁ, I.B.; CORREA, R.C.; SOUZA, R.A.; RICÉ, G.R.; FOTIUS, G.A. Bioma Caatinga: Fatores abióticos. GT Fatores abióticos. **Seminário sobre Avaliação e Identificação de Ações**

Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade do Bioma Caatinga. Petrolina: CPATSA/ EMBRAPA, p. 32, 2000.

SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Matéria orgânica do solo no bioma Caatinga. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, v. 2, p. 419-441, 2008.

SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. In: **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. revisada e atual, Metrópole, Porto Alegre, cap. 22, p. 419 - 441, 2008.

SALES, A. T. **Seedling development of forage species according to seral stage**. 2017. 138 f. Tese (Doutorado em Wildlife, Aquatic, and Wildland Science and Management) – Texas Tech University, Lubbock, 2017.

SAMPAIO, E. V. S. B. Caracterização da caatinga e fatores ambientais que afetam a ecologia das plantas lenhosas. **Ecossistemas brasileiros: manejo e conservação**. Fortaleza, Expressão Gráfica e Editora, p. 129-142, 2003.

SAMPAIO, E. V. S. B. Caracterização do bioma Caatinga. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, p. 29-48, 2010.

SAMPAIO, E. V. S. B. Fitossociologia. In: Sampaio, E. V. S. B.; Mayo, S. J.; Barbos, M. R. V. (Eds.). **Pesquisa Botânica Nordestina: Progresso e Perspectiva**. Recife: Sociedade Botânica do Brasil. p. 203-224.1996.

SAMPAIO, E.V.S.B.; ARAÚJO, M.S.B. Desertificação no Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30. Recife. **Anais...** Recife: Conferências. 2005. 1 CD-ROM. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SAMPAIO, E.V.S.B.; COSTA, T.L. Estoques e fluxos de carbono no semi-árido nordestino: estimativas preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.4, n. 6, p. 1275- 1291, 2011.

SANTANA, J. A. S. **Estrutura fitossociológica, produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes em uma área de Caatinga no Seridó do Rio Grande do Norte**. Tese (Doutorado

em Agronomia –Solos e Nutrição de Plantas) 2005. 184f. – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2005.

SANTANA, M. S.; SAMPAIO, E. V. DE SÁ B.; GIONGO, V.; MENEZES, R. S. C.; JESUS, K. N.; ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; NASCIMENTO, D. M.; PAREYN, F. G. C.; CUNHA, T J. F.; SAMPAIO, R. M. B.; PRIMO, D. C. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. **Geoderma Regional**, p. e00205, 2019.

SANTOS, M.G.; OLIVEIRA, M.T.; FIGUEIREDO, K.V.; FALCA, H.M.; ARRUDA, E.C.P.; ALMEIDA-CORTEZ, J.; SAMPAIO, E.V.S.B.; OMETTO, J.P.H.B.; MENEZES, R.S.C.; OLIVEIRA, A.F.M.; POMPELLI, M.F.; ANTONINO, A.C.D. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? *Theor. Exp. Plant Physiol*, v. 26, p. 83–99, 2014.

SILVA, F.B.R. E; SANTOS, J.C.P; SILVA, A.B.; CAVALCANTI, A.C.; SILVA, F.H.B.B.; BURGOS, N.; PARAHYBA, R. DA B.V.; OLIVEIRA NETO, M.B.; SOUSA NETO, N.C.; ARAÚJO FILHO, J.C.; LOPES, O.F.; LUZ, L.R.P.P.; LEITE, A.P.; SOUZA, L.G.M.C.; SILVA, C.P.; VAREJÃO-SILVA, M.A.; BARROS, A.H.C. **Zoneamento agroecológico do Estado de Pernambuco**. Recife: Embrapa Solos - Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento - UEP Recife; Governo do Estado de Pernambuco (Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária), 2001. CD-Rom. (Embrapa Solos. Documentos n. 35).

SILVA, G.C, SAMPAIO, E.V.S.B. Biomassas de partes aéreas em plantas da caatinga. **Revista Árvore**, v. 32, p.567-575, 2008.

SILVA, J.R.C. Erosão e produtividade do solo no semi-árido. In OLIVEIRA, TS., ROMERO, RE., ASSIS JUNIOR, RN. and SILVA, JRCS. (Eds.). **Agricultura, sustentabilidade e o semiárido**. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Universidade Federal do Ceará. p. 168-213, 2000.

SILVA, R.R.; SANTIAGO, M.T.B.; CANDEIAS, A.L.B.; GURGEL, J.F.; SALES, A.T.; MENEZES, R.S.C. Mapping of regional land-use/land cover distribution according to soil types in the semiarid region of Pernambuco State, Brazil. **Geama**, v. 4, p. 13-18, 2018.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Revista Floresta**, v. 38, p. 185-206, 2008.

SMALL, C. The Landsat ETM+ spectral mixing space. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, p. 1–17, 2004.

SOMMER, R.; DE PAUW, E. Organic carbon in soils of Central Asia – status quo and potentials for sequestration. **Plant Soil**, p. 273–288, 2011.

SOMMER, R.; BOSSIO, D. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. **Journal of environmental management**, v. 144, p. 83-87, 2014.

SOUTO, P. C. **Acumulação e decomposição da serapilheira e distribuição de organismos edáficos em área de caatinga na Paraíba, Brasil**. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) 2006. 150 f. – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2006.

SOUZA JR., C. M.; ROBERTS, D.; COCHRANE, M. A. Combining Spectral and Spatial Information to Map Canopy Damages from Selective Logging and Forest Fires. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, p. 329-343, 2005.

SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. Políticas Públicas, uso do solo e desertificação nos Cariris Velhos (PB/Brasil). **Scripta Nova**, v. 14, v. 311, 2010.

TERRA, L. G.; DE VASCONCELLOS SCHIAVO, B. N.; DE BORBA, W. F.; DUARTE, M. M. Geoprocessamento algébrico utilizado na caracterização da fragilidade ambiental do município de Santiago-RS. **Caminhos de Geografia**, v. 17, p. 167–174, 2016.

TOMLIN, D. **Geographic information systems and Cartographic Modeling**. Prentice Hall, New York, 1990.

TYUKAVINA, A.; HANSEN, M.C.; POTAPOV., P. V.; STEHMAN, S. V.; SMITH-RODRIGUEZ, K.; OKPA, C.; AGUILAR, R. Types and rates of forest disturbance in Brazilian Legal Amazon, 2000–2013. **Science Advances** v. 3, p. 1-15, 2017.

WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite IKONOS II**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) 2003. 120 f. – Universidade Federal do Paraná, 2003.

YU, Chang Man. **Sequestro Florestal do Carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. Annablume. São Paulo, Brasil. 2004, 1ª ed.

ZHU, Z.; WOODCOCK, C.E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 118, p.83-94, 2012.