



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA - CCEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGG**

ELLOISE RACKEL COSTA LOURENÇO

**Emissões de CO₂ em solos do Cariri Paraibano com diferentes usos e
cobertura da terra**

JOÃO PESSOA – PB,

2022

ELLOISE RACKEL COSTA LOURENÇO

**Emissões de CO₂ em solos do Cariri Paraibano com diferentes usos e
cobertura da terra**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal da Paraíba (PPGG/UFPB) como requisito para o título de Doutora em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza

Área de concentração: Território, Trabalho e Ambiente.

Linha de pesquisa: Gestão do Território e Análise Geoambiental.

JOÃO PESSOA-PB,

2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L892e Lourenço, Elloise Rackel Costa.

Emissões de CO₂ em solos do Cariri paraibano com diferentes usos e cobertura da terra / Elloise RackelCosta Lourenço. - João Pessoa, 2022.
164 f. : il.

Orientação: Bartolomeu Israel de Souza.Tese (Doutorado)
- UFPB/CCEN.

1. Cobertura da terra. 2. Caatinga. 3. Emissão decarbono. 4. Ciclo do carbono. 5. Desertificação. I. Souza, Bartolomeu Israel de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 502.5(043)

As aves cantam e encantam
Plantando sementes nas matas
Preservando a natureza
Com valor de ouro e prata.

A tecnologia a cada dia
Tem sucesso garantido
Mas o homem queima as florestas
Tornando-a seu inimigo.

A natureza sem força
Vê seus rios secarem
Pela ação do homem
Impactando céus e mares.”

(Genil Barbosa)

RESUMO

As emissões de dióxido de carbono (CO₂) pelo solo, também referidas como a respiração do solo (RS), é um componente importante do balanço global de carbono. A RS provém da atividade microbiana, da respiração do sistema radicular e da decomposição da matéria orgânica do solo (MOS). Com a modificação dos ecossistemas, particularmente através do desmatamento e das atividades agropecuárias, o constante uso do estoque terrestre de carbono pode acelerar o processo de mudanças na dinâmica climática, causando um aumento na temperatura. Estudos voltados a essa temática são escassos e importantes para o entendimento das mudanças globais, principalmente quando se trata do efluxo de CO₂ do solo nas áreas do bioma Caatinga. Nesse cenário, o trabalho teve como objetivo avaliar o efluxo de CO₂ do solo em áreas com diferentes coberturas da terra (áreas agrícolas, áreas degradadas e áreas preservadas) no bioma Caatinga. O estudo foi conduzido em uma propriedade localizada na Área de Proteção Ambiental (APA) do Cariri, na Fazenda Salambaia, localizada na região geográfica imediata de Campina Grande e nas microrregiões do Cariri Paraibano e de Campina Grande, Estado da Paraíba, Brasil. As atividades dessa pesquisa envolveram o mapeamento do uso da terra e a quantificação das emissões de CO₂, da biomassa, da pluviometria, da umidade e da temperatura do solo em áreas sob diferentes usos e cobertura da terra, utilizando medições *in situ* e técnicas de sensoriamento remoto. Foram coletados dados de emissão de CO₂ pelo método do analisador de gás por absorção no infravermelho (IRGA), de umidade e de temperatura do solo, nas estações seca e chuvosa, durante os anos de 2017 e 2018, em dez pontos com características distintas. Os maiores efluxos de CO₂ ocorreram nas áreas onde há presença de vegetação preservada, menores temperaturas e no período chuvoso. Houve correlação com os tipos de uso da terra, precipitação acumulada, componentes do solo e variações sazonais, mas não foram encontradas correlações com a temperatura e a umidade do solo. Os resultados também identificaram a presença de influxo de CO₂ nas áreas com vegetação degradada, caracterizando uma situação de desertificação nas mesmas.

Palavras-chave: Caatinga; Cobertura da Terra; Emissão de Carbono, ciclo do carbono, desertificação.

ABSTRACT

Soil carbon dioxide (CO₂) emissions, also referred to as soil respiration (SR), is an important component of the global carbon balance. RS comes from microbial activity, root system respiration and soil organic matter (SOM) decomposition. With the modification of ecosystems, particularly through deforestation and agricultural activities, the constant use of terrestrial carbon stock can accelerate the process of changes in climate dynamics, causing an increase in temperature. Studies focused on this theme are scarce and important for understanding global changes, especially when it comes to the efflux of CO₂ from the soil in areas of the Caatinga biome. In this scenario, the study aimed to evaluate the soil CO₂ efflux in areas with different land cover (agricultural areas, degraded areas and preserved areas) in the Caatinga biome. The study was conducted on a property located in the Cariri Environmental Protection Area (APA), at Fazenda Salambaia, located in the immediate geographic region of Campina Grande and in the micro-regions of Cariri Paraibano and Campina Grande, State of Paraíba, Brazil. The activities of this research involved mapping land use and quantifying CO₂ emissions, biomass, rainfall, soil moisture and temperature in areas under different land uses and land cover, using in situ measurements and sensing techniques. remote. CO₂ emission data were collected by the infrared absorption gas analyzer method (IRGA), soil moisture and temperature, in the dry and rainy seasons, during the years 2017 and 2018, at ten points with different characteristics. The largest efflux of CO₂ occurred in areas where there is presence of preserved vegetation, lower temperatures and in the rainy season. There was a correlation with types of land use, accumulated precipitation, soil components and seasonal variations, but no correlations were found with temperature and soil moisture. The results also identified the presence of CO₂ influx in areas with degraded vegetation, characterizing a situation of desertification in them.

Keywords: Caatinga; Land cover; Carbon Emission, carbon cycle, desertification.

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AGB	Biomassa acima do solo
AGC	Carbono acima do solo
Al	Alumínio
APA	Área de Proteção Ambiental
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
C	Carbono
Ca	Cálcio
cm ³	Centímetro cúbico
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ flux	Sequestro de carbono
DOS	<i>Dark Object Subtraction</i>
ECO ₂	Emissão ou efluxo de CO ₂ do solo
ER	Respiração do Ecossistema
ESA	Agência Espacial Europeia
FAPESQ	Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba
F _c	Taxa de efluxo de CO ₂ do solo
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLOVIS	<i>USGS Global Visualization Viewer</i>
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GPP	Produtividade Primária Bruta
GPS	Sistema de Posicionamento Global
ha	Hectares
H + Al	Acidez Potencial

H ₂ O	Água
IA	Índice de Aridez
IAF	Índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>International Panel on Climate Change</i>
IRGA	Analisador de gases infravermelhos
K	Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
LAESA	Laboratório de Estudos do Semiárido
LANDSAT	<i>Land Satellite</i>
MapBiomass	Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil
Mg	Magnésio
mm	Milímetros
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MO	Matéria Orgânica
MODIS	<i>MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
Mol	Massa molar
MOS	Matéria Orgânica do Solo
N	Nitrogênio
Na	Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
NBP	Produção líquida de biomas
NDVI	Índice de Vegetação com Diferença Normativa

NEE	Troca líquida do ecossistema
NEP	Produção líquida ecossistêmica
NIR	Infravermelho Próximo
NPP	Produção Primária Líquida
O ₂	Oxigênio
OCO	<i>Orbiting Carbon Observatory</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
P ₀	Pressão inicial (kPA)
PB	Paraíba
Pg	Pentagrama
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNCD	Plano Nacional de Combate à Desertificação
PPGG	Programa de Pós Graduação em Geografia
ppm	Partes por milhão
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
PRI	Índice de Reflectância Fotoquímica
RS	Respiração do solo
SAVI	Índice de Vegetação Ajustada ao solo
SB	Soma de bases trocáveis
SCP	<i>Semi-Automatic Classification Plugin</i>
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SOC	Carbono Orgânico do Solo

SPA	Solo-Planta-Atmosfera
sPRI	Índice de Reflectância Fotossintético reescalado para valores positivos
SR	Sensoriamento Remoto
ST	Sistema de Taxonomia do Solo
STDF	Floresta tropical sazonalmente seca
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SWIR	Infravermelho de ondas curtas
TerraClass	Sistema de Mapeamento do Uso e Ocupação da Terra
t	Capacidade de Troca Catiônica Efetiva
T	Capacidade de Troca Catiônica Total
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i>
TIR	Infravermelho térmico
TOA	Reflectância do Topo da Atmosfera
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UNFCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
USGS	<i>U.S. Geological Survey</i>
v	Volume (cm ³)
V	Saturação por bases

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Efluxo de CO ₂ no LI8100A.....	76
Equação 2: Brilho do <i>Dark Object</i> (LDO1%).....	80
Equação 3: Bilho do Caminho (L _p).....	81
Equação 4: Reflectância da Superfície da terra (p).....	81
Equação 5: Cálculo e avaliação da precisão (O).....	83
Equação 6: Índice de Vegetação com Diferença Normativa (NDVI).....	83
Equação 7: Índice de Vegetação ajustado ao solo (SAVI).....	84
Equação 8: Índice de Área Foliar (IAF).....	84
Equação 9: Índice de Vegetação Fotossintético (PRI).....	84
Equação 10: Índice de Reflectância Fotossintético reescalado para valores positivos(sPRI).	85
Equação 11: Sequestro de Carbono (CO ₂ flux).....	85
Equação 12: Coeficiente de Pearson (r).	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Delimitação da Caatinga e do Semiárido Brasileiro.....	28
Figura 2: O Ciclo do carbono.....	43
Figura 3: Evolução na quantidade de artigos sobre o efluxo de CO ₂ do solo.....	47
Figura 4: Principais motivadores das emissões de GEE do solo.....	48
Figura 5: Fluxos e estoques de carbono quantificados usando dados e métodos de sensoriamento remoto.....	61
Figura 6: Fluxograma das etapas realizadas nos procedimentos metodológicos.....	64
Figura 7: Localização da Fazenda Salambaia, PB.....	66
Figura 8: Precipitação histórica do município de Cabaceiras.....	67
Figura 9: Pontos de coleta na Fazenda Salambaia e seus diversos usos.....	69
Figura 10: Área agrícola no período seco e período chuvoso.....	71
Figura 11: Área preservada com pouco antropismo no período seco e período chuvoso.....	71
Figura 12: Área degradada no período seco e período chuvoso.....	72
Figura 13: Área preservada no período seco e período chuva.....	73
Figura 14: LI8100A utilizado na medição com a câmara de 20 cm.....	75
Figura 15: Estação Meteorológica Davis Vantage Pro2 na Fazenda Salambaia.....	77
Figura 16: Uso da Terra da área de estudo para o ano de 2017.....	87
Figura 17: Uso da Terra da área de estudo para o ano de 2018.....	88
Figura 18: Reservatório de água da Fazenda Salambaia no ano de 2018.....	89
Figura 19: Mapa de pontos de coletas de perfis de solo na Fazenda Salambaia.....	90
Figura 20: Precipitação mensal da Fazenda Salambaia.....	94
Figura 21: Comportamento mensal da umidade do solo da Fazenda Salambaia.....	95

Figura 22: Comportamento mensal da Temperatura do solo na Fazenda Salambaia.....	96
Figura 23: Comportamento mensal da Temperatura do solo no período chuvoso da Fazenda Salambaia.....	97
Figura 24: Comportamento mensal da Temperatura do solo no período seco da Fazenda Salambaia.....	98
Figura 25: Balanço Hídrico de Thornthwaite y Matter (1957) da Fazenda Salambaia para os anos de 2017 e 2018.....	99
Figura 26: Representação do NDVI para a fazenda Salambaia no ano de 2017 e 2018.....	100
Figura 27: Representação do SAVI para a fazenda Salambaia no ano de 2017 e 2018.....	101
Figura 28: Representação do IAF para a fazenda Salambaia no ano de 2017 e 2018.....	103
Figura 29: Mapa do CO ₂ flux para a fazenda Salambaia no ano de 2017 e 2018.....	104
Figura 30: Variação Temporal do Efluxo de CO ₂ (ECO ₂).....	105
Figura 31: Efluxo de CO ₂ para o período chuvoso (Fevereiro e Maio) de 2017 e 2018.....	107
Figura 32: Efluxo de CO ₂ para o período seco (Agosto e Novembro) de 2017 e 2018.....	110
Figura 33: Respiração do solo para as áreas agrícolas, degradadas e agrícolas.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Unidades principais de tipos de Caatingas existentes no Cariri.....	30
Tabela 2: Solos predominantes da Caatinga e suas características, território e distribuição.....	34
Tabela 3: Fatores que afetam os organismos do solo.....	35
Tabela 4: Características dos satélites Sentinel 2A e 2B e suas respectivas bandas e resoluções.....	55
Tabela 5: Características dos pontos de coleta e descrição da área.....	70
Tabela 6: Imagens selecionadas do Sentinel 2.....	73
Tabela 7: Capacidade de retenção de acordo com a textura da formação superficial.....	78
Tabela 8: Valores de ESUN para o satélite Sentinel 2.....	82
Tabela 9: Classes adotadas para a classificação do uso e cobertura da terra.....	83
Tabela 10: Classificações das correlações.....	86
Tabela 11: Área em km ² , porcentagem e mudança do uso e cobertura da terra.....	89
Tabela 12: Classificação e descrição dos perfis de solos e relação com os pontos de ECO ₂	91
Tabela 13: Frações granulométricas e atributos de fertilidade dos perfis	92
Tabela 14: Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather (1957) para o ano de 2017 e 2018 na Estação Salambaia.....	99
Tabela 15: Efluxo de CO ₂ do solo em diferentes locais de Caatinga.....	106
Tabela 16: Estatística descritiva das propriedades físicas dos perfis no horizonte A.....	111
Tabela 17: Estatísticas descritivas das propriedades químicas dos perfis no horizonte A.....	112
Tabela 18: Correlação entre o efluxo de CO ₂ com as propriedades do solo.....	113
Tabela 19: Valores médios, mínimos, máximos, Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variação(CV) de ECO ₂ por meses de coletas de dados para o ano de 2017.	116
Tabela 20: Valores médios, mínimos, máximos, Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variação(CV) de ECO ₂ por meses de coletas de dados para o ano de 2018.	118
Tabela 21: Correlação entre o efluxo de CO ₂ e os fatores ambientais para as áreas preservadas, degradadas e agrícolas.....	120

Tabela 22: Influxo de CO ₂ na Fazenda Salambaia	121
--	-----

Dedico esta Tese a todos aqueles que produzem Ciência, e em memória a Vovô José e Tio Luizinho que já não se encontram entre nós, onde tive muita sorte em tê-los na minha vida mesmo que por um período de tempo menor que o esperado, como forma de agradecimento ao incentivo que sempre deram a minha educação.

AGRADECIMENTOS

Começo meus agradecimentos parafraseando Raul Seixas: “*Sonho que se sonha só é só um sonho, mas sonho que se sonha junto é realidade...*”. Assim, gostaria de agradecer a todos que participaram não só do meu processo de construção da Tese, mas também de todos os caminhos que fizeram eu chegar até esse momento.

A Deus, por me conceder a vida, saúde e a sabedoria.

Aos meus pais Evaldo e Francicleide; aos meus irmãos Evaldo Filho e Clivia por serem minha base e por me apoiarem incondicionalmente em minhas escolhas.

Ao meu esposo Vinicius, por tudo. Por me incentivar sempre a correr atrás dos meus sonhos, entender minhas ausências e noite mal dormidas. Por ser meu porto seguro mesmo quando eu quis desabar, sempre me motivando e me dando energia para lutar pela nossa família.

Ao meu orientador Prof Dr. Bartolomeu Israel de Souza (Bartô), por todo o apoio nessa pesquisa, pela oportunidade, por compartilhar seus conhecimentos, por toda a paciência, cuidado e carinho que você teve durante todo o meu doutorado. Você é meu maior exemplo do que é ser um professor, pesquisador e orientador. Sem você, essa Tese não teria sido construída e nem executada.

Ao Prof Dr. Alexandre Fonseca D’Andrea, grande exemplo de professor e referência no estudo do efluxo de CO₂, por compartilhar seus conhecimentos com o equipamento, no experimento de campo, além do auxílio no software de processamento dos dados para a condução da pesquisa, nas publicações e por ter aceito participar da banca de avaliação.

Ao Prof Dr Jose João Lelis Leal de Souza (Jota), referência no estudo de solos, por ajudar na interpretação dos dados, nas coletas de solos e nas publicações fruto dessa Tese, além de agradecer a participação na banca de avaliação.

Ao professor Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima, referência no geoprocessamento, por compartilhar seu conhecimento nessa caminhada, por todas as orientações, pelo apoio durante o processo de condução da Tese e na caminhada do conhecimento sobre a ciência geográfica, além da aceitação da participação na banca de avaliação.

Ao professor Dr Thyago de Almeida Silveira, cujas contribuições serão muito valiosas, por ter aceitado o desafio de avaliar este trabalho de Tese.

A Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ), pela concessão da bolsa de doutorado e pelo auxílio financeiro (Termo nº 012/2019) que possibilitou a condução deste estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação da Geografia (PPGG), pela oportunidade e aos coordenadores Carlos Augusto, Eduardo Viana, Marcelo Moura e Jonas Otaviano pelo auxílio durante todo a duração do doutorado.

Aos Professores do PPGG por compartilharem seus conhecimentos que me ajudaram na condução da pesquisa e aos colegas do curso de Doutorado e da Geografia.

A Stanley, por ser meu amigo e companheiro nesse desafio em se fazer ciência com poucos recursos, por todas as conversas e empreitadas que tivemos até conseguirmos a tão sonhada bolsa de doutorado.

Aos colegas do laboratório do LAESA e em especial a Ramon, Einy e Joseilson pelo auxílio tanto na parte teórica como nos experimentos, pela amizade que foi construída e pelo acolhimento para alguém de outra área.

Aos meus colegas que auxiliaram na condução das coletas, Paulo Sérgio, Pedro, Helder, Felipe Farias, Jefferson, Vinicius Genuino, Jonathan e Manoel. Por estarem disponíveis e toparem o desafio de percorrer em curto periodo de tempo, de dia e de noite, a área de estudo.

A Dona Ana e seu Ricardo, proprietários da Fazenda Salambaia pela ajuda, hospitalidade e disponibilidade do local para a condução das coletas, tanto para mim como para meus colegas que auxiliaram na condução de grande parte dessa pesquisa.

Aos familiares e a todos meus amigos, em especial a Gilmara, pela parceria, por sempre estar presente me ajudando, por todo apoio e por contribuir nos meus momentos divertidos.

Agradeço por fim a aqueles que contribuíram indiretamente para minha caminhada chegar até a esse momento.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	22
INTRODUÇÃO.....	23
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
1.1 A CAATINGA - USOS DOS RECURSOS NATURAIS E IMPACTOS AMBIENTAIS.....	27
1.1.1 Relação Solo e Paisagem na Caatinga.....	33
1.1.2 Mudanças Climáticas e Impactos Ambientais causados pela ação antrópica na Caatinga	37
1.2 O CARBONO NO AMBIENTE	41
1.2.1 O ciclo global do carbono	42
1.2.2 Fatores que afetam as emissões de CO ₂ do solo	46
1.3 TÉCNICAS DE ESTUDO DO CO ₂	53
1.3.1 O Sensoriamento Remoto para o Mapeamento Terrestre.....	54
1.3.2 Uso e cobertura da terra e Índices de Vegetação.....	56
1.3.3 Técnicas de Detecção Remota do CO ₂	61
2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	64
2.1 Área de Estudo	66
2.2 Caracterização Ambiental	69
2.3 Instrumentos de Coleta de Dados <i>in situ</i>	75
2.4 Análise Granulométricas e de Fertilidade dos Solos.....	79
2.5 Processamento dos Dados	80
2.5.1 Identificação do Fluxo de CO ₂ no solo com o IRGA (LI8100A)	80
2.5.2 Processamento das Imagens Sentinel 2	80
2.5.2.1 Pré Processamento e Cálculo da reflectância da superfície.....	81

2.5.2.2 Classificação supervisionada.....	83
2.5.3 Índices de Vegetação: NDVI, SAVI e IAF	84
2.5.4 Índice de Vegetação Fotossintético (PRI)	85
2.5.5 Índice de Reflectância Fotossintético reescalado para valores positivos (sPRI).....	86
2.5.6 Sequestro de Carbono (CO ₂ flux).....	86
2.6 Análises Estatísticas	86
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
3.1 Caracterização dos tipos de uso e cobertura da terra.....	87
3.2 Propriedades dos solos	90
3.3 Precipitação, umidade e temperatura do solo nos pontos estudados	94
3.4 Análises dos Índices Biofísicos e do CO ₂ flux.....	101
3.5 Variação temporal e diária dos efluxos de CO ₂ em diferentes situações de uso e cobertura da terra	106
3.6 Análises Estatísticas	112
3.7 Efluxos de CO ₂ negativos como identificador de desertificação	123
CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
REFERÊNCIAS	127

APRESENTAÇÃO

A presente tese aborda a temática da emissão do solo de dióxido de carbono (CO₂) em diversos usos e coberturas da Terra e suas relações com diversos parâmetros ambientais em uma área do Cariri Paraibano, no bioma Caatinga.

Do ponto de vista pessoal, eventos climáticos e modificações na dinâmica ambiental sempre se constituíram como temas de meu interesse, devido aos caminhos que esses temas vinham trilhando na pesquisa científica, de forma mais recente, e particularmente aplicada à zona Semiárida Brasileira, em função das diversas lacunas que ainda devem ser preenchidas para a sua compreensão.

Essa Tese que hora apresentamos é fruto de um objeto de pesquisa ainda pouco pesquisado no Brasil, principalmente em regiões de Caatinga. Sendo assim, espero que esse trabalho desperte a vontade de outros pesquisadores conduzirem mais pesquisas em relação a essa temática, dada a sua importância fundamental para uma boa gestão dos recursos naturais.

INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, os assuntos mais comentados frente à ocorrência de fenômenos climáticos extremos são as mudanças climáticas, aquecimento global e os impactos das ações humanas no planeta Terra. As mudanças ocorrem devido a causas naturais (SPIELHAGEN, 2012), dados pelo aumento da radiação solar ou como consequência da ação humana, sendo esses processos regulados pelo efeito estufa e radiação solar incidente. Outro aspecto diretamente relacionado para a compreensão desses processos é o ciclo do carbono (C) e as emissões de dióxido de carbono (CO₂).

O carbono está presente no solo, nas plantas, nos oceanos e na atmosfera. No compartimento terrestre, nota-se o crescimento de modificações nas reservas, por meio das mudanças na cobertura da terra, provocando alterações na dinâmica e no sequestro de carbono. Aspectos como as mudanças de temperatura, a diminuição do carbono presente no solo e a emissão de CO₂ para a atmosfera vêm sendo muito abordados recentemente. Essas alterações estão relacionadas com a diminuição do carbono armazenado no compartimento terrestre e no aumento do carbono armazenado na atmosfera, gerando consequências para os ecossistemas. Segundo dados do *International Panel on Climate Change* (IPCC), a concentração de CO₂ na atmosfera vem aumentando desde o período pré-industrial. Por volta do ano de 1750, havia cerca de 280 partes por milhão de CO₂ na atmosfera, e em 2011 esse valor passou para aproximadamente 392, sendo as maiores emissões registradas entre 2000 e 2010 (IPCC, 2014).

A quantificação dos fluxos e dos estoques de carbono (C) dos ecossistemas é essencial para melhor entender o ciclo global do carbono (XIAO et al., 2019). No ciclo do carbono é muito importante avaliar as reservas existentes. Dentre essas reservas terrestres de C, grande parte estão na matéria orgânica do solo, que apresenta cerca de duas vezes o encontrado na atmosfera, sendo a maioria encontrada em solo com florestas (DIXON et al., 1994). Assim, esses ambientes constituem-se como sumidouro ou fontes de carbono, a depender dos mecanismos de preservação da MOS ou perda pela respiração. Além do carbono estocado, sabe-se que grande parte dele é emitido a partir do sistema solo-planta-atmosfera (SPA) devido à umidade e às temperaturas elevadas.

A emissão de CO₂ a partir da superfície do solo, que representa o efluxo (ECO₂) ou respiração do solo, é a soma de processos que incluem a respiração das raízes e a atividade microbiana (FRANK et al., 2006; FERREIRA et al., 2018). O ECO₂ é um componente importante do balanço global de carbono, retornando cerca de 80 x 10⁹ toneladas de C para a atmosfera em cada ano (RAICH et al., 2002). Alguns trabalhos mais recentes estudando o fluxo de CO₂ do solo em diversas partes do mundo (DALAL & ALLEN, 2008; FURTADO NETO et al., 2009; D'ANDREA et al., 2009, 2010, 2011; DENG et al., 2012; VALENTINI et al., 2015; SOPER et al., 2017; PIRES et al., 2017), especificamente no bioma Caatinga (ARAÚJO et al., 2011a; CORREIA et al., 2015; RIBEIRO et al., 2016; FERREIRA et al., 2018; MENDES, et al., 2020), vêm destacando a importância de se conhecer esse processo para o planeta e para a manutenção dos ecossistemas.

As emissões são intensificadas por meio das ações humanas. Segundo Villela et al. (2012), as emissões de carbono por combustíveis fósseis em países menos desenvolvidos são baixas, sendo que grande parte ocorre pela mudança da cobertura da terra. Logo, há uma relação direta com as características do solo e os usos a que estão submetidos, além da intensidade com que esses processos ocorrem. Silva Junior et al., (2013) afirmam que o tempo de residência do carbono no solo é cinco vezes maior que a vegetação e consequentemente é superior ao da atmosfera. Assim, segundo os mesmos autores o aumento ou diminuição das pequenas quantidades de carbono no solo pode gerar impactos grandes na concentração de CO₂ na atmosfera (SILVA JUNIOR et al., 2013).

Nesse contexto, juntamente com o solo, outro absorvedor de carbono é a vegetação, sendo um grande compartimento para a floresta tropical (SILVA et al., 2014). Elas são importantes elementos para o equilíbrio ecológico, pois servem de abrigo e alimento para a fauna, minimizando a emissão de partículas para a atmosfera. Além disso, a vegetação auxilia na estruturação do solo por meio de adições de matéria orgânica e de exudatos radiculares que estabilizam os agregados do solo (PILLON et al, 2002), sendo assim, é uma fonte emissora e receptora de CO₂, a depender do seu comportamento.

A região Semiárida Brasileira, dominada pela vegetação de Caatinga, vem passando historicamente por processos de degradação, particularmente relacionados à retirada maciça da cobertura vegetal, que tem atingido todo o sistema, devido a mudança de uso e cobertura

da terra (SOUZA, et al., 2006). Essa região, marcada por extremos climáticos como a seca, requer ações efetivas para que os impactos sejam mitigados. A Caatinga é o bioma mais representativo do Semiárido Brasileiro, distribuída geograficamente e unicamente no território brasileiro, onde apresenta paisagens únicas, clima diferenciado, endemismo e espécies resilientes (SOUZA, 2008). Assim, mesmo tendo sido um dos biomas mais ameaçados, devido as centenas de anos de uso inadequado e insustentável dos solos e dos recursos naturais, ele é o mais negligenciado dos biomas brasileiros (SANTOS, 2015), sendo um dos mais vulneráveis as alterações climáticas (MAGRIN et al., 2014).

Diante dessas colocações iniciais, a pergunta que norteia este trabalho é: quais são os efluxos de CO₂ e os impactos das alterações no comportamento de uma área Semiárida, em diferentes formas de uso e cobertura da terra?

Foi constatado que a região Semiárida Nordestina é pouco estudada no que se refere a diversos fatores climáticos e principalmente em relação ao carbono, tanto em relação aos fluxos como aos estoques (MENEZES et al., 2012; RIBEIRO, 2017; FERREIRA et al., 2018). Notou-se a predominância de estimativas generalistas e estudos em macroescala abrangendo todo o território nacional, deixando esse bioma pouco representado em suas características heterogêneas. Essas áreas apresentam mudanças na cobertura da terra, em função da exploração secular da vegetação de forma insustentável, devido a produção baseada na agricultura, na pecuária semiextensiva e na exploração de outros recursos naturais disponíveis.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizado um levantamento bibliográfico no acervo de diferentes instituições para identificar a existência de propostas com a mesma abordagem, constatando-se a escassez de investigações científicas voltadas ao efluxo de CO₂ na Caatinga, principalmente para a Paraíba, e especificamente, para o Cariri Paraibano. Ao mesmo tempo, abordagens metodológicas que utilizam concomitantemente técnicas com medições de efluxo de CO₂ em campo e por sensoriamento remoto, também constituem inovações ainda pouco exploradas em nível mundial e inexistentes para a área estudada.

Com a realização de observações em campo e levantamentos anteriores percebemos a existência de solos e vegetação diferenciada nas áreas próximas aos afloramentos rochosos, sendo em sua grande maioria espécies arbóreo/ arbustivas e com maior presença de

serrapilheira, bem como de matéria orgânica no solo. Essas observações conduziram para a hipótese de que parte da Caatinga é uma importante fonte de acúmulo de carbono e a sua dinâmica está diretamente relacionada aos usos e cobertura da terra, e ao nível de degradação dos solos. Além disso, outra hipótese sugere que as áreas de entorno de afloramento rochoso apresentam elevada dinâmica de efluxo de CO₂, tendo o relevo como fator de importância para a região pois influenciam no acúmulo de umidade, nas menores temperaturas, na maior presença de carbono no solo e no desenvolvimento de espécies diferenciadas, influenciando diretamente no microclima local.

Para responder a indagação e comprovar as hipóteses, objetivou-se avaliar o efluxo de CO₂ do solo em áreas com diferentes usos e cobertura do solo na Caatinga. Os objetivos específicos foram definidos em: reconhecer os diferentes tipos de cobertura vegetal e uso da terra na área de estudo com o uso do sensoriamento remoto; monitorar e medir o efluxo de CO₂ no curto prazo em diferentes situações de cobertura vegetal e uso da terra; relacionar índices biofísicos e dados da dinâmica do CO₂ obtidos em campo, com dados obtidos em imagens de satélite; avaliar a variação espacial e temporal dos efluxos de CO₂ do solo com alguns parâmetros pedoclimáticos (pluviosidade, umidade e temperatura do solo).

O trabalho apresenta inicialmente em uma parte introdutória, onde o leitor é inserido na temática, e em seguida são expostos os objetivos e hipóteses. Em seguida, tem-se a fundamentação teórica, que consiste em três partes. A primeira parte (item 1.1), intitulada “A Caatinga - Usos dos recursos naturais e impactos ambientais” foi criada após um levantamento histórico e conceitual desse bioma, além do uso e consequências dos impactos ambientais nessa região. Na segunda parte (item 1.2), intitulada “O carbono no ambiente” foi feito um levantamento desse composto, sua utilização e relação com os diversos fatores, focando no solo. É importante destacar que esse item também foi subdividido com o propósito de fazer uma revisão bibliográfica e levantamento de diversos estudos que demonstram o comportamento e emissão do CO₂ em diferentes usos da terra. A terceira parte (item 1.3), intitulada “Técnicas de estudo do CO₂”, remete a uma revisão bibliográfica usando de diversas técnicas de levantamento de dados, dentre elas destaca-se a coleta de campo e o uso do sensoriamento aplicado ao uso da terra, vegetação e principalmente o CO₂. Após o referencial teórico temos os procedimentos metodológicos, seguidos dos resultados e discussão, estabelecendo relações com outras pesquisas, comparando com outras áreas e, por

fim, as considerações finais acerca do estudo realizado. Em seguida, também são expostos alguns anexos referentes aos dados trabalhados.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 A CAATINGA - USOS DOS RECURSOS NATURAIS E IMPACTOS AMBIENTAIS

O Brasil é um país com extensa área (8.516.000 km²), tendo dimensões continentais, complexas paisagens, diversidade de espécies, clima e solos. Com essa grande diversidade, apresenta também espécies endêmicas, variedade ecossistêmica e de recursos naturais. O país apresenta 92% do seu espaço total dominado por climas úmidos e subúmidos intertropicais e subtropicais, da Amazônia ao Rio Grande do Sul (AB’SÁBER, 2003).

Nessa diversidade climática existente, podemos encontrar particularidades no território como por exemplo a região Semiárida Brasileira. No processo de divisão do território nacional, o Semiárido vem sendo constantemente caracterizado, abordando o uso do seus recursos naturais e seu processo de ocupação e destacando-se por apresentar um bioma único: a Caatinga.

A Caatinga se destaca principalmente por seu potencial em relação aos outros biomas existentes no Brasil, sendo um bioma de alta intensidade luminosa, temperaturas elevadas e altitudes relativamente baixas, com vegetação adaptada ao clima semiárido. No processo de busca e reconhecimento dessa região, notou-se o crescimento nos últimos anos de pesquisas que demonstram o uso dos seus recursos e os impactos ambientais, como resultado de um processo exploratório de centenas de anos.

Primeiramente habitada por diversos povos indígenas, a Caatinga tem seu nome vinculado a sua aparência na época seca (“Mata branca”), quando a cor clara dos troncos das árvores fica ainda mais evidente, devido a ausência da folhas na maioria das plantas desse bioma.

Abrange cerca de 844.453 km² e cobre cerca de 10% do território nacional (AGUIAR et al., 2016; IBGE, 2004; 2019). Ocorre em 9 estados do Nordeste Brasileiro e em uma porção

do Sudeste (Norte de Minas Gerais). Segundo Cavalcante (2009), a Caatinga estende-se pela totalidade do estado do Ceará (100%) e mais de metade da Bahia (54%), da Paraíba (92%), de Pernambuco (83%), do Piauí (63%) e do Rio Grande do Norte (95%), quase metade de Alagoas (48%) e Sergipe (49%), além de pequenas porções de Minas Gerais (2%) e do Maranhão (1%). Apesar desse números, 80% da áreas do bioma já encontram-se antropizadas e 62% estão susceptíveis a desertificação (MMA, 2002; MMA e SRH-PB, 2007).

No bioma Caatinga o clima predominante é o semiárido quente, sendo que na Paraíba e no sertão da Bahia encontra-se o mais severo, com temperaturas médias muito elevadas, apresentando valores superiores a 25°C. Além de temperaturas altas, apresenta baixa precipitação, variando entre 300 e 800 mm/ano (REBOUÇAS, 1997) e evapotranspiração potencial entre 1500 e 2000 mm/ano (SAMPAIO, 1995; 2010).

A geologia, de acordo com Jacomine (1996) é dividida em: cristalino, cristalino recoberto por materiais mais ou menos arenosos e áreas sedimentares. Assim, origina-se de duas formações geológicas principais: sedimentar, em menor proporção, e cristalina, em grande parte (ARAÚJO FILHO et al., 2010; SILVA et al., 1993). A região possui diferentes tipos de solo, variando de rochosos, pouco profundos e relativamente férteis a arenosos, profundos e pouco férteis (SAMPAIO, 2010).

Ao longo do tempo e do espaço, a disponibilidade hídrica varia de acordo com os diversos solos, relevo, topografia e com a atuação de diversos sistemas meteorológicos. O regime de chuvas, quando analisadas as séries temporais, demonstra uma grande variabilidade pluviométrica no decorrer dos anos, ocorrendo anos de secas prolongadas e trazendo diversos problemas para os habitantes locais (AB'SÁBER, 2003; NIMER, 1972) ocorrendo até nos períodos chuvosos (ALVES, 2009). O fenômeno El Niño, associado aos períodos estiagem, são apontados como influenciadores da variabilidade climática nessa região (BARBOSA; HUETE; BAETHGEN, 2006).

O Semiárido Brasileiro, possui um destaque por sua biodiversidade e quantitativo populacional alto, quando comparado com outras regiões semiáridas do mundo. Como região foi delimitada pela lei 7.827 de 27 de setembro de 1989, sendo que recentemente, no ano de 2017, aprovou-se uma nova delimitação pelas resoluções do Conselho Deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) nº 107, de 27/07/2017 e nº

115, de 23/11/2017, com base nos seguintes critérios: (1) Precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; (2) Índice de Aridez (IA) de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; (3) Percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano (SUDENE, 2017). Com isso foram inclusos 49 novos municípios, sendo deles 2 no Maranhão, estado que não fazia parte das outras delimitações desde sua criação no ano de 1989 (Figura 1).

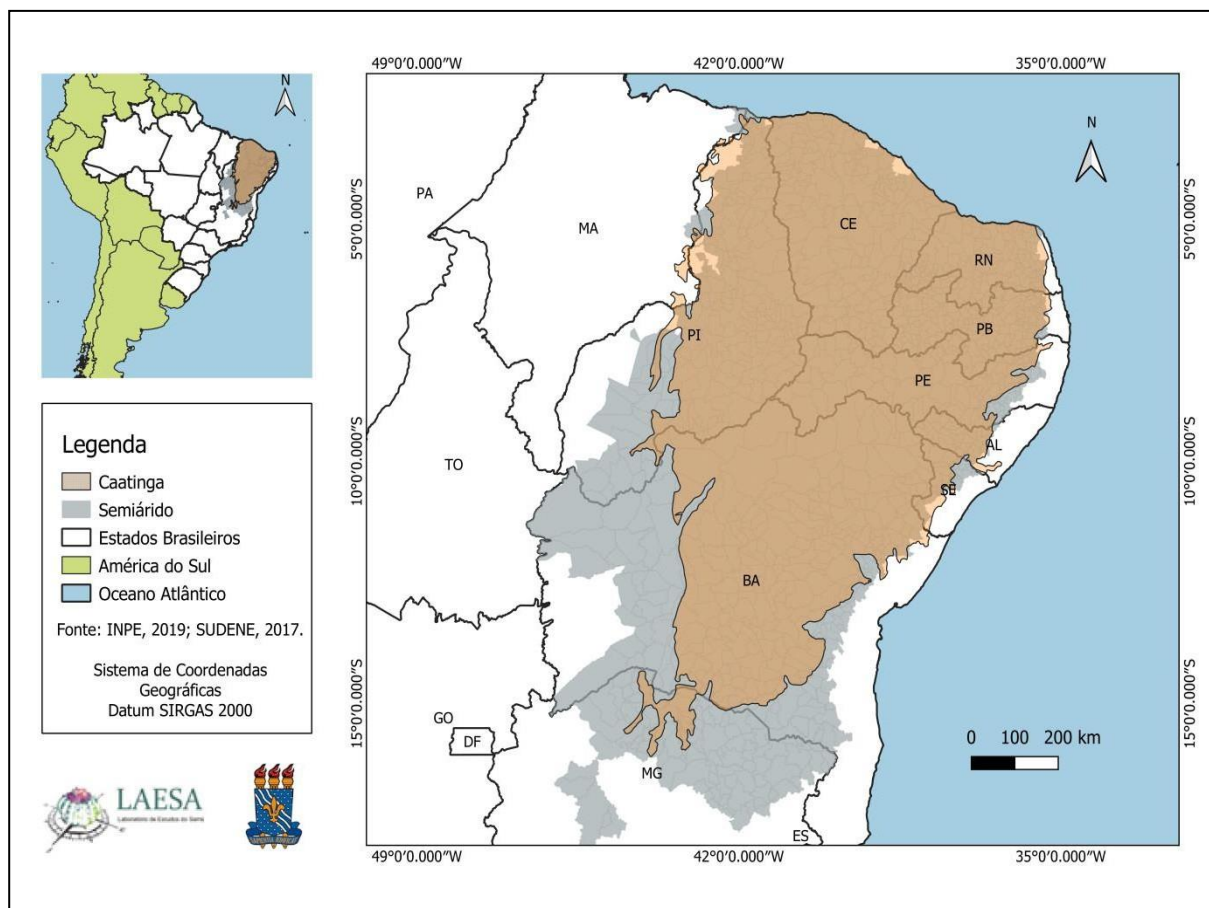


Figura 1: Delimitação da Caatinga e do Semiárido Brasileiro. Fonte: Adaptado de INPE (2019); SUDENE, (2017).

Do ponto de vista vegetal, internacionalmente a Caatinga é classificada como um tipo de floresta sazonalmente seca (OLIVEIRA FILHO et. al, 2006), sendo também denominada como floresta tropical sazonalmente seca (STDF). As STDF equivalem a cerca de 16% da superfície terrestre e desempenham um papel importante no balanço global de CO₂ (SANTOS et al., 2014).

Diversas classificações foram propostas para esse bioma ao longo do tempo, dentre as quais destacamos as de Jacomine et al. (1973; 1996), Andrade-Lima (1981); Veloso, Rangel Filho, Lima (1991) e Andrade et al., (2005). Além disso, é possível citar as classificações dos Manuais Técnicos da Vegetação Brasileira do IBGE (1992; 2012) cuja segunda edição foi criada por meio da união das duas publicações anteriores de Veloso, Rangel Filho, Lima (1991) e IBGE (2012). Dentre as classificações existentes para o Cariri Paraibano, área de estudo deste trabalho, podemos citar a classificação provisória proposta por Alves (2009); Souza, Suertegaray e Lima (2011) e Souza e Souza (2016).

A classificação provisória para a região do Cariri Paraibano de Alves (2009), levou em consideração a fitofisionomia, altura e comunidade-tipo existentes, e é baseada em critérios fisionômico-ecológicos. Essa classificação foi baseada na pressão antrópica considerando o processo de ocupação e os fatores ecológicos. Assim, segundo esse autor, os tipos de Caatinga variaram de 0.30 m a valores maiores que 15 m de altura, sendo classificados como: Caatinga Arbórea Alta, Caatinga Arbórea Média, Caatinga Arbórea Média ou Baixa Densa e/ou Aberta, Caatinga Arbustiva, Caatinga Arbórea Aberta, Caatinga aArbórea Baixa ou Alta, Caatinga Arbustiva Aberta e Aberta Baixa e Floresta Ripárias.

Souza, Suertegaray & Lima (2011) com base em trabalhos de campo e com utilização de imagens de satélite classificaram a Caatinga de acordo com o nível de antropismo e degradação. Assim a Caatinga foi dividida em dois níveis: 1) baixo nível de antropismo e vegetação e 2) alto nível de antropismo e vegetação.

A classe 1 foi composta por áreas mais preservadas devido se localizarem em áreas serranas de difícil acesso, manchas esparsas em vales de rios e áreas com solos mais profundos. A classe 2 foi composta por áreas consideradas desertificadas, apresentando degradação e somente extrato arbustivo e herbáceo tendo as manchas de solo expostos mais presentes que na classe 1. Dependendo do estrato dominante, a Caatinga com baixo nível de antropismo e vegetação foram subdividas em: Arbórea- Arbustiva Fechada e Arbustiva-Arbórea Fechada. A caatinga com alto nível de antropismo e vegetação foi subdivida em: Arbustiva Fechada, Arbustiva Semi-Aberta, Arbustiva Aberta. Essa subdivisão foi sugerida também posteriormente por Souza e Souza (2016).

Souza e Souza (2016), propuseram uma classificação própria levando em consideração as diversas características da caatinga, e as observações e práticas de campo. Assim, foi proposta uma classificação tanto para a Caatinga florestal, com pouca influência antrópica, como para áreas onde ocorre maior intervenção humana, não deixando de considerar as áreas desertificadas e com pouca cobertura vegetal conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Unidades principais de tipos de Caatingas existentes no Cariri.

Unidade	Classificação	Localização	Solos	Características
1	Caatinga Arbórea	Predominantemente nas várzeas dos rios, zonas serranas e no entorno de alguns afloramentos rochosos mais expressivos (lajedos)	Neossolo Flúvico, Neossolo Regolítico e Argissolo vermelho – amarelo	Mata Ciliar, maior umidade e solos mais profundos.
2	Caatinga Arbórea/ Arbustiva Fechada	Próxima às várzeas e nas áreas serranas	Neossolo Regolítico	Predomínio do estrato arbóreo e secundariamente do estrato arbustivo, Solos relativamente profundos, menos umidade que a Caatinga Arbórea, pouco usada para pastejo.
3	Arbustivo-Arbórea Fechada	Locais com uma Caatinga secundária, em avançado estágio sucessional.	Luvissolo Crômico e Neossolo Litólico e, em certas áreas, com problema de drenagem e salinidade (Vertissolo e Planossolo Háptico)	Estrato arbustivo dominante sobre o arbóreo, solos menos profundos, maior presença de antropismo comparando com a classificação anterior.
4	Caatinga Arbustiva Fechada	Áreas distantes da várzea	Luvissolo Crômico e Neossolo Litólico	Domínio de arbustos e herbáceas, ainda predomina a presença forte de cobertura vegetal, fase intermediária.
5	Arbustiva Semiaberta e Aberta	Áreas com estágio avançado de degradação	Luvissolo Crômico e Neossolo Litólico	Estágio avançado de degradação, plantas herbáceas dividem espaço com pequenas ilhas de vegetação.

Adaptado de: Souza e Souza (2016).

Nas classificações de Caatinga tem-se um fator influenciador comum para a diferenciação da formação vegetal existente, o antrópico. O fator antrópico conforme vem sendo abordado em diversos trabalhos vem sendo responsável pelo avanço da degradação em ambientes desse bioma, como mostraremos mais adiante.

As plantas da Caatinga são predominantemente caducifólias, cujas folhas caem na estação seca; seu porte é variável, tendo espécies tanto arbóreo-arbustivas quando arbustivas; os arbustos normalmente tortuosos, apresentam caráter xerófilo e suculência, com a presença de espinhos, cactáceas e bromeliáceas (LIMA, 1966). Outra característica é a resistência a deficiência hídrica, podendo suportar a falta de água em grande parte do ano. Segundo Sampaio (2010), a indisponibilidade hídrica não é só limitante, como é extremamente variável no tempo e no espaço, sendo causada pelos sistemas de formação das chuvas, disposição orográfica, escoamento das águas e variabilidade dos solos. Assim, a disponibilidade hídrica e de nutrientes, sobreposta pelo antropismo, define a estrutura da vegetação (SAMPAIO, 2010; OLIVEIRA, DINIZ-FILHO, 2010; VIEIRA et al, 2018).

As características singulares da Caatinga, entre elas, a enorme biodiversidade e a grande heterogeneidade ambiental, impõem a necessidade de geração de formas inéditas de uso e manejo produtivo mais adequado às condições ecológicas do Semiárido Brasileiro (SANTOS et al, 2014).

Atualmente, já foram removidos quase 46% da cobertura vegetal original do bioma (MMA, 2017). A remoção das comunidades vegetais com a finalidade de expansão das pastagens e para produção de lenha e carvão vegetal (PAREYN, 2010), traz um grande impacto para a biodiversidade, isolando em pequenas áreas a comunidade vegetal e comprometendo a sua fixação a longo prazo.

Apesar desses impactos, a Caatinga fornece diversos serviços ecossistêmicos e tem muitas potencialidades, conforme Silva (2013), tais como: plantas medicinais; forrageiras; frutíferas; fontes de óleo, cera e fibra; madeiras; paisagismo; turismo e banco genético. Fica claro que além desses potenciais existe o ecológico e econômico, mas o que se nota é que pouco ainda se conhece sobre a Caatinga, sendo assim necessário diversos estudos para o entendimento da sua complexidade.

1.1.1 Relação Solo e Paisagem na Caatinga

Os solos são resultantes de processos ocorridos no tempo com o relevo, clima, organismos e material de origem (JENNY, 1941), sendo de extrema importância para o desenvolvimento das plantas, oferecendo suporte e água. Sua composição é dada por uma matriz de sólidos que abrigam substâncias orgânicas, microorganismos, gases, água e minerais originados das rochas por meio do intemperismo. O solo desempenha um importante papel no sistema bio-físico-químico para o crescimento das plantas, na ciclagem de nutrientes, no habitat de organismos, no ciclo hidrológico e como modificador da atmosfera.

A paisagem, objeto de estudo da ciência geográfica, segundo Santos (1991) é “tudo aquilo que nós vemos, o que a nossa visão alcança.” (SANTOS 1991, p. 61). A paisagem se configura pela composição de diversos elementos naturais e humanos e é resultado da relação homem/natureza. Assim, em 1997 o geógrafo Milton Santos concebe o conceito de paisagem inserindo a relação homem e natureza:

Paisagem é o conjunto de formas que, num dado momento, exprimem as heranças que representam as sucessivas relações localizadas entre o homem e a natureza (SANTOS, 2002, p. 103).

Diante desse conceito proposto por Milton Santos, a idéia de herança dos antepassados em suas relações sociedade e natureza, constitui-se como parte do entendimento da paisagem. Ab’Sáber (2003) também considera a paisagem como herança, sendo:

[...] herança de processos fisiográficos e biológicos, e patrimônio coletivos dos povos que historicamente as herdaram como território de atuação de suas comunidades (Ab’Sáber 2003, pág. 9).

Nesse sentido, de acordo com a consideração de Ab’Sáber (2003), a paisagem herdada traz maior obrigação e responsabilidade aos povos para manter sua história e o seu equilíbrio. Assim, sugere-se que os estudos das paisagens devem ser realizados de forma que além de compreender a sua dinâmica, seja observada a sua evolução de forma integradora, configurando-se como um espaço em constante evolução.

Sobre as configurações da paisagem, Bertrand (1972) ressalta que se configura como uma entidade global, que possibilita a visão sistêmica numa combinação dinâmica e instável dos elementos físicos, biológicos e antrópicos. Nota-se que a paisagem necessita de uma abordagem onde se leve em conta uma análise integrada da configuração espacial, natural e social.

No contexto anteriormente descrito, diversos registros mostram que as paisagens e os ecossistemas já vinham sendo modificados desde o surgimento das primeiras civilizações (DIAS & MAZETTO, 2014) e, dessa forma, os efeitos da ação humana vêm alterando o ambiente natural de forma profunda, sendo fundamental esse entendimento nos estudos ambientais.

Para entendermos as relações dos solos com a paisagem, devemos refletir sobre os fatores de formação (pedogênese) e os processos que neles ocorrem, afim que se utilize esta combinação como indicador de variabilidade ambiental. Segundo Guerra (2014), esses processos retratam uma variabilidade temporal e espacial significativa, sendo dessa forma importante abordar os solos como sistemas dinâmicos. Os sistemas são movidos devido a um equilíbrio dinâmico e podem ser perturbados com a adição de matéria e energia no sistema, fazendo com que busque novamente um equilíbrio diante dessa modificação.

Utilizando conceitos da análise sistêmica, os solos e paisagens comportam-se como sistemas abertos (STRANHER; STRANHER, 1973; GERRARD, 1992; MORGAN, 2005). Assim, sendo, os solos e as paisagens exigem métodos de mensuração em campo com maior atenção por parte do pesquisador. Segundo Hofthansl et al. (2020), a paisagem inter relaciona os fatores bióticos e abióticos que controlam a disponibilidade de água e de nutrientes garantindo da existência de biodiversidade. Na análise de áreas heterogêneas, como o caso da Caatinga, podemos reconhecer essas diferentes paisagens e os vínculo dos solos com as mesmas.

A Caatinga possui solos variando de acordo com a geologia, altitude, relevo e clima. Em relação aos aspectos geológicos das áreas de ocorrência da Caatinga, Silva et al. (2013) destacam que existem duas formações principais: sedimentar e cristalina. Os solos com material de origem sedimentar apresentam deficiência em cálcio e fósforo, além de serem poucos férteis (MENEZES et al., 2005). Solos advindos de rochas cristalinas, têm no relevo e

no material de origem os principais fatores de formação. Assim, na Caatinga, observa-se predominância de Latossolos, Neossolos, Luvisolos, Argissolos e Planossolos (JACOMINE, 1996; SANTOS et al, 2013; ARAÚJO FILHO et al., 2017). Os solos predominantes foram descritos com suas características, área de ocorrência e distribuição geográfica (tabela 2).

Tabela 2- Solos predominantes da Caatinga e suas características, território e distribuição.

Tipos de Solos	Características	Área de ocorrência (%)	Distribuição na paisagem
Latossolos	Solos profundos, intemperizados, textura média a muito argilosa.	Cerca de 21% da Caatinga	Áreas de Chapadas e zonas restritas dos Tabuleiros costeiros, Bacias Sedimentares e Depressão Sertaneja.
Neossolos	Pouco evoluídos, rasos, eutróficos, arenosos, fertilidade baixa.	Aproximadamente 35% da área	Depressão Sertaneja, Chapadas, Planalto da Borborema, áreas aluviais do rio São Francisco, Jaguaribe e Piranhas-Açu e nas áreas de serra.
Luvisolos	Pouco profundos a rasos, eutróficos, argila de atividade alta e textura muito argilosa.	Cerca de 13% da Caatinga	Depressão sertaneja e Planalto da Borborema. Pouco predomínio nas Bacias Sedimentares.
Argissolos	Profundidade variável, textura variando de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt.	Ocupa cerca de 15% da Caatinga	Tabuleiros costeiros, Depressão Sertaneja, Chapadas e em áreas menores nas Bacias Sedimentares.
Planossolos	Solos desenvolvidos principalmente em depressões com encharcamento e planícies.	Em torno de 10% da Caatinga	Depressão Sertaneja, Planalto da Borborema e de ocorrência nas Bacias Sedimentares.

Fonte: Adaptado de Jacomine (1996); Santos et al., (2013); Santos et al., (2018). Elaborado pela autora

Com grande expressão geográfica na Caatinga, os Neossolos são grupamento de solos pouco evoluídos, apresentando pouco carbono orgânico e com presença dos horizontes A, C ou A, R (ARAÚJO FILHO et al., 2017). Esses solos quando inseridos em ambientes com grandes temperaturas e com uso agrícola intenso, acabam tendo sua fertilidade, naturalmente baixa, ainda mais comprometida. São subdivididos em quatro subordens: Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Regolíticos, Neossolos Litólicos e Neossolos Flúvicos (SANTOS et al., 2013; ARAÚJO FILHO et al., 2017).

Os solos da Caatinga são quimicamente adequados e férteis, entretanto os componentes físicos apresentam fatores condicionantes e pouca vocação agrícola (PEREIRA FILHO & BAKKE, 2010). Segundo Araújo Filho et al. (2017), do ponto de vista químico predominam solos eutróficos em razão do clima semiárido regional e do material de origem.

Os Solos Regolíticos e Litólicos são predominantes nesses ambientes, uma vez que representam 35% das áreas onde ocorre a Caatinga (Jacomine, 1996). Eles possuem entre outras características, reserva baixa de água e matéria orgânica, principalmente quando submetidos ao desmatamento, podendo ocorrer em áreas sujeitas ao processo de desertificação.

A qualidade do solo vem sendo um fator bastante investigado para a sua manutenção e capacidade produtiva, sendo mensurada através de atributos químicos, físicos e biológicos (LISBOA, 2009). Esses atributos também são apontados como fatores que afetam a densidade e a atividade da biomassa microbiana. Segundo Siqueira et al. (1994), os fatores físicos, químicos, e biológicos, além do manejo podem afetar os organismos do solo, conforme mostra a tabela 3.

Tabela 3 - Fatores que afetam os organismos do solo.

Físicos	Temperatura, umidade, aeração, estrutura, viscosidade, tensão osmótica, componente gasosa.
Químicos	Carbono Orgânico, nutrientes, ph, metais pesados, antibióticos, xenobióticos e vitaminas.
Biológicos	Morfologia, fisiologia, genética e reprodução de organismo, interação biológicas, presença de raízes.
Manejos	Fertilizantes, corretivos, preparo do solo, erosão, pesticidas.

Fonte: Siqueira et al. (1994)

Ainda conforme Siqueira et al. (1994), os organismos são tolerantes às altas temperaturas e a acidez do solo, mas ainda pouco se sabe sobre os impactos das alterações ambientais sobre os microorganismos, sendo que muitos aspectos locais são capazes de modificar as características originalmente dominantes, estabelecendo condições microclimáticas que não podem ser desprezadas, particularmente no que diz respeito a dinâmica ambiental de áreas semiáridas, como é o caso da Caatinga, conforme veremos mais adiante.

1.1.2 Mudanças Climáticas e Impactos Ambientais causados pela ação antrópica na Caatinga

A relação homem/natureza vêm sendo abordada em diversos estudos (SMITH, 1987; RIBEIRO, 1991; BECKER, 2006; FIGUEIRÓ, 2015). Ribeiro (1991, p. 30) afirma que “o ambiente natural também recebe intervenção antrópica, ainda que não seja ocupado por qualquer civilização”. É notório o impacto dessas ações no ambiente, interferindo no ciclo natural e causando uma série de impactos, uma vez que a natureza tem um ritmo próprio que não consegue acompanhar a velocidade das relações humanas, especialmente as relações de produção e consumo (TILIO NETO, 2010).

Nota-se que nos últimos anos, devido as mudanças na relações de consumo e uso de recursos, vem ocorrendo diversas mudanças ambientais, trazendo consequências a nível global. Assim, as mudanças climáticas podem ocorrer de forma natural, mas podem ser intensificadas pela ação antrópica, alterando a dinâmica dos ecossistemas, interferindo no ciclo global do carbono (C) e do nitrogênio (N).

Para discutir sobre mudanças climáticas, temos as definições de duas instituições no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU): o *International Panel on Climate Change* (IPCC) e a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC). O IPCC entende que:

Mudança climática se refere a variação estatisticamente significativa nas condições médias do clima ou em sua variabilidade, que persiste por um longo período – geralmente década ou mais. Pode advir de processos naturais externos, ou ainda de mudanças antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso do solo (IPCC, 2001, p. 368, traduzido).

Assim, o IPCC considera a variação média do clima devido a mudanças naturais ou antropogênicas podendo surgir devido a mudanças no uso do solo, tendo sua essência na anormalidade. A UNFCCC afirma, em seu artigo 1:

“Mudança do clima” significa uma mudança de clima que possa ser direta ou indiretamente atribuída à atividade humana que altere a composição da atmosfera mundial e que se some àquela provocada pela variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis (BRASIL, 2004, p. 69).

O IPCC e a UNFCCC entendem que as atividades humanas alteram o clima, provocando mudanças climáticas. Segundo projeções do IPCC, estima-se o para o futuro um aumento de temperatura de 1,8 a 3,6 °C, sendo que nos próximos 100 anos pode ocorrer um aumento de até 2°C, e a concentração de CO₂ estimada em 720 ppm entre os anos de 2090 e 2099 (IPCC, 2007). Essas projeções servem como elementos a serem considerados e diretrizes para o planejamento e ações a serem adotadas por diversos países, principalmente os maiores emissores de CO₂. Devido a isso, tratados são firmados em diversos eventos mundiais sobre o clima e também por meio de acordos internacionais, como na última Conferência Climática da ONU (COP-26), realizada na Escócia, em 31 de outubro de 2021.

Muitas incertezas e divergências são encontradas no meio científico sobre as alterações climáticas, existindo cientistas que não consideram os efeitos da ação antrópica. Entretanto, a maior parte da comunidade científica considera o efeito das ações humanas e a maior intensificação das emissões de gases principalmente desde o século XX.

No caso das regiões de clima seco, devido a sua heterogeneidade e complexidade, muitos anos de dados são necessários para detectar mudanças climáticas (SANTOS et al., 2011). Soper et al. (2017) afirmam que 40% da superfície composta por paisagens áridas e semiáridas são susceptíveis as mudanças globais. Recentemente, o IPCC (2019) publicou um relatório tratando especificamente das mudanças climáticas, degradação do solo, desertificação, segurança alimentar e fluxos de gases do efeito estufa. Esse documento mostra cenários e trata de vários fatores e estudos relacionados com a desertificação, como as mudanças antropogênicas, climáticas, na vegetação, hidrológicas, entre outros. Entretanto, ainda traz diversas incertezas nos dados, deixando muitas lacunas e polêmicas quanto ao seu entendimento, sendo de fundamental importância que se estabeleçam estudos de longo prazo para que se possa avançar sobre esse tema nas regiões com essas características climáticas em todo o mundo.

Especificamente sobre a Caatinga, na literatura é possível encontrar alguns cenários sobre o impacto das mudanças globais sobre as espécies existentes. De acordo com Nobre (2005), as projeções para 2091-2100 mostram que as mudanças climáticas, desertificação e perda de biodiversidade serão significativos nesse bioma. As modificações dos padrões de chuvas e temperatura devido as mudanças climáticas podem intensificar as secas e as

condições meteorológicas extremas em seus diversos ecossistemas, comprometendo as populações humanas que aí vivem (IPCC, 2007).

Ocorrendo também em áreas úmidas, a seca não se limita às terras secas (WILHITE et al., 2014). O impacto da seca (evento climático temporário) prolongada que vem sendo relatado em florestas tropicais e o aumento da mortalidade das espécies arbóreas, são alguns dos fatores a serem observados. Entretanto, foi relatado o aumento de biomassa em algumas regiões secas, inclusive na região do semiárido brasileiro, por DONOHUE et al., (2013). Segundo os mesmos autores esse ganho poderia trazer maiores estoques de carbono. Ainda assim, não foi estabelecido um fator comum devido as diferentes configurações e características do ambiente, necessitando da realização de vários experimentos e com uma boa variabilidade temporal, devido a sua complexidade.

Os impactos ambientais em terras áridas, semi-áridas e sub-úmidas poderão ocasionar a redução ou perda da produtividade biológica, promovendo diversos problemas econômicos para as atividades produtivas e para os recursos naturais da Caatinga. Sabemos que a vegetação é um dos componentes da paisagem mais importantes para a proteção dos solos contra os processos erosivos e que o desmatamento pode causar impacto ao ambiente, através do assoreamento dos rios, da elevação da temperatura e da diminuição do volume hídrico.

Dentre todos os biomas brasileiros, Magrin et al. (2014) afirmam que a Caatinga é o que mais vai sofrer com as mudanças climáticas e o aquecimento global. Estima-se que uma das maiores ameaças será o aumento da aridez (IPCC, 2007), caso medidas eficazes não sejam adotadas (SENA, 2011). Projeções de cenários futuros de mudanças climáticas para o bioma Caatinga e para outras áreas no Nordeste Brasileiro mostram que até 2040 ocorrerá um aumento de 1° C na temperatura e diminuição de 20% do total de chuvas (PBMC, 2014). Segundo Santos et al. (2014), essas projeções podem levar a mudanças de comportamento de algumas espécies e aumento da desertificação em algumas regiões.

As mudanças climáticas promovem alterações substanciais na temperatura que por sua vez desencadeiam uma série de mudanças ambientais, como um maior aquecimento do solo e da vegetação (o que influencia negativamente as espécies vegetais e a fauna), no ciclo hidrológico (o aumento da temperatura intensifica a evaporação da água), na ocorrência e distribuição de chuvas, entre outros. Logo, em regiões que apresentam naturalmente

temperaturas elevadas, devido estarem localizadas em latitudes que recebem intensa radiação ao longo do ano, como é o caso da região semiárida do Nordeste Brasileiro, as mudanças climáticas contribuem consideravelmente para a ocorrência do processo de desertificação.

A desertificação é definida como a degradação da terra nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, resultando de vários fatores, causados por variações climáticas e atividades humanas, sendo que essas últimas dizem respeito, principalmente, ao uso inadequado dos recursos naturais (PAN-BRASIL, 2005). A desertificação vem sendo estudada há muitos anos como um dos mais graves problemas para a humanidade, e influenciam de forma direta e indireta na qualidade de vida das pessoas. É considerada um problema de âmbito mundial, desde a grande seca que afetou o Sahel, de 1968 a 1974, na África, e causou a morte de 200.000 pessoas e inúmeros animais.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) considera as áreas de clima semiárido e subúmido seco do Brasil em risco de desertificação, com o total 980 mil quilômetros quadrados (MMA, 2007). Segundo o Plano Nacional de Combate à Desertificação (PNCD) por meio da resolução nº 238, estabeleceu que grande parte das terras com moderada a muito alta susceptibilidade à desertificação encontram-se nas áreas semiáridas e subúmidas do Nordeste, correspondendo a cerca de 181.000 km², abrangendo, aproximadamente, 20% do semiárido nordestino.

A desertificação provocam problemas sociais e econômicos, impossibilita o desenvolvimento da vegetação e consequentemente afetando a biodiversidade do ambiente. Segundo o IPCC (2019), os fatores que influenciam a desertificação são a variabilidade climática, mudanças climáticas antropogênicas, aumento da temperatura do ar, evapotranspiração e diminuição na precipitação. Segundo o mesmo relatório, tudo isso é impulsionado pelo aumento das terras agrícolas, práticas de gestão de terra insustentáveis, e aumento da pressão pelo crescimento da população e da renda. Assim, nota-se várias propostas para analisar a desertificação, sendo possível desenvolver diferentes métodos baseados em indicadores. Entretanto, segundo Becerril-Pina et al., (2015) muitos desses estudos só usam indicadores estatísticos, sendo insuficiente para analisar um fenômeno dinâmico como a desertificação. Grande parte dos estudos têm se concentrado em utilizar o monitoramento de fatores por meio de amostragem das propriedades do solo, e por meio do

sensoriamento remoto, como forma de monitorar os componentes ambientais, além de áreas que podem estar propensas ao processo de desertificação.

Algumas pesquisas apontam que os fatores que ocasionam a desertificação estão relacionados a salinização dos solos por irrigação, retirada excessiva da vegetação nativa e as queimadas para as pastagens (alterações de uso da terra), causando a diminuição da matéria orgânica presente no solo. No caso das áreas onde ocorrem processos de desertificação, a exploração inadequada em condições semiáridas, levou a uma situação de extrema pobreza, que ocasiona abandono das terras e das raízes culturais em busca de sobrevivência (MARENGUE, 2011). Dessa forma, tem-se a fragilização não só do meio ambiente (urbano ou rural), como também das condições de vida da população.

1.2 O CARBONO NO AMBIENTE

Nos últimos 540 milhões de anos de história da Terra, ocorre uma oscilação entre períodos quentes e frios. Essas mudanças são controladas devido ao equilíbrio entre o efeito estufa e a radiação solar incidente. O efeito estufa tem o efeito de absorver a energia e regular a temperatura do planeta, e dentre os gases que contribuem como efeito estufa, está o dióxido de carbono (CO₂).

A descoberta do CO₂ por Joseph Black em 1754, promoveu o avanço nos conhecimentos sobre o gases respiratórios, sendo ele produzido através do processo de combustão e respiração. O CO₂ funciona como fator de influência para a temperatura do planeta, sendo considerado um gás traço e emitido pelas plantas, solos, animais (incluindo humanos) e oceanos.

Parte da comunidade científica vem focando em projeções das mudanças climáticas em ecossistemas e na mitigação dos efeitos dessa alteração, observando o ciclo do carbono e a influência da concentração de CO₂ nos seus diversos compartimentos. O carbono é constantemente utilizado pelos processos de troca entre seus reservatórios: atmosfera, oceano, combustíveis fósseis e a biosfera, retornando na forma de dióxido de carbono. A importância do CO₂ para o ciclo biológico e para os ecossistemas é bastante destacada na literatura, pois em grandes proporções acelera o processo de aquecimento global, causando um aumento na temperatura pelas ações antrópicas e pela mudança no uso e cobertura da terra.

A partir de diversos estudos que tratam do CO₂, notadamente em ambientes secos, serão apontadas diretrizes para o conhecimento do carbono e do CO₂ considerando os processos de entrada, armazenamento e saída.

1.2.1 O ciclo global do carbono

O carbono é constantemente utilizado nos processos de troca. As plantas e outros seres vivos utilizam o CO₂, e também o devolvem para a atmosfera, através da respiração ou por decomposição. O carbono é mantido em reservas, que podem ser os depósitos de combustíveis fósseis, a atmosfera, a biosfera (vegetação, água, carbono orgânico do solo) e os oceanos. Dentre as reservas de carbono existentes, as formações geológicas (reservatório terrestre) são as maiores, seguido dos oceanos e por último a atmosfera (D'ANDREA, 2004).

Dixon et al. (1994) destacam que grande parte do estoque dos reservatórios terrestres está na matéria orgânica do solo, que apresenta cerca de duas vezes o encontrado na atmosfera, sendo principalmente encontrada em solos com florestas. As maiores reservas de ecossistemas florestais estão nas zonas úmidas quentes e nas florestas boreais, enquanto que em áreas de savanas e desertos são encontrados valores inferiores, 110-117 toneladas C/ha e 35-42 toneladas C/ha, respectivamente (LAL, 2004). Portanto, considera-se que as florestas secas possuem menores estoques de carbono em comparação aos ecossistemas úmidos (BATJES & DIJKSHOORN, 1999; LAL, 2004; ARAUJO et al., 2017). Ainda assim, florestas tropicais secas são uma importante fonte de carbono (HARRIS et al., 2012).

O solo pode ser uma fonte ou sumidouro de CO₂ (XIE et al., 2008; MENDES et al, 2020) e mudanças na sua estrutura podem influenciar nessa função (JUNGKUNST & FIEDLER, 2007). Frank et al. (2006) afirmam que o solo se constitui em um importante reservatório de carbono, tendo o uso da terra e práticas de manejos como definidores do seu estoque e respiração. O balanço dos estoques de carbono no solo constitui em um método indireto de estimativa da perda (efluxo) ou adição (influxo) no sistema solo-atmosfera (JOHNSON, 1995; COSTA et al, 2006).

Grandes quantidades de gases atmosféricos são removidos e adicionados pelo solo, que influenciam no balanço global, tanto de metano quanto do dióxido de carbono (BRADY

& WEIL, 2013). Os processos que condicionam o estoque e emissão de C no solo influenciam significativamente o balanço global do carbono (LAL, 2004; LAL, 2008; XIAO et al., 2019).

O aumento da temperatura do ar devido ao aumento das emissões de GEE e as alterações globais, vêm sendo estimadas em diversos relatórios e pesquisas. Devido ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, o balanço global de carbono começou a ter mais atenção a partir da década de 1970 do século XX (FERREIRA, 2015). O CO₂ atualmente tem sido considerado o principal GEE, e o seu aumento tem sido relatado como o principal vetor das mudanças climáticas (LAL, 2004).

O ciclo do carbono é de fundamental importância para o processo de troca na atmosfera, sendo ele o elemento químico mais abundante entre os elementos dos ciclos biogeoquímicos (FERREIRA, 2011). Os ciclos estão intimamente relacionados com processos geológicos, hidrológicos e biológicos (ZILBERMAN, 1997) e consistem na troca do carbono por diferentes meios em um ecossistema.

O carbono percorre cada reservatório, sendo retirado e depositado em outro. O ciclo do carbono pode ser dividido em ciclo lento (geológico) ou ciclo rápido (biológico), a depender do processo e tempo. O ciclo lento, que ocorre por meio de reações químicas e atividades tectônicas, leva milhares de anos para ocorrer entre rocha, solo, atmosfera e oceano.

O ciclo rápido de carbono (Figura 2) pode ocorrer através de fluxos naturais (números amarelos) e da contribuição humana (números vermelhos) através das formas de vida na Terra, tendo as plantas e o fitoplâncton como seus principais componentes (RIEBEEK, 2011). Além disso, outros componentes podem absorver carbono (números brancos) mostrando assim o movimento do carbono entre o compartimento terrestre, a atmosfera e os oceanos. Esses fluxos podem ser notados em mudanças das estações e por mapas de produção primária líquida. A produção primária líquida (NPP) mostra a quantidade de carbono consumida pelas plantas na terra, sendo um dos principais indicadores da saúde dos ecossistemas (DALMAGO et al., 2008; BAZAME et al., 2019).

Sabendo que o ciclo do carbono pode ser tanto terrestre como marinho, o presente estudo irá abordar somente o terrestre. No ciclo terrestre, podemos destacar como fluxos naturais as entradas e saídas no sistema, representadas pela respiração microbiana e

decomposição, carbono do solo, biomassa vegetal, respiração da planta, emissões humanas e a fotossíntese.

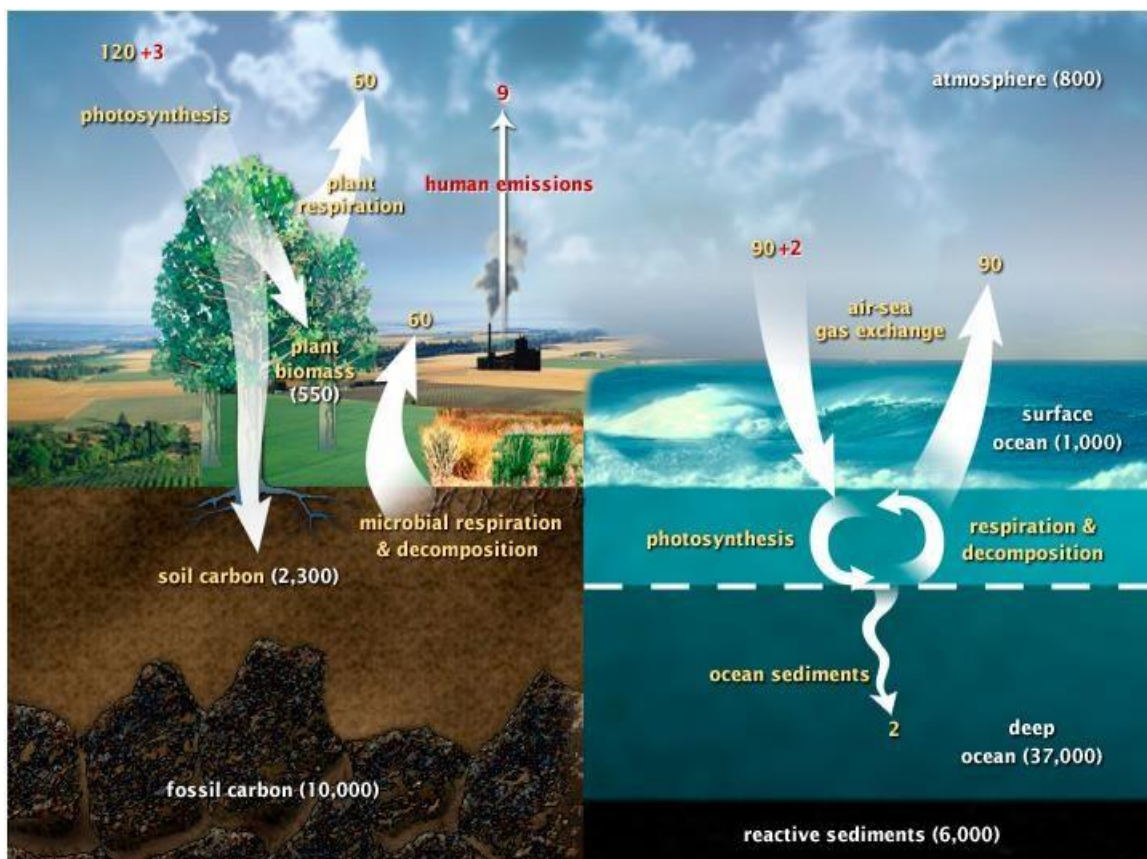


Figura 2: O Ciclo do carbono. Fonte: Riebeek (2011).

Os fluxos de CO₂, segundo Oetel et al (2016) podem ser divididos em 3 tipos: a respiração do ecossistema (ER), a troca líquida do ecossistema (NEE) e a respiração do solo. A troca líquida do ecossistema (NEE) é a diferença entre a fotossíntese e a respiração do ecossistema (OETEL et al., 2016). Segundo Schlesinger & Bernhardt (2013), as plantas estocam cerca de 120 Pg de C durante o ano via atividade fotossintética, porém respiram metade desse montante. O carbono absorvido pode ser devolvido para a atmosfera pela respiração na forma de CO₂, e pode ser consumido por animais ou ser decomposto voltando a ser CO₂ (respiração microbiana). Assim, a vegetação fixa o carbono do ar pela fotossíntese e o libera através da respiração. No solo o C é emitido pela respiração das raízes, pelas atividades microbianas e pela oxidação do C decorrente da decomposição da matéria orgânica (FURTADO NETO et al., 2009).

Nessa trabalho iremos explorar a respiração do solo, um dos indicadores que apresenta sensibilidade para as variações ambientais e as mudanças climáticas, devido a sua

contribuição ao efluxo de CO₂ da superfície do solo e na concentração do CO₂ atmosférico (XIE et al., 2008; PANOSSO et al., 2012). Ela provém de processos biológicos, como a decomposição dos resíduos orgânicos, incluindo a respiração do sistema radicular das plantas, os microorganismos e a fauna do solo (DAVIDSON et al., 2002; XIE et al., 2008). A saída do CO₂ pela respiração pode ser dada através da matéria orgânica, perda de carbono orgânico do solo por erosão ou lixiviação e pela decomposição microbiana (COSTA et al., 2006).

Ribeiro (2014) destaca a importância da cobertura vegetal na produção de CO₂, sendo regulada pela mudança no uso e manejo do solo. A planta pode ser uma fonte emissora ou receptora de CO₂, por meio da fotossíntese e armazena o carbono em sua biomassa, transformando-o em oxigênio, sendo um pequeno absorvedor, em comparação com outros reservatórios (LAPOLA, 2007), e o maior fluxo de carbono entre a biosfera e a atmosfera (XIAO et al., 2019). Parte da energia é acumulada no processo de fotossíntese e outra parte na forma de carboidratos (biomassa), conhecida por produtividade primária líquida.

O processo de entrada, dado pela fotossíntese ($6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{energia} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$), auxilia no processo de adição de carbono, grande parte deste entrando no solo (SILVA; MENDONÇA, 2007; GIONGO et al., 2011), sendo absorvido pelas folhas. O carbono é uma peça chave no processo da fotossíntese, tendo como fonte fundamental o dióxido de carbono (CO₂), sendo utilizado pelas plantas verdes para sintetizar a glicose (açúcares), na presença da luz solar e da água (SANTOS, 1999). A energia solar é usada para combinar o dióxido de carbono, o hidrogênio e o oxigênio gerando assim uma reação química para gerar moléculas de açúcar. Esse processo é composto pela reação da luz, passos envolvidos na captura da energia luminosa e nas reações escuras que consistem na produção de açúcares e redução de CO₂ (MOREIRA, 2005). As plantas quebram essas moléculas para obter energia e se desenvolver e posteriormente o dióxido de carbono é devolvido para a atmosfera.

A adição e o armazenamento de carbono ocorre por distintas fontes, variando de acordo com o tipo de planta e disponibilidade de fósforo no solo (COSTA et al., 2006; HOFHANSL et al., 2020). A biomassa, junto dos resíduos vegetais (folhas, galhos, flores e frutas), constitui-se como fixadora de carbono. Áreas onde a vegetação está melhor preservada, são importantes fontes de carbono, pois possibilitam a entrada de carbono no solo

por meio da adição pela síntese de compostos orgânicos no processo de fotossíntese (GIONGO et al, 2011).

Assim, segundo Cerqueira (2007), ecossistemas com muita biomassa e com o solo pouco perturbado no que diz respeito a queimadas, uso de procedimentos inadequados de colheita, conversão em uso não florestal do solo, retêm carbono numa escala temporal na ordem de décadas e séculos. Martins et al. (2015) destacam que os ecossistemas florestais são uma alternativa para minimizar o aquecimento global, apresentando alta taxa de sequestro de carbono.

Entretanto, com a modificação dos ecossistemas, a diversidade vem sendo ameaçada devido a expansão da fronteira agrícola, excesso no uso dos recursos naturais e do crescimento industrial e urbano (PEIXOTO et al., 2016). Essas atividades implicam na redução da fixação do carbono no solo e tem causado a elevação de GEE na atmosfera (LE QUÉRÉ et al., 2018). Dentre essas atividades destaca-se a agricultura a nível global que é reponsável por cerca de $\frac{1}{4}$ das concentrações dos GEE (LAMB et al., 2016). Essas mudanças foram intensificadas apenas nos dois últimos séculos, sendo o fluxo de carbono antrópico comparado ao ciclo de C natural (BRASSEUR et al., 2003). No Brasil, 22.3% das emissões totais de CO₂ são devido aos processos de mudança de uso e cobertura da terra (MCTIC, 2019).

Dentre os fatores aceleradores desse processo podemos destacar os incêndios florestais, a atividade agropastoril extensiva, o desmatamento, e a substituição da vegetação nativa pelas culturas, que contribuem para a modificação do ciclo do carbono (GIONGO, et al., 2011) e do efluxo de CO₂ do solo (FRANK et al., 2006). O relatório do IPCC já vem destacando que 84% das emissões de CO₂ de florestas são originárias no solo (IPCC, 2001). Além disso, o uso intensivo da terra tem contribuído para a diminuição da disponibilidade do carbono orgânico das reservas terrestres (REIS, 2019), que correspondem a duas vezes mais que toda a biomassa vegetal existente no planeta (BARBERA, 2019).

1.2.2 Fatores que afetam as emissões de CO₂ do solo

A dinâmica do dióxido de carbono (CO₂) é dada por meio de uma série de processos físicos, químicos, geológicos e biológicos (VILLELA et al., 2012). O uso intensivo e o

manejo inadequado do solo e água vem diminuindo o estoque de carbono do solo e aumentando a emissão de CO₂ para a atmosfera, sendo objeto de estudo de diversas pesquisas no mundo e notadamente no Brasil (MARINHO JUNIOR et al., 2020). As emissões de dióxido de carbono (CO₂) pelo solo, também referido como a respiração do solo, é um componente importante do balanço global de carbono, retornando a atmosfera. Constitui-se o maior fluxo de CO₂ dos ecossistemas terrestres para a atmosfera (BAHN et al, 2010) e um dos principais processos biológicos para indicar a qualidade do solo (ARAÚJO e MONTEIRO, 2007).

Em laboratórios no século XIX foram realizadas as primeiras medições de emissões de CO₂ do solo (BOUSSINGAULT & LEVY, 1853). Essas medições foram aprimoradas no decorrer do tempo, e inúmeros esforços vêm sendo realizados pela comunidade científica para estudar a respiração do solo e o ciclo global do carbono (SCHLESINGER & ANDREWS, 2000).

A emissão de CO₂ a partir da superfície do solo (ECO₂) constitui de 60 a 90% da respiração total de ecossistemas e representa a atividade biológica dos micro-organismos (KUZUYAKOV, 2006). Fisiologicamente, a respiração corresponde a uma série de processos metabólicos que decompõem (ou catabolizam) moléculas orgânicas para emitir energia, água, oxigênio, metano e principalmente o dióxido de carbono (FÉRET et al, 2018).

Nesse estudo foi adotado o termo efluxo de CO₂ para se referir para a emissão de CO₂ do solo e da superfície. Vale ressaltar que a maioria das pesquisas e da produção científica ainda é internacional, sendo a maioria na língua inglesa, mesmo que os estudos nacionais venham aumentando nos últimos anos. No que se refere ao estudo dos efluxos de CO₂ no solo, nota-se um aumento no número de artigos tanto em inglês como em português (Figura 3). A consulta para contabilizar o ano de 2020 foi realizada somente no ano de 2021 para obter o quantitativo referente ao período completo utilizando o Google Acadêmico. Como palavra-chave foi adotado o termo efluxo de CO₂ do solo para os artigos em português e *soil CO₂ efflux* para os artigos em inglês.

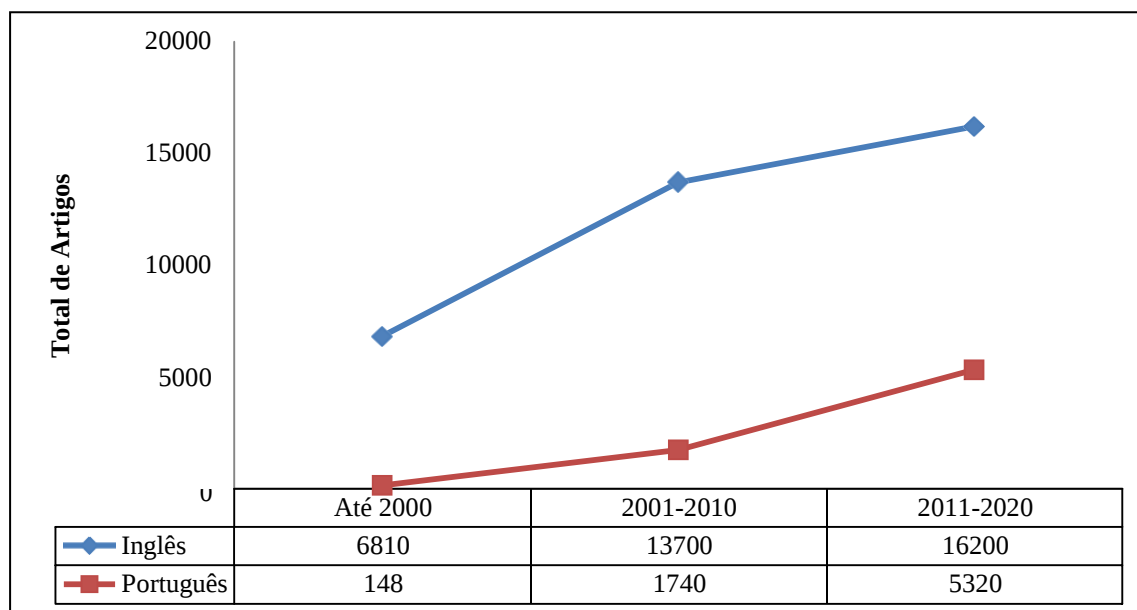


Figura 3: Evolução na quantidade de artigos sobre o efluxo de CO₂ do solo. Fonte: Google Acadêmico.

Elaborado pela autora.

Nos últimos anos, estudos sobre o efluxo de CO₂ do solo vêm sendo intensificados em âmbito nacional e internacional (KUZYAKOV, 2006; SUBKE; INGLIMA e COTRUFO, 2006; LUYSSAERT et al., 2007; BOND-LAMBERTY e THOMSON, 2010). Mesmo constatada uma demanda crescente de pesquisas, dados de efluxo de CO₂ na região semiárida brasileira ainda são muito escassos (SALCEDO; SAMPAIO, 2008).

Mesmo com a escassez de pesquisas no semiárido, vale salientar a importância desses estudos, pois a respiração do solo desempenha um papel importante na ciclagem de nutrientes (LIMA et al., 2020). Além disso, o CO₂ é responsável pela atividade microbiana no solo e sua quantidade indica também o nível de decomposição e matéria orgânica no solo. Entre os vários componentes de matéria orgânica do solo, a biomassa microbiana é considerada uma indicadora altamente sensível das mudanças provocadas pelo uso desse elemento e é considerada como o compartimento central do ciclo do carbono (PULRONIK, 2009).

A liberação do CO₂ para a atmosfera é dependente de parâmetros ambientais como a vegetação, tipo de clima, relevo e tipo de manejo do solo (LA SCALA et al., 2006). Martins et al. (2010) destacam que a liberação de CO₂ juntamente com os fatores ambientais, exerce influência na magnitude das atividades microbianas. Ainda assim, a emissão do solo e as influência dos parâmetros ambientais permanece um desafio devido a multiplicidade de processos de interação (OETEL et al., 2016). Os parâmetros funcionam como indicadores

ecológicos, sendo baseados na comparação de locais onde houve distúrbios ou sítios mais conservados (GROFFMAN et al., 2001).

Parâmetros ambientais constituem-se como *drivers* para influenciar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do solo (Figura 4). Segundo Oetel et al. (2016), esses *drivers* podem ser considerados com influência direta (clima, tipo de solo) e em macroescala (temperatura, umidade).



Figura 4: Principais motivadores das emissões de GEE do solo. Adaptado de Oetel et al. (2016).

Corroborando com os fatores de influência de acordo com Oetel et al. (2016), alguns autores destacam a influência desses motivadores (COSTA et al., 2008; VILLELA et al., 2012; FERREIRA, 2015; SOPER et al., 2017). Outro fator a se observar é que a maioria das pesquisas encontradas na literatura são realizadas em macroescala, devido a complexidade e dificuldade de se obter dados pontuais. Isso se reflete em diversas regiões, existindo alguns poucos trabalhos em microescala, com medições *in situ* como por exemplo em Santos (2015), Ferreira (2015), Silveira (2017), Ferreira et al. (2018) e Mendes et al. (2020).

De forma geral, tanto a biomassa quanto a liberação de CO₂ e a população microbiana apresentam grande flutuação devido a fatores climáticos e sua sazonalidade (ARAÚJO et al., 2009), principalmente umidade e temperatura do solo (CATTELAN; VIDOR, 1990), sendo

correlacionada positivamente com a temperatura (RAICH e POTTER, 1995; COSTA et al., 2008). Fluxos de CO₂ são relatados como dependentes da temperatura e umidade (KANG et al., 2003; RYU et al., 2009), do teor de carbono orgânico (KEMNITT et al., 2008), e da densidade e porosidade (JASSAL et al., 2004). Valentini, Abreu e Faria (2015) destacam que a velocidade da liberação de carbono irá depender dos fatores bióticos (microorganismos do solo) e abióticos (umidade, temperatura) alterando as condições microclimáticas do solo e o balanço do carbono em escala local e regional.

Segundo Soper et al. (2017) as temperaturas aumentam a expansão dos gases e a concentração de dióxido de carbono nos espaços porosos, assim altas temperaturas suportam maiores taxas de efluxo de CO₂. As temperaturas exercem influência nos mecanismos de aumento das emissões de CO₂ (FANG & MONCRIEFF, 2001; OETEL et al., 2016). Bahn et al. (2010) destacam a importância da temperatura na respiração do solo, e fizeram uma reanálise e síntese da respiração do solo de 80 locais/ano em 57 áreas de florestas, plantações, savanas, arbustos e pastagens de climas boreal a tropical. Os autores relataram que a respiração do solo anual total está intimamente relacionada com a temperatura média anual do solo, sendo independente do tipo de ecossistema e bioma. Por outro lado, quando analisaram a variabilidade espacial, Tedeschi et al. (2006) relatam que a contribuição da temperatura não foi tão grande.

Outros fatores como o uso da terra, pode ser um emissor de CO₂ para a atmosfera ou um armazenador de carbono no solo (VILLELA et al., 2012; MINASNY et al., 2017). Dentre os estudos existentes na literatura, a emissão de CO₂ com as mudanças do uso da terra é destacada como o fator que mais contribui em países em desenvolvimento (SHOLES & VAN BREEMEN, 1997; VILLELA et al, 2012), particularmente as atividades agropastoris, devido ao desmatamento que antecede essas ações (GIONGO et al, 2011). As emissões devido as mudanças no uso da terra incluem o desmatamento, queima da biomassa, conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas, drenagem de áreas úmidas e cultivo do solo (LAL, 2004). As perturbações antropogênicas exarcebam a emissão de CO₂ do solo causado pela decomposição da matéria orgânica ou respiração do solo (SCHLESINGER, 2000). Estimativas mostram que a mudança no tipo de cobertura natural para agrossistemas e agricultura é de cerca de 24% das emissões mundiais de CO₂ (IPCC, 2007).

Conforme esperado, o o solo nu demonstra os fluxos médios mais baixos de todos os tipos de cobertura do solo (OETEL et al., 2016), além de alguns casos apresentarem fluxos

negativos (XIE et al., 2008). A disponibilidade e função do CO₂ nos solos está diretamente relacionado aos fatores naturais dominantes, assim como aos tipos e intensidades de usos aos quais esses estão submetidos. Nesse contexto, as ações humanas podem ser as principais modificadoras da dinâmica desse elemento nos ambientes, particularmente em áreas de caatinga, onde historicamente vem ocorrendo intensa antropização.

A camada superficial, local de contato solo-atmosfera, sofre a influência de fatores climáticos, principalmente da umidade e da temperatura (ARAUJO et al., 2009). A emissão de CO₂ pode sofrer influência do tipo de espécie, da idade da vegetação e da variação diária. As maiores taxas de respiração do solo foram encontradas para povoamentos florestais jovens, quando comparados a povoamentos de 10, 15, 31 e 47 anos de idade (SAIZ et al., 2006). Segundo Terrer et al. (2021), dados coletados de 108 experimentos, mostraram que regiões de florestas quando comparadas as regiões de pastagens, possuem CO₂ elevado e aumento na biomassa, entretanto o armazenamento de carbono tem sua capacidade diminuída. Segundo os mesmos autores esses efeitos ocorrem de acordo com as variáveis como clima, tipo de ecossistema, propriedades do solo e condições ambientais.

A umidade é fundamental para a emissão dos gases, pois controla a atividade microbiana e os processos relacionados (OETEL et al., 2016). No contexto mundial, estudos dessa natureza, no geral, usam a umidade como fator de influência para os efluxos de CO₂, notadamente em áreas com Caatinga (FERREIRA et al., 2018; COSTA, 2019). Em áreas como, por exemplo, o semiárido paraibano, Martins et al. (2010) destacam a maior liberação de CO₂ do solo em períodos com menores temperaturas e maior umidade, aumentando a população microbiana.

Segundo Martins et al. (2010), a melhoria da condição hídrica é capaz de proporcionar melhor condição para o desenvolvimento de microrganismos no solo, resultando em maior atividade biológica. No caso de áreas secas, a dependência da precipitação é um dos fatores que fazem com que a estação chuvosa reative os processos biológicos, trazendo assim maior emissão.

A matéria orgânica é composta basicamente por bactérias, fungos e microfauna, onde e são se armazenados os nutrientes, assim como o carbono do solo. O carbono do solo e a dinâmica está relacionada ao tipo de uso e das características ambientais locais (TERRER et al., 2021). As condições do solo e a temperatura podem ser modificadoras da dinâmica

microbiológica. Em condições de solo muito seco, a presença de matéria orgânica, a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana são minimizadas. Em geral, nota-se que em áreas secas como a Caatinga, as emissões de CO₂ sofrem influência de acordo com a estação seca e chuvas na região (RIBEIRO et al., 2016; SOUZA et al., 2017).

A abordagem e os impactos no ambiente além do pouco conhecimento no que se refere as emissões de CO₂ levaram a que esforços fossem feitos para a adoção de diversas metodologias para a medição da respiração do solo (RAICH e SCHELESINGER, 1992). Podemos encontrar algumas metodologias como o método de covariância por vórtice turbulento, os métodos dinâmicos *in situ* por meio de câmaras com uso de infravermelho (IRGA) e o da captura de CO₂ em solução alcalina (AA), sendo mais comum e mais utilizado o método AA (D'ANDREA, SILVA & SILVA, 2006; KUZYAKOV, 2006; COSTA et al., 2006; FERREIRA, 2015). Esses métodos são utilizados para se estimar a respiração do solo diretamente no campo e são aplicados em pequena escala, trazendo informação da variação temporal dos efluxos nas áreas estudadas.

O método da covariância de vórtices turbulentos (eddy covariance) vem sendo bastante usado em diversas regiões (BALDOCCHI, 2003; MENDES et al, 2020). Embora o método mais utilizado seja o AA, devido o equipamento ser mais barato, alguns estudos mostram que o IRGA é o mais confiável e preciso, principalmente em estudos na Caatinga (FERREIRA et al, 2005; FERREIRA, 2015; FERREIRA et al., 2018).

O método dinâmico, dos analisadores automáticos de infravermelho, referido como IRGA, é indicado para estudos que exigem maior sensibilidade e com o objetivo de avaliar taxas de emissão em curtos espaços de tempo (COSTA et al., 2006). O IRGA mede fluxos em pequenos intervalos e realiza suas medições diretamente no solo, necessitando que esteja instalado de forma pontual, em tempo real. A medição usa a taxa de aumento de CO₂ na câmara de medição para estimar a taxa de difusão do CO₂ no ar fora da câmara. Esses valores e condições encontradas devem ser semelhantes, e de acordo com o fabricante (LI-COR, 2015), é recomendada a limitação de 90 a 180 segundos para a medição. Uma vantagem oferecida por esses equipamentos são as medições rápidas, confiabilidade nas estimativas e os procedimentos serem realizados em diversos locais, possibilitando o conhecimento desses aspectos minimizando as perturbações durante a medição (ZHAO et al., 2018).

A maioria dos monitoramentos existentes no Brasil utilizando o método IRGA se concentra na região Norte e em áreas agrícolas. Pinto-Junior et al. (2009) utilizando o método IRGA em um experimento no Mato Grosso em um período de 11 meses, obteve o ECO_2 médio para uma floresta de transição Amazônia/ Cerrado ($5,48 \pm 0,66 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e um para uma área de pastagem ($4,95 \pm 1,59 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Furtado Neto et al., (2013), usando o mesmo método em uma floresta primária no Pará, observaram efluxos médios de $2,80 \pm 0,56 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Em área de floresta plantada de eucalipto, D'ANDRÉA et al., (2011) observaram efluxos médios de $0,95 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

No Nordeste Brasileiro, utilizando o IRGA, podemos destacar o trabalho de Ferreira et al. (2018), que analisou a variação diária e noturna no período de 9 meses o efluxo de CO_2 na Caatinga, em Pernambuco, no município de São João, onde encontraram efluxos máximos de $3,47 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Já em Serra Talhada (Pernambuco), Lima et al. (2020) encontraram efluxos próximos aos encontrados na região Amazônica com o mesmo método ($5,01 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Outro trabalho na Caatinga foi conduzido por Lima et al. (2020), que investigaram o impacto das mudanças do uso da terra na respiração do solo em Pernambuco, utilizando o método do IRGA (modelo LI-6400) : sob vegetação de Caatinga e com pastagem degradada. O estudo concluiu que a respiração do solo em área de vegetação de Caatinga é significativamente maior que na pastagem degradada, além de destacar que as menores temperaturas e a maior presença de carbono orgânico do solo influenciaram os maiores valores de respiração do solo.

Assim, nota-se que o conhecimento da emissão de CO_2 do solo em áreas de Caatinga, é limitado, principalmente quando se trata dos efeitos das mudanças do uso e cobertura da terra na respiração do solo nesses ambientes (RIBEIRO et al, 2016; LIMA et al., 2020).

1.3 TÉCNICAS DE ESTUDO DO CO_2

Com o avanço da tecnologia e o surgimento das geotecnologias, é possível obter informações sobre a superfície terrestre de maneira ágil e prática. As inovações tecnológicas relacionadas ao uso e aplicação de sensores remotos orbitais, Sistemas de Informação Geográfica (SIG), técnicas de posicionamento por satélite e *Global Navigation Satellite System* (GNSS), permitem que ocorram avanços no monitoramento ambiental.

As geotecnologias referem-se a um grupo de tecnologias de informação geograficamente referenciada, que abrange a aquisição, processamento, e interpretação (ou análise) de dados (SILVA, et al 2002). São técnicas que podem ser utilizadas em medições *in situ* ou sem contato físico direto com os alvos.

Dentre as técnicas de medição e mapeamento, se encontram o sensoriamento remoto (SR). Segundo Jensen (2009), O SR pode fornecer novas e fundamentais informações e vem sendo amplamente utilizado em estudos combinados com outros dados, como meteorológicos, de vegetação e de estoques e fluxos de CO₂ (Rahman et al., 2000).

O tratamento das informações espaciais pode ser feito com auxílio de um SIG, a fim de que possam ser realizadas análises espaciais. Com essas ferramentas é possível realizar diversas operações, integrando diferentes tipos de dados.

1.3.1 O Sensoriamento Remoto para o Mapeamento Terrestre

O objetivo do SR é estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética com alvos na superfície terrestre. Tem sido muito utilizado na geografia, agricultura de precisão, na hidrologia, na irrigação, na meteorologia, entre outros. O SR ajuda a entender a realidade sem necessitar de contato com o meio físico, além de fornecer dados para auxiliar na diferenciação espacial e temporal de alvos. Portanto, o SR é fundamental na detecção, observação e definição de medidas mitigadoras de problemas ambientais.

O principais marcos do SR segundo Jensen (2009), tiveram início em 1687 com o Livro “Principia” de Isaac Newton, que sumariza as leis básicas da mecânica. Posteriormente, segundo o mesmo autor, o SR foi marcado pelo surgimento da fotografia, a invenção do avião, do radar, fotogrametria e dos satélites, entre outros eventos. No Brasil, os primeiros mapeamentos temáticos foram realizados na década de 40 com o uso de fotografias aéreas, e apenas na década de 70 foi iniciado projeto Radam e RadamBrasil para mapeamento dos recursos naturais com uso de radar, que é referência em inúmeras iniciativas de mapeamento até os dias atuais (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Após o Projeto RadamBrasil, surgiram diversas técnicas e sensores para o mapeamento temático e monitoramento dos recursos terrestres.

Para o monitoramento terrestre, diversos sistemas podem ser utilizados com diferentes características, dependendo de qual variável será investigada. A importância no uso de informações precisas sobre a superfície terrestre, está na identificação de parâmetros que influenciam, tanto os processos biofísicos, quanto as trocas de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre (TOWNSHEND et al., 1991). Esses parâmetros têm por finalidade identificar tipos de cobertura terrestre para a parametrização através das informações espectrais, temporais, espaciais e direcionais. Nesse capítulo iremos destacar um dos satélites usados no monitoramento ambiental, notadamente para o uso da terra e vegetação: o SENTINEL.

Tabela 4- Características dos satélites Sentinel 2A e 2B e suas respectivas bandas e resoluções.

Satélite/Sensor	Bandas	Comprimento de onda central (nanômetro)	Resolução Espacial (m x m)	Resolução Temporal
Sentinel 2A	B02(blue- azul)	492.4	10	5 dias
	B03 (green- verde)	559.8		
	B04 (red- vermelho)	664.6		
	B08 (infravermelho próximo)	832.8		
	B05 (Red Edge 1)	704.1	20	
	B06 (Red Edge 2)	740.5		
	B07 (Red Edge 3)	782.8		
	B08A (Red Edge 4)	864.7		
	B11 (SWIR 1)	1613.7		
	B12 (SWIR 2)	2202.4		
	B01 (Aerossol)	442.7		
	B09 (Water Vapor)	945.1		
B10 (Cirrus)	1373.5	60		
Sentinel 2B	B02(blue- azul)	492.1	10	
	B03 (green- verde)	559.0		
	B04 (red- vermelho)	665.0		
	B08 (infravermelho próximo)	833.0		
	B05 (Red Edge 1)	703.8	20	
	B06 (Red Edge 2)	739.1		
	B07 (Red Edge 3)	779.7		
	B08A (Red Edge 4)	864.0		
	B11 (SWIR 1)	1610.4		
	B12 (SWIR 2)	2185.7		
	B01 (Aerossol)	442.3		
	B09 (Water Vapor)	943.2		
	B10 (Cirrus)	1376.9	60	

Fonte: ESA (2015).

O lançamento do primeiro satélite da série SENTINEL ocorreu em 2014, como parte de um projeto da Agência Espacial Europeia (ESA)/Comissão Europeia junto ao programa *Copernicus*. Atualmente, a missão é composta por 7 satélites: Sentinel 1A, Sentinel 1B,

Sentinel 2A, Sentinel2B, Sentinel 3A, Sentinel 3B e Sentinel 5P. Com período de revisita menor que o LANDSAT nos primeiros satélites, e uma alta resolução espacial (10 m), o Sentinel vem fornecendo informações gratuitas e de acesso aberto para a comunidade em geral.

As imagens são disponibilizadas gratuitamente pelo site do *U.S. Geological Survey* (USGS) para uso pela população em geral, além do uso científico e comercial. O Sentinel 2 imageia uma ampla faixa de terra (290 km) e 13 bandas espectrais: 4 bandas com resolução espacial de 10m, 6 bandas de 20 m e 3 bandas de 60 m. Possui cobertura entre as latitudes 84° norte e 56° sul, além de uma revisita de 5 dias no Equador.

As imagens obtidas das seguintes plataformas: EarthExplorer, USGS Global Visualization Viewer (GLOVIS) ou o Sentinel2Look Viewer. Na coleção do EarthExplorer, disponível no site <https://earthexplorer.usgs.gov/>, resultado da parceria da ESA com a USGS, é possível obter imagens no nível de processamento 1C, que incluem a ortorretificação, correção radiométrica e geométrica, além de dados de reflectância do topo da atmosfera (TOA).

1.3.2 Uso e cobertura da terra e Índices de Vegetação

Objeto de investigação ao longo dos anos, a dinâmica da terra e a relação sociedade e natureza, especificamente os impactos das atividades antrópicas sobre a natureza vem sendo citada desde a antiguidade, mas somente a partir dos anos 60 vêm sendo mais abordada. Assim, pode-se relatar as pesquisas que analisam os impactos que os usos e atividades antrópicas que podem subsidiar análises para a gestão e avaliação da sustentabilidade ambiental.

Primeiramente, antes de falarmos do uso e cobertura da terra devemos retomar a evolução da ciência geográfica para identificar o objeto e tema de estudo: o uso da terra. Segundo o Manual de Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013), o tema uso da terra não chegou a constituir uma abordagem metodológica específica e sistemática, no entanto, a produção temática pôde se beneficiar das discussões paradigmáticas nas principais escolas da Geografia. Além disso, devemos conhecer suas definições, onde uso da terra é a maneira como os elementos biofísicos da superfície são utilizados e/ou o propósito para o qual eles são

utilizados, enquanto a cobertura da terra é a cobertura física da Terra, o estado biofísico da superfície da Terra (MEYER e TURNER, 1994).

O avanço dos estudos sobre a temática do uso da terra se deu a partir do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do INPE e da Embrapa. Dentre esses estudos citados anteriormente temos o projeto RADAM (1970) e RADAMBRASIL (1975), que representaram um avanço tecnológico para o mapeamento de recursos naturais, vegetação, uso da terra e cartografia sendo inicialmente na Amazônia e parte da região Nordeste. Posteriormente, o RADAMBRASIL foi expandido para o restante do território brasileiro. Esses projetos constituíram em um marco com a utilização de sensores ativos (radar), sendo um esforço pioneiro do governo federal para a pesquisa dos recursos naturais.

Segundo o IBGE (2013), apenas na década de 1980 é que se iniciaram estudos voltados para o reconhecimento de padrões de uso da terra, mas principalmente para apoiar as análises integradas da paisagem. Iniciou-se uma nova fase com a tecnologia espacial e com o uso do sensoriamento remoto. Quando investigamos algumas aplicações de mapeamento de uso da Terra mais recentes não podemos esquecer da Classificação do IBGE (2013) presente no manual técnico de Uso da Terra, do Sistema de Mapeamento do Uso e Ocupação da Terra (TerraClass), sendo ele usado para monitoramento da Amazônia Legal Brasileira desde 2010 e o Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MapBiomas) desde o ano de 2015.

Além dos mapeamentos e classificações citadas neste estudo e existentes na literatura, a utilização de imagens de satélite vem ocorrendo no decorrer dos anos como uma das ferramentas mais importantes para a detecção e monitoramento das mudanças na cobertura e uso da terra. Devido à dificuldade de obter dados *in loco* por conta dos custos, foram desenvolvidos inúmeros estudos utilizando imagens de satélites, obtendo-se resultados positivos com essa aplicação. Vale destacar que neste trabalho adotamos como base o manual técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013) e o MapBiomas (SOUZA et al, 2020).

As imagens orbitais têm sido muito utilizadas em aplicações ambientais no semiárido. Maldonado (2001) destaca que em regiões como essas, as condições climáticas, edáfica e de degradação da paisagem têm importante influência na resposta espectral da cobertura e uso da terra.

Quando observamos essa região, o SR auxilia no mapeamento terrestre das mudanças no território, como por exemplo nos Cariris Velhos/PB, onde Souza e Souza (2016) utilizaram de imagens do Landsat para estabelecer a relação direta do uso e ocupação histórica das terras do dessa região com as paisagens vegetais encontradas atualmente na região. Na APA do Cariri, área desse estudo, Silva; Souza e Bacani (2019) realizaram através da imagem Sentinel 2A, o mapeamento da intensidade de ação antrópica e do uso da terra e cobertura vegetal, mostrando que a ação antrópica na área apresenta intensidades altas e muito altas.

No caso da cobertura vegetal, a detecção de mudanças na fitomassa da Caatinga pode ser determinada por meio de métodos podendo ser estimada pelos índices de vegetação. O Índice de Vegetação com Diferença Normativa (NDVI) constitui em método mais utilizado contribuindo de forma eficiente para análises que contemplam a cobertura vegetal (MYNENI et al., 1995). A importância do NDVI segundo Jensen (2009), é o monitoramento das mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e na atividade da vegetação, a razão reduz muitas formas de ruídos multiplicativos presentes em múltiplas bandas de imagens de múltiplas datas.

O NDVI é dado pela diferença da reflectância da banda do vermelho e do infravermelho próximo. Seus valores variam de -1,0 a 1,0 (KARABURUM, 2010), tendo os menores valores para solo exposto, corpos d'água e áreas com pouca cobertura vegetal, e os valores altos para florestas densas com maior cobertura vegetal. Em áreas com cobertura vegetal aberta, o solo acaba refletindo mais que a vegetação. Segundo Jensen (2009) o NDVI é muito sensível a variações do substrato sob o dossel (por exemplo os solos que são visíveis sob os dosséis).

Atualmente, existem alguns produtos processados de NDVI para o mapeamento global da vegetação, dos quais podemos citar o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e o *MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). No caso do AVHRR, ele é o registro mais antigo que fornece observações desde o ano de 1981, com resolução espacial de 8 km, com dados que possibilitam monitorar a atividade fotossintética e produtividade primária bruta, fornecendo subsídios para que a comunidade científica examine os estoques e fluxos de carbono globais em diversos períodos (XIAO et al., 2019). O MODIS

fornece observações com cobertura diária em 6 bandas espectrais, com resolução de 250 a 1 km com registros desde os anos 2000.

Kazmierczaki (1996) usou dados AVHRR/NOAA GAC para análise da sazonalidade na Caatinga, onde dados de NDVI foram extraídos realizando a leitura das imagens e, a partir das coordenadas de latitude e longitude fornecidas, determinaram o valor médio de uma janela de 3x3 *píxels*, centrada na coordenada. A metodologia permitiu determinar o comportamento padrão do NDVI para a Caatinga, sendo obtidas as seguintes conclusões: a vegetação da Caatinga responde rapidamente à precipitação, observada na imediata resposta espectral das folhas a variações nos seus balanços hídricos, o que torna o sensoriamento remoto uma ferramenta extremamente útil nos estudos das condições da cobertura vegetal, sendo as informações mais útil obtidas de uma base de dados AVHRR; e o estudo de sazonalidade é importante pois provoca mudanças substanciais em parâmetros climatológicos, que por sua vez exerce influência na vegetação.

Dentre diversas aplicações desses produtos, Barbosa, Huete e Baethgen (2006) usando produtos NDVI derivado de medições obtidas pelo AVHRR, realizaram um estudo de 20 anos (1982 a 2001) da variabilidade do NDVI ao longo do Nordeste Brasileiro, para o qual mostraram oscilações na estação de crescimento e valores máximos nos meses de abril e maio. Tendências ascendentes e descendentes foram observadas, com aumento consistente durante o período de 1984-1990, enquanto foi revertido no período subsequente 1991-1998. Na qual foi observada também picos na estação seca, mostrando o impacto do aumento da aridez ocorrida na última década do século XX.

Uma abordagem para identificar o nível de degradação/desertificação foi realizada por Aguiar et al. (2010) no município de Canindé - CE, utilizando o NDVI em imagens do TM-Landsat 5 dos anos de 1985, 1991 e 2006 usando o software ArcGIS 9.2, calculando através de operações aritméticas, as mudanças na cobertura vegetal da região, levando em consideração a reflectância, emitância, albedo e outras variáveis que interferem de forma direta ou indireta no processamento digital das imagens e com isso foi identificado alterações na vegetação mostrando o processo de desertificação na área de estudo.

Com a proposta de analisar a variabilidade espaço-temporal da vegetação em terras secas e suas relações com a dinâmica e anomalias climáticas, para o período de 1981 a 2011,

Erasmi et al. (2014) utilizaram o conjuntos de dados do AVHRR, com base nos valores de NDVI. A tendência inter-anual de NDVI e precipitação indicaram presença de vegetação significativa no período de observação, revelando uma estreita relação de eventos de El Niño Oscilação Sul (ENOS) quente, com uma defasagem temporal de 12 meses.

Bezerra et al. (2014) estudaram os parâmetros biofísicos na Unidade de Conservação do Parque Nacional da Fuma Feia - RN e adjacências utilizando o satélite Landsat 5, obtendo o albedo da superfície, NDVI e temperatura de superfície. Com isso, os resultados mostraram que com a utilização do sensoriamento remoto foi possível identificar as diferenças no padrão espaço-temporal dos parâmetros de acordo com as variações climáticas e uso e ocupação do solo.

Assim, para melhorar o efeito e a resposta para a identificação da cobertura vegetal foi desenvolvido outro índice de vegetação, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI). Ele surgiu como um melhoramento ao NDVI, sendo utilizado um fator de ajuste para o substrato do dossel, diminuindo a necessidade de calibração para os diferentes tipos de solos (HUETE; JUSTICE; LIU, 1994). Assim, acrescenta-se na sua equação o valor de L, o fator de ajustamento, que varia de acordo com a densidade da vegetação tendo L=1 (baixa), L=0,5 (intermediária), L=0,25 (altíssima) reduzindo o efeito do solo comparado ao NDVI (HUETE, 1988). No caso de ambientes de Caatinga, geralmente adota-se o valor de 0.5 como fator de ajuste, devido a densidade desses ambientes não serem tão altas e a heterogeneidade da zona de estudo (BECERRIL-PINA et al., 2015).

Segundo Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich (2012) quando trabalhamos com dosséis não expressamos a quantidade de folhas existentes pelo número de camadas, e sim por um índice denominado índice de área foliar (IAF). O IAF pode ser definido como uma medida adimensional, onde é medida a quantidade de área foliar em um dossel por unidade de área de solo (m^2), comumente empregado em estudos de vegetação e ecossistemas (ASNER; SCURLOCK; HICKE, 2003). O índice de área foliar leva em consideração a área de folhas dividida pela área do terreno, ou seja, quanto maior o valor do IAF menor é sua refletância na região do visível e maior no infravermelho próximo (PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Além de estimar o IAF, que é usado para preescrever em modelos de

ecossistema de diagnóstico, o SR é usado para quantificar diretamente os fluxos de C (LIU, XIAO, et al., 2018).

1.3.3 Técnicas de Detecção Remota do CO₂

Em relação a estimativa do CO₂ atmosférico, do ponto de vista do Sensoriamento Remoto, é muito recente. Iniciou-se a partir de Barkley et al. (2006) com dados do espectrômetro *SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography* (SCIAMACHY) a bordo do *ENVironment SATellite* da ESA (ENVISAT). Em 2009, temos o lançamento pela NASA da sonda OCO — *Orbiting Carbon Observatory*, embora não tenha obtido sucesso quanto ao monitoramento das emissões do dióxido de carbono. Posteriormente, foi lançado em 2014 o OCO-2, o primeiro satélite projetado para medir em escala regional o carbono presente na atmosfera, que desde setembro de 2014 vem trazendo medições de todo o mundo.

Segundo Baldocchi et al. (2001), instrumentos montados em plataformas de satélite tem visão global da Terra e oferecem a possibilidade de avaliar fluxos de carbono da superfície com base em algoritmos que podem ser conduzidos por medições da radiação refletida e emitida. Nessa perspectiva, Xiao et al. (2019) fizeram uma revisão de 50 anos sobre os avanços na detecção remota de fluxos e estoques de C e afirmaram que nesse período vários sensores aéreos e de satélite observaram a superfície terrestre da Terra e uma grande variedade de técnicas foi desenvolvida.

Dentre as diversas técnicas que fazem uso de dados de sensoriamento remoto e encontradas na literatura podemos citar as destacadas por Xiao et al. (2019), para obter os estoques e fluxos de carbono (Figura 5). Os estoques de carbono consistem em biomassa acima do solo (AGB) e C orgânico do solo (SOC). Os fluxos constituem a produtividade primária bruta (GPP), respiração do ecossistema (ER), produção primária líquida (NPP), produção líquida ecossistêmica (NEP) e produção líquida de biomas (NBP). Além disso, os fluxos que contribuem para a NEP são GPP, AR e respiração heterotrófica (FC) ($NEP = NPP - HR$). O NBP, saldo líquido do ecossistema, é determinado por: $NEB - \text{perda de C por processos como incêndio e colheita}$. Segundo Ferreira (2015), o NEP é influenciado pelas variações da temperatura e da precipitação, ou seja, a troca de CO₂ entre os ecossistemas terrestre e a atmosfera.

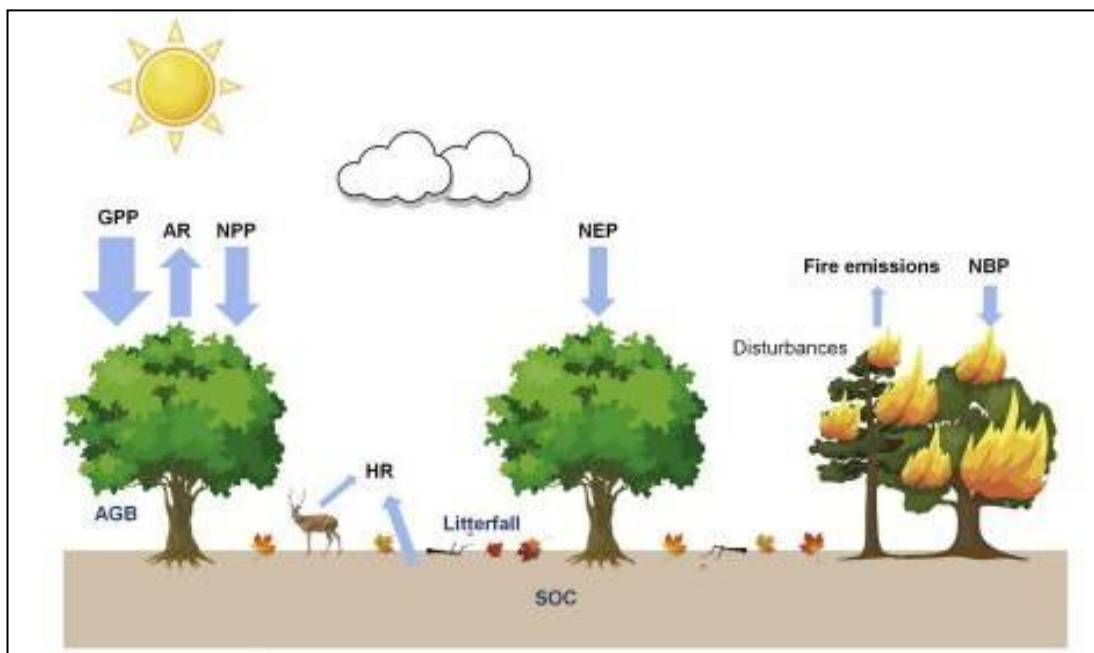


Figura 5: Fluxos e estoques de carbono quantificados usando dados e métodos de sensoriamento remoto. Fonte: Xiao et al. (2019).

Segundo os mesmos autores, os fluxos e estoques são quantificados com dados detectados remotamente e podem ser integrados a modelos baseados em processos, adquiridos em ampla faixa de comprimento de onda, juntamente com dados *in situ*. O fluxo de carbono normalmente é estimado usando comprimento de onda visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR), e no caso do ER com observações de temperatura da superfície com o infravermelho termal (TIR) (RAHMAN et al., 2005). Silva e Baptista (2015) destacam que podemos realizar estimativas do fluxo de CO₂ por meio do sensoriamento remoto, sendo eficiente o uso do CO₂flux para análises pontuais, como a nossa área de estudo.

Acerca de pesquisas envolvendo os biomas brasileiros e a estimativa das emissões de CO₂, foi aprovado em 2017 o projeto “Monitoramento Ambiental dos Biomas Brasileiros: Mata Atlântica, Caatinga, Pampa e Pantanal”. Esse projeto vem sendo desenvolvido pela parceria da FUNCATE com o INPE, utilizando imagens de média resolução espacial (Landsat e similares) para calcular as emissões causadas pelas áreas desmatadas.

Em relação ao carbono do solo e o seu armazenamento, é importante que se conheça o sequestro de carbono. Segundo Oliveira & Baptista (2015), a análise do fluxo de carbono sequestrado pela fotossíntese é importante, mostrando como essa variável influencia

diretamente a quantidade de carbono presente na baixa troposfera, também podendo ser relacionado à cobertura vegetativa, ilhas de calor e outros impactos ambientais. O sequestro de carbono armazenado pelas plantas pode ser calculado por meio da estimativa da biomassa aérea, subterrânea e de serapilheira. Os modelos de estimativas de biomassa e carbono baseados na produtividade da vegetação e dados de sensoriamento remotos podem ser utilizados para estimar os estoques de carbono, caracterizando os padrões de variabilidade interanual (Tretin & Saldanha, 2015). Sobre o sequestro de carbono, Brady & Weil (2013) afirma que:

As chances de sequestro de carbono são maiores para os solos degradados, os quais atualmente contêm apenas uma pequena parcela dos níveis de matéria orgânica que originalmente possuíam em suas condições naturais (Brady & Weil, 2013, p. 427).

No caso do Brasil, geralmente os trabalhos relacionado com o carbono vem se desenvolvendo na Amazônia e aplicados a agricultura comercial. Nesse caso, destacamos, o de Lage et al. (2015), o qual utilizou dados de sensoriamento remoto para analisar a concentração e o fluxo de dióxido de carbono utilizando imagens hiperespectrais do sensor Hyperion em determinadas regiões da Amazônia, para detectar o sequestro florestal de carbono e o CO₂ atmosférico.

Acerca do sequestro florestal de carbono, Rahman et al. (2000) desenvolveram uma metodologia para quantificar através da integração do NDVI com o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI), o CO₂flux. O CO₂flux é dado pela multiplicação do NDVI e do Índice de Reflectância Fotossintético reescalado para valores positivos (SPRI), que é o mesmo significado que o índice PRI, diferenciando somente o ajuste que é feito para a escala do NDVI. O PRI é dado pela diferença entre a refletância do azul e do verde. O CO₂flux é um importante componente para estimar o saldo de carbono presente na atmosfera, sendo uma variável fundamental para qualquer estudo de mudanças climáticas.

Nesse contexto, Martins & Baptista (2013) analisaram multitemporalmente o desmatamento no Projeto de Assentamento - PA Carão, no Acre, por meio da análise do sequestro florestal de carbono obtido a partir do índice espectral CO₂flux utilizando imagens do Landsat 5 TM utilizando o NDVI e PRI. O satélite Landsat se mostra eficiente no monitoramento de reservatórios de carbono, uso e cobertura da terra e também em diversos

parâmetros ambientais, podendo ser aplicados em áreas semiáridas e em processo de desertificação, tendo em vista que, o monitoramento nessa região é fundamental para se conhecer a realidade e mostrar a importância da preservação desse ambiente.

Em 2015, Oliveira & Baptista investigaram variações no fluxo de CO₂ na área urbana de Brasília – DF, onde foram utilizados dados do Landsat 8, sensor ótico *Operational Land Imager* (OLI). Nesse estudo foram testados outros índices de vegetação como o EVI e EVI2, além do NDVI, mas os dados foram superestimados. Os resultados mostraram que no Bioma Cerrado o sequestro de carbono foi maior na estação chuvosa devido a vegetação ser mais vigorosa e na estação seca apresentou redução no sequestro de carbono.

Fan et al. (2019) usando observações passivas de microondas de banda L de baixa frequência calcularam os fluxos anuais de carbono acima do solo (AGC) no período de 2010 a 2017 nos pantropics (consistindo na América tropical, África e Ásia entre 23.45 ° N e 23.45 ° S, excluindo a Austrália). O resultado demonstrou orçamento líquido composto por perdas brutas de -2,86 PgC ano compensadas por ganhos brutos de -2,97 PgC ano entre continentes. Foram apresentadas flutuações interanuais durante a La Niña de 2011 e o El Niño de 2015-2016. Os resultados encontrados destacam o papel da AGC tropical no orçamento global de carbono e que as flutuações foram controladas predominantemente por biomas semiáridos.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos utilizados para a execução deste trabalho foram os apresentados na figura 6.

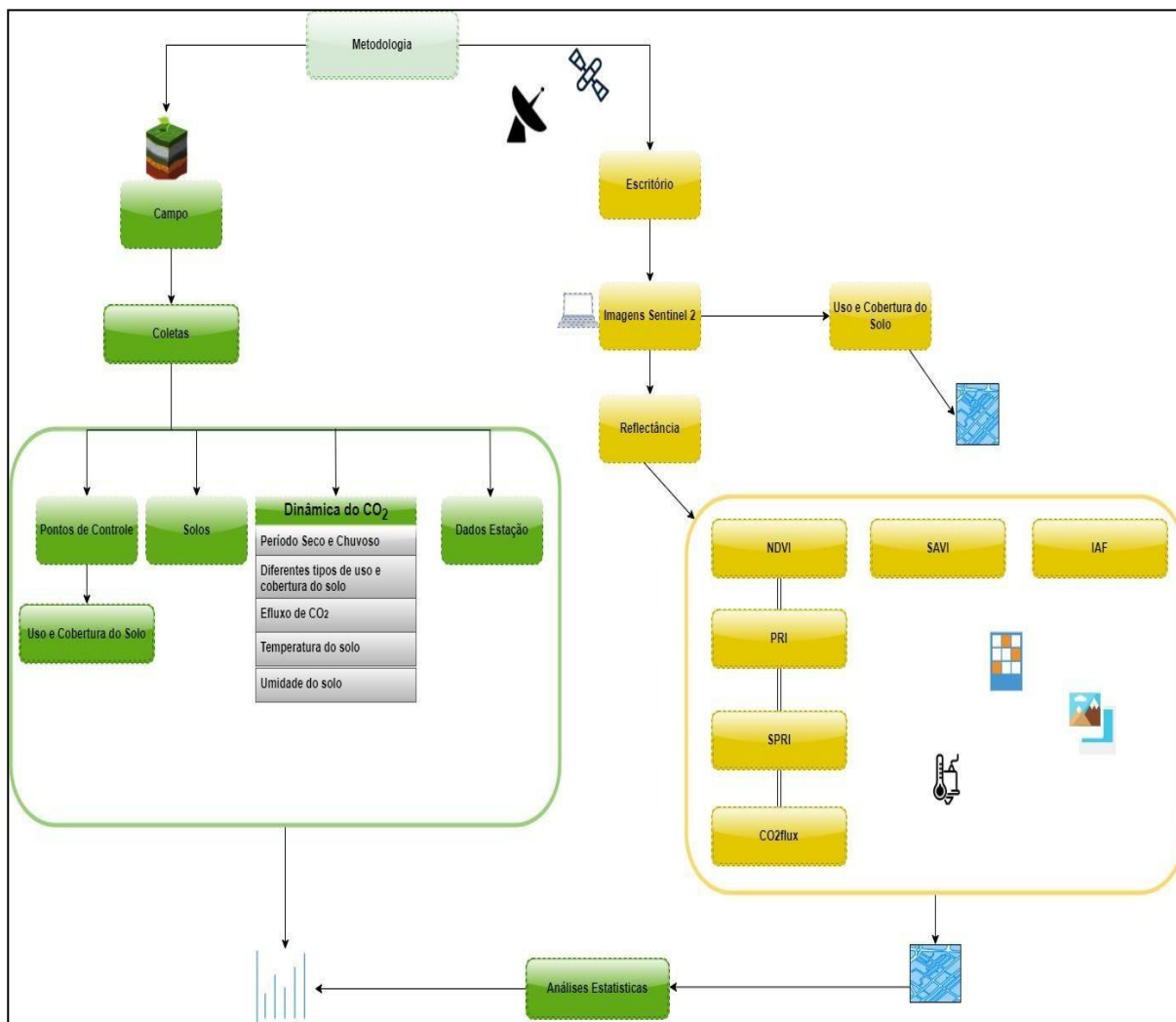


Figura 6: Fluxograma dos procedimentos metodológicos utilizados.

A pesquisa foi dividida em 4 partes. A primeira consistiu no reconhecimento dos tipos de cobertura vegetal e uso da terra da área de estudo. A segunda no monitoramento e medição do efluxo de CO₂ em diferentes tipos de cobertura vegetal e uso da terra. A terceira em relacionar índices biofísicos e dados da dinâmica do CO₂ obtidos em campo e em imagens orbitais. A quarta e última consistiu em avaliar os efluxos de CO₂ do solo com parâmetros pedoclimáticos (pluviosidade, umidade e temperatura do solo) da área em estudo.

De forma sintética, a integração e o processamento dos dados foram feitos no *software* QGIS, sendo implementados, na maior parte, com procedimentos utilizando a versão 3.16.7, de fácil execução e de livre acesso. Para a coleta dos dados de efluxo de CO₂ no campo, foi utilizado um medidor portátil do efluxo de CO₂ (Infrared Gas Analyser modelo LI8100A,

fabricante LI-COR, Lincoln, Nebraska, EUA) - IRGA disponibilizado pela Universidade Federal da Paraíba, por meio do LAESA.

De forma específica, nas coletas em campo foram obtidos: dados de pontos de controle para auxiliar o uso e cobertura da terra; dados de solos nos pontos delimitados; dados do efluxo de CO₂ com o LI8100A, tanto nos períodos secos como chuvosos, em diferentes tipos de uso e cobertura da terra e dados pedoclimáticos através da estação meteorológica. Nos procedimentos de escritório foram levantadas as datas das imagens da área de estudo e obtidas as imagens SENTINEL 2 para poder identificar o uso e cobertura da terra e processar os índices espectrais (IAF, NDVI, SAVI, PRI, SPRI e CO₂*flux*). Conjuntamente, foram realizadas análises para comparar os dados da dinâmica do CO₂ obtidos por imagens orbitais, com aqueles coletados em campo, e gerar os produtos por meio de gráficos e mapas.

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está inserida no Semiárido Brasileiro, segundo a delimitação do Ministério da Integração Nacional de 2005 e a nova delimitação de 2017. Mais especificamente, encontra-se dentro de uma propriedade rural, denominada Fazenda Salambaia (Figura 7), na franja ocidental do planalto da Borborema e entre os municípios de Cabaceiras e Boa Vista, ambos pertencentes ao estado da Paraíba, e a cerca de 180 km da capital, João Pessoa. Esses municípios estão localizados entre as microrregiões do Cariri Paraibano e de Campina Grande, respectivamente (MOREIRA, 1988), na região geográfica imediata de Campina Grande (IBGE, 2017).

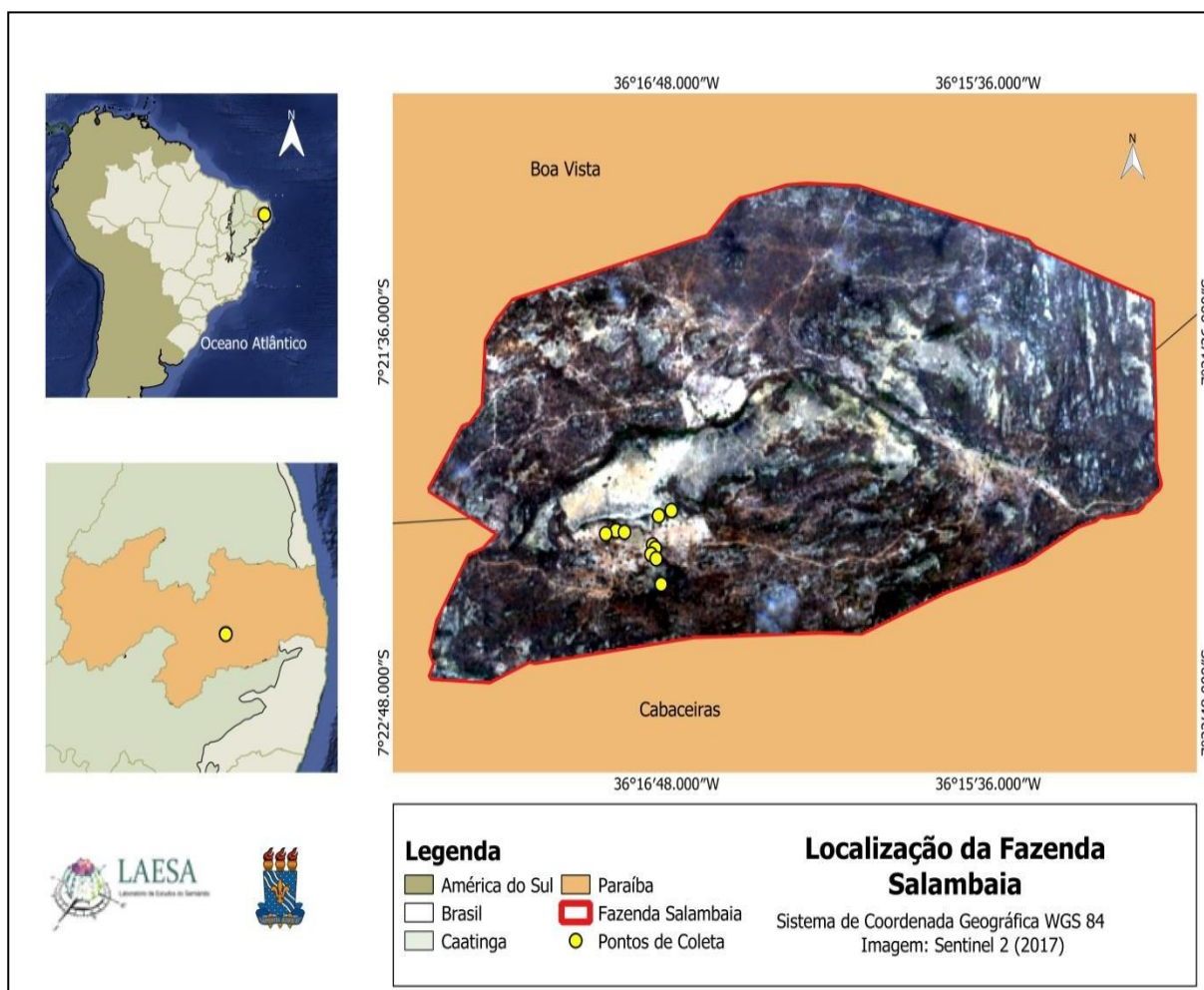


Figura 7: Localização da Fazenda Salambaia, PB. Fonte: Elaborado pela Autora

O Cariri Paraibano é composto por 29 municípios e de acordo com o censo demográfico de 2010, possuía uma população de 185.235 habitantes (hab) e uma densidade demográfica de 17,85 hab por km² (IBGE, 2010). Apresenta os menores índices de precipitação do Semiárido Brasileiro, com médias anuais históricas inferiores a 400mm, além de extensas áreas degradadas, convivendo com pequenas áreas de vegetação relativamente preservadas (COHEN;DUQUÉ, 2001; SOUSA et al., 2011).

O clima, de acordo com classificação de Köppen, é considerado do tipo Bsh – Semiárido quente, com período chuvoso concentrado nos meses de fevereiro a maio (Figura 8) podendo se estender a junho e julho (MEDEIROS, 2015;SOUZA et al, 2011).

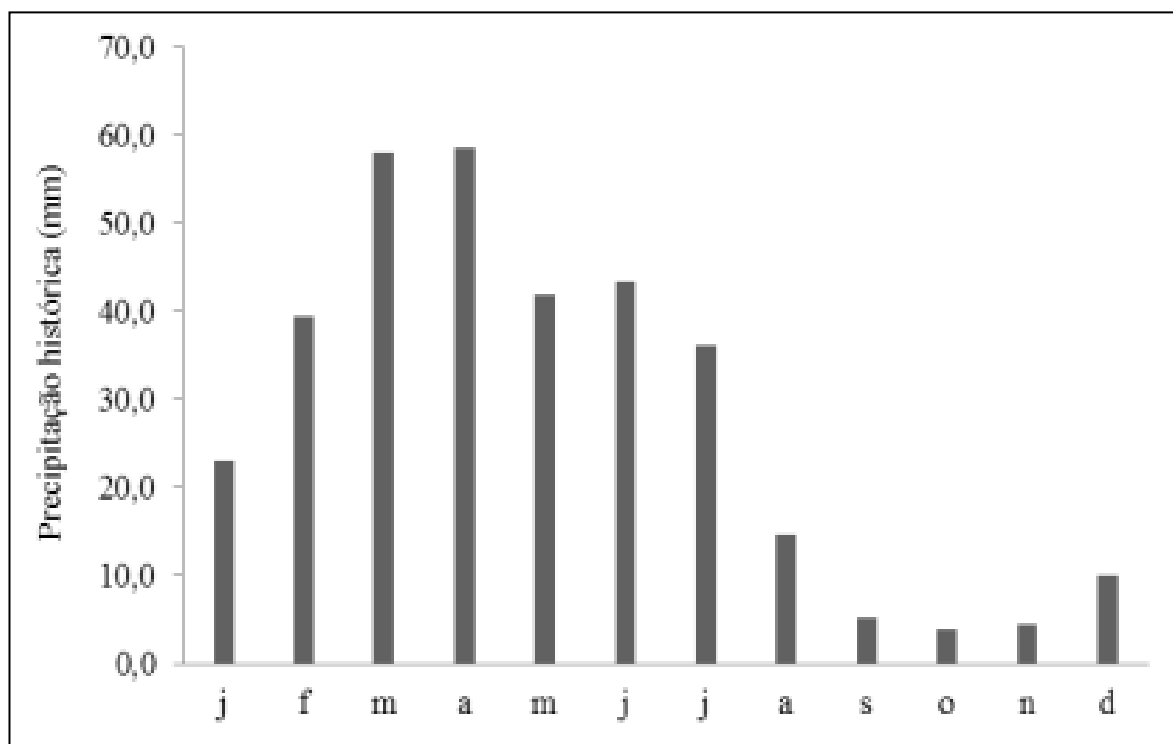


Figura 8: Precipitação histórica do município de Cabaceiras. Fonte: Medeiros (2015).

A Fazenda Salambaia está inserida dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) do Cariri, que é uma unidade de conservação estadual da Paraíba criada em 08 de junho de 2004, pelo decreto Nº 25.083 com a função de preservar os recursos naturais existentes nessa área (PARAIBA, 2004). A APA do Cariri, é considerada pelo Ministério do Meio Ambiente – MMA como umas das áreas de extrema importância de preservação da Caatinga (MMA, 2003), abrangendo 18.560 hectares localizados entre os municípios de Boa Vista, Cabaceiras e São João do Cariri.

Grande parte da propriedade em questão tem a presença de um afloramento rochoso, denominado lajedo da Salambaia. Esse afloramento rochosos faz parte de um conjunto geológico maior, de origem granítica, denominado por Lages et al. (2013) de Plutão Bravo que, com cerca de 50km², é a maior área contínua de afloramentos rochosos do Cariri Paraibano.

Os solos da área de estudo são da ordem dos Neossolos. Baseando-se nas observações de campo e em Luguinho (2018), foram encontrados dois tipos de Neossolos: o Neossolo Regolítico e o Neossolo Litólico, predominantemente.

A litologia é formada por rochas magmáticas e metamórficas, sendo presentes granitos, xistos, migmatitos, gnaisses e filitos (JACOMINE, 1996). Em relação à cobertura vegetal, Ballen et al. (2016) tomando como base a classificação de Souza (2008) estabeleceram as seguintes formações: Caatinga Arbustiva-Fechada, Caatinga Arbustiva Aberta, Caatinga Arbustiva Arborea-Fechada e Caatinga Arbustiva-Semiaberta.

2.2 Caracterização Ambiental

Inicialmente, foi realizado o reconhecimento dos tipos de cobertura vegetal e uso da terra da área de estudo. Para isso foram realizados diversos trabalhos de campo, sendo os primeiros para o reconhecimento da área, escolha dos pontos de coleta e instalação dos anéis onde seriam realizadas as medições do efluxo de CO₂.

O primeiro trabalho de campo teve como objetivo a escolha dos pontos mais representativos das diversas categorias de uso da terra e de cobertura vegetal na Fazenda Salambaia levando-se em consideração o tempo de deslocamento e a metodologia adotada. O campo de reconhecimento e a escolha dos pontos de coleta ocorreu no dia 20 de setembro de 2016, quando também foram instalados 9 anéis para o experimento. No dia 20 de dezembro de 2016 foram realizadas as primeiras medições do efluxo de CO₂, servindo como teste para aprimoramento dos procedimentos, já que a metodologia adotada tinha as datas definidas para os anos de 2017 e 2018, para verificar a variação diária e das dinâmicas temporais durante o ano, nos períodos denominados pré-chuvoso (fevereiro), chuvoso (maio), pré-seca (agosto) e seca (novembro). Vale salientar que foi verificada a necessidade da instalação de 1 anel após a primeira coleta no mês de fevereiro de 2017.

Nos pontos estudados foram fixados 10 anéis de PVC, com 10 cm de comprimento e 20 cm de diâmetro, abrangendo uma área de 317,8 cm². Os anéis de PVC foram instalados no solo com antecedência de 1 semana em relação ao início do período de coleta e isolados para evitar distúrbios que pudessem afetar as medições e qualquer perturbação mecânica ao solo, sendo mantidos desse modo até o final do experimento.

Foram selecionados ao todo 10 pontos para medições e análise de dados (Figura 9), distribuídos espacialmente levando-se em conta características distintas de uso da terra

(Caatinga preservada com pouco antropismo, Caatinga degradada, Caatinga em regeneração e área agrícola).

Esses pontos foram distribuídos em função da influência dos lajedos, elemento marcante na paisagem da área de estudo, onde se tem, como regra, as melhores localidades com Caaatinga preservada, e à medida que afastando dessas formas de relevo, predomina uma caatinga mais antropizada e degradada.

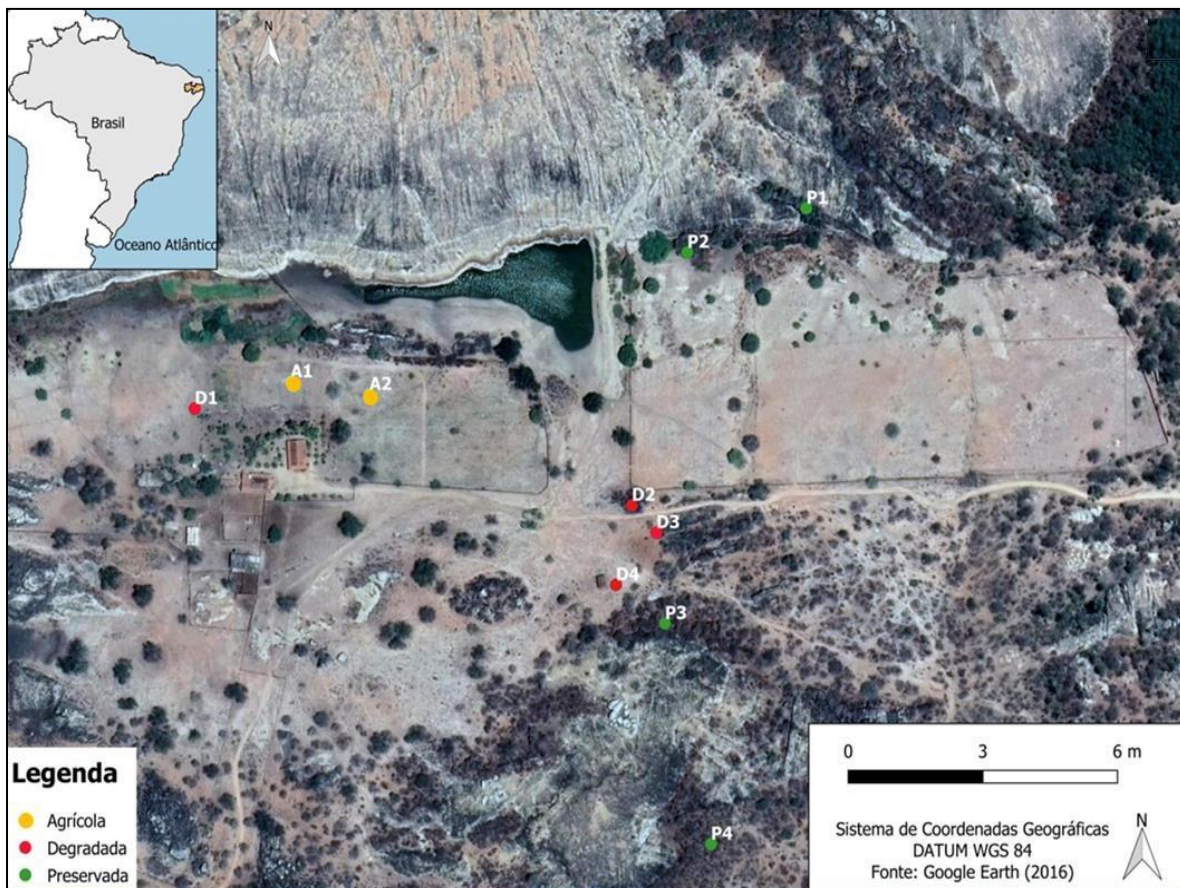


Figura 9: Pontos de coleta na Fazenda Salambaia e seus diversos usos. Fonte: Google Earth e Autora.

As áreas foram divididas e classificadas de acordo com a sua fitofisionomia e as características de uso e cobertura da terra, conforme mostra a tabela 5. Pontos foram distribuídos em áreas agrícolas (A1 e A2), área degradada (D1, D2, D3 e D4), área preservada com pouca intervenção antrópica (P1 e P2) e áreas preservada em processo de restauração (P3 e P4). Para isso foram identificados e levantados dados de altitude, coordenadas geográficas e foi realizada a descrição de cada ponto.

Tabela 5- Características dos pontos de coleta e descrição da área.

Classes dos pontos	Ponto	Altitude (m)	Coordenadas	Descrição da área
Agrícola	A1	502	07°22'14.5" S 36°16'59.3" W	Área agrícola com a presença da palma forrageira e com características de área degradada ao redor da casa sede da fazenda.
	A2	503	07°22'14.8" S 36°16'57.4" W	Área agrícola com a presença da palma forrageira e com características de área degradada.
Área preservada com pouca intervenção antropica	P1	500	07°22'11.6" S 36°16'49.8" W	Base de um afloramento rochoso com presença de Caatinga arbóreo- arbustiva aberta e características de uma área preservada.
	P2	499	07°22'10.6" S 36°16'46.9" W	Fratura de afloramento rochoso com presença de caatinga arboreo-arbustiva aberta, com acúmulo expressivo de serapilheira.
Área preservada em processo de restauração	P3	483	07°22'19.96" S 36°16'50.30" W	Vegetação característica de Caatinga preservada típica, com porte arboreo- arbustivo.
	P4	511	07°22'24.95" S 36°16'49.22" W	Área preservada de Caatinga típica, sem influência direta do afloramento rochoso.
Área degradada	D1	501	07°22'15.13" S 36°17'1.63" W	Área de solo exposto, com histórico de cultivo de milho, sem presença de vegetação.
	D2	503	07°22'17.3" S 36°16'51.1" W	Área de solo exposto, com presença de herbáceas e gramíneas.
	D3	504	07°22'17.9" S 36°16'50.5" W	Área antropizada de solo exposto, com presença de arbustos, herbáceas e gramíneas. Usada para pastagem de gado bovino e caprinos.
	D4	505	07°22'19.1" S 36°16'51.5" W	Área de solo exposto, com presença de arbustos, herbáceas e gramíneas, com solos rasos e compactados. Usada para pastagem de gado bovino e caprinos.

As áreas denominadas agrícolas (Figura 10) são usadas em regime de sequeiro com plantação de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill), são utilizadas como forragem para o gado, principalmente na estação seca. Existem cerca de 1.5 hectares cultivados e localizados próximo a casa sede da Fazenda.



Figura 10: Área agrícola nos períodos seco (Foto da esquerda) e chuvoso (Foto da direita).

As áreas preservadas com pouca intervenção antrópica (Figura 11) situam-se próximas ao afloramento rochoso, denominado como Lajedo da Salambaia. A vegetação apresenta bom estado de conservação, sendo observada vegetação arborea e arbustiva, raramente pastejada, onde pode se observar predominância de *Tocoyena formosa* (Cham. & Schltdl.) K.Schum, *Hymenaea rubriflora* Ducke, *Rhamnidium molle* Reissek, *Cordia rigida* (K.Schum.) Kuntze, *Erythroxylum suberosum* A.St.-Hil. Essas áreas possuem comunidades complexas, solos mais escuros, profundos e maior presença de serapilheira.



Figura 11: Área preservada com pouco antropismo no período seco (Foto da esquerda) e no período chuvoso (Foto da direita).

A área degradada foi submetida ao uso pela pecuária por anos, tendo aspecto de uma savana arbustiva (Figura 12). As áreas de solo exposto apresentam pequenos arbustos em forma de tufo separados por áreas com solo nu, caracterizadas com alguns remanescentes de Caatinga aberta, esparsa e com alta intensidade de pastejo, apresentando em algumas áreas, gramíneas e herbáceas pouco desenvolvidas. Predomina as espécies *Pilosocereus gounellei* (F.A.C.Weber) Byles & Rowley, *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill, *Sida galheirensis* Ulbr., *Erythroxylum suberosum* A.St.-Hil., *Manihot carthagenensis* (Jacq.) Müll.Arg, *Cenostigma nordestinum* Gagnon & G.P. Lewis.



Figura 12: Área degradada no período seco (Foto da esquerda) e no período chuvoso (Foto da direita).

Na área preservada em processo de restauração (Figura 13) predomina a Caatinga arbóreo-arbustiva fechada, mais densa, se comparada com as outras áreas observadas, onde a influência antrópica é menos presente por se encontrar mais distante da casa-sede. Apresenta pouca erosão hídrica e baixa intensidade de pastejo. Predominam as espécies *Aspidosperma pyrifolium* Mart., *Cenostigma nordestinum* Gagnon & G.P. Lewis.



Figura 13: Área preservada no período seco (Foto da esquerda) e no período chuvoso (Foto da direita).

Para o mapeamento dos parâmetros ambientais foram utilizadas imagens de satélite para auxiliar a análise temporal nos anos estudados. Na obtenção de dados por meio do Sensoriamento Remoto foram priorizados dados com maior resolução temporal, resolução espacial e quantidades de imagens obtidas gratuitamente. Assim, no que se refere aos dados de satélite, utilizamos os dados provenientes do satélite Sentinel 2.

As imagens foram adquiridas gratuitamente no site do USGS, através da plataforma *EarthExplorer*, e escolhidas em função de apresentarem pouca ou nenhuma cobertura de nuvens, conforme mostra a tabela 6. As imagens foram selecionadas de acordo com o comportamento das estações chuvosa e seca da região, e a passagem do satélite: fevereiro (período pré-chuvoso), maio (período chuvoso), agosto (pré-seca) e novembro (período seco) para o ano de 2017 e 2018.

Tabela 6- Imagens selecionadas do Sentinel 2.

Satélite	2017	2018
Sentinel 2A e 2B	25/02/2017	25/02/2018
	16/05/2017	26/05/2018
	04/08/2017	04/08/2018
	12/11/2017	07/11/2018

2.3 Instrumentos de Coleta de Dados *in situ*

Outras tecnologias para obtenção de parâmetros ambientais que não se pode deixar de destacar são os instrumentos de coleta *in loco*. De acordo com a sua aplicabilidade, podemos ter equipamentos como estações meteorológicas, sistema de posicionamento global (GPS), sensores, sondas e medidores entre outros.

As medições da emissão de CO₂ na superfície do solo estão relacionadas à respiração do solo, e são resultantes dos processos de respiração do sistema radicular, da decomposição da matéria orgânica do solo e da atividade microbiana (D'ANDREA, 2004). Esses dados são importantes para se estimar o fluxo global de carbono que afetam as mudanças climáticas e para estimá-los são utilizados diversos métodos, dentre eles é possível citar as medições de absorção alcalina e o método do analisador de gás infravermelho ou IRGA.

O IRGA utilizado neste trabalho foi projetado para medir o efluxo de CO₂ do solo no tempo e no espaço, mostrando essa variação em tempo real. A produção de CO₂ do solo é influenciada pela matéria orgânica, temperatura e umidade do solo. As câmaras do LI-8100A foram projetadas para fazer medições rápidas, podendo ser repetidas em diversos locais, fornecendo dados para descrever a variabilidade temporal, minimizando as condições de perturbações ambientais que podem afetar o solo natural. Cada câmara possui um respiradouro de pressão para manter a pressão ambiente sob condições de vento (XU et al., 2006). Integrados ao IRGA podem também ter sensores de temperatura, umidade, entre outros.

Esse equipamento (Figura 14) consiste em uma câmara de medição de 20 cm. Essa câmara monitora as variações de concentração de CO₂ na faixa espectral do infravermelho por meio de espectroscopia. As coletas foram efetuadas para observar a dinâmica do efluxo de CO₂ na área de estudo e fornecer informações mais detalhadas em diferentes tipos de uso e ocupação da terra, temperatura e umidade do solo.



Figura 14: LI8100A utilizado na medição com a câmara de 20 cm. Fonte: Alexandre D'Andrea (2016).

As medições dos efluxos de CO_2 foram realizadas a cada 3 meses, distribuídas em função do comportamento das estações chuvosa e seca da região, com medições nos 10 pontos de coleta a cada 3 horas, durante o período de um dia (24 horas). Assim, as medições foram iniciadas à meia noite (12:00 AM) e encerradas às 3 da manhã do dia seguinte, a fim de tornar possível a obtenção da variação do efluxo diário de CO_2 .

O monitoramento ocorreu nos anos de 2017 e 2018, em oito datas (quatro por ano), divididas conforme a ocorrência das estações seca e chuvosa e fases intermediárias afim de se obter a variação temporal. Em 2017 as medições foram realizadas nos dias: i) 4 de fevereiro (período pré-chuvoso); ii) 27 de maio (período chuvoso); iii) 20 de agosto (período pré-seca), e; iv) 19 de novembro (período de seca), em intervalos de 3 h com 36 amostras por período, totalizando 144 medições. Em 2018, o monitoramento ocorreu nos dias: v) 23 de fevereiro (período pré-chuvoso); vi) 31 de maio (período chuvoso), vii) 19 de agosto (período pré-seca); e; viii) 22 de novembro (período de seca). Assim, foram coletados dados de 10 pontos amostrais, com 9 monitoramentos por ponto em cada coleta, totalizando 90 em cada período.

Ao início da medição, o equipamento foi calibrado, onde foi utilizado um valor da concentração de CO_2 próximo da superfície do solo como referência. A fim de que fosse

possível obter dados confiáveis, foi determinado um tempo para cada ponto de coleta e observado a coeficiente de variação em tempo real de cada ponto. Outro fator verificado foi a estabilização da câmara no tubo, observando-se o contato entre eles, com o intuito de evitar vazamentos de ar. Para a validação dos dados foram observados os coeficientes de variação dos fluxos de CO₂ (Exp_FluxCV), considerando os valores abaixo de 2% (baixos) para comprovar que os dados estavam confiáveis.

Foram monitoradas as variações do CO₂ no interior da câmara por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho, onde foi possível obter o fluxo líquido de CO₂ no solo inserindo a câmara de medição sobre os colares de PVC, sendo adotado para cada ponto o tempo de 2 minutos de medição, com 15 segundos de *pre-purge* (pré-purga) antes e depois (período não computado para o cálculo), a fim de se evitar interferências na medição da concentração de CO₂ na câmara. O tempo utilizado segue padrões indicados pelo fabricante do produto para fluxos moderados a baixos (90 a 120 s) e adotados por trabalhos de outros autores, sendo sugeridos de 90 a 180 segundos de monitoramento pontual (LI-COR, 2015; FARHATE et al, 2018; ZHAO et al., 2018).

A partir disso, o fluxo é calculado por incrementos das concentrações de CO₂ ao longo do tempo. O fluxo foi dado mediante a medição das concentrações de CO₂ emitido pelo solo e computado a partir de cálculos computacionais no próprio equipamento.

Para a obtenção do efluxo de CO₂ no LI8100A foi usada a equação 1:

$$F_c = \frac{10v P_0 \left(1 - \frac{W_0}{1000}\right) \frac{\partial C'}{\partial t}}{RS(T_0 + 273.15)} \quad (1)$$

Onde: F_c é a taxa de efluxo de CO₂ do solo, v é o volume (cm³), P_0 é a pressão inicial (kPa), W_0 é a fração inicial do vapor d'água (mmol mol⁻¹), S é área superficial do solo (cm²), T_0 é temperatura inicial do ar (°C) e $\frac{\partial C'}{\partial t}$ é a taxa inicial de mudança na fração molar de CO₂ corrigida pela água (μmol mol⁻¹).

Dados de precipitação, temperatura do solo e de umidade foram coletados da estação meteorológica próxima às áreas de coleta de dados de CO₂ (Figura 15), com medições realizadas a cada 1 hora para os anos de 2017 e 2018, além dos valores registrados pelos sensores de temperatura e umidade acoplados ao IRGA.



Figura 15: Estação Meteorológica Davis Vantage Pro2 na Fazenda Salambaia.

Foi utilizado também um sensor de temperatura modelo 6000-09 TC conectado a interface do IRGA, introduzido em uma profundidade de 10 cm no solo (onde se tem maior atividade dos organismos edáficos e concentração das atividades biológicas) em cada ponto de medição do fluxo de gás carbônico.

Diferentemente das medições de temperatura, as medições de umidade só foram realizadas para o ano de 2018 devido a indisponibilidade do sensor do equipamento no ano de 2017. O sensor de umidade 8100-204 ML2x foi conectado a interface do IRGA, introduzido na mesma profundidade do sensor de temperatura (10 cm do solo) e realizando monitoramento em todos os 10 pontos de coleta.

Foi calculado o balanço hídrico da área de coleta de dados utilizando a metodologia proposta por Câmara (1997) e aperfeiçoada e disponibilizada por Câmara & Martinez (2012). Para o levantamento do balanço hídrico deve se levar em consideração os dados de precipitação e temperatura da área estudada, além das características texturais das formações superficiais e a profundidade das raízes (CÂMARA, BATTLE & OLMO, 2004). Os dados de precipitação para o cálculo do balanço hídrico foram dos anos 2017 e 2018, , enquanto os dados de temperatura foram obtidos pela estação meteorológica instalada na Fazenda Salambaia. Além disso, foram inseridos os dados referentes à textura do solo e à capacidade de retenção de água, de acordo com a tabela 7, além dos tipos de vegetação, com base em Câmara, Battle e Olmo (2004).

Tabela 7 - Capacidade de retenção de acordo com a textura da formação superficial.

Areia fina	100
franco arenoso fino	150
franco limoso	200
franco argiloso	250
Argila	300

Fonte : Cámara; Batlle e Olmo (2004).

2.4 Análise Granulométricas e de Fertilidade dos Solos

Foram abertos 7 perfis de solo com profundidade de 0-20 cm, próximos aos pontos de monitoramento de efluxo de CO₂ conforme Santos et al. (2005). Os perfis foram descritos conforme o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos – SiBCS (SANTOS et al., 2018) e o Sistema de Taxonomia do Solo - ST (SOIL SURVEY STAFF, 2014). Todos os horizontes foram amostrados e suas propriedades físico-químicas foram identificadas conforme métodos adequados para solos tropicais (TEIXEIRA et al., 2017). As amostras foram coletadas, sendo preparadas e separadas após a coleta. As amostras foram enviadas para o Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV), para a realização das análises químicas e físicas, que serão detalhadas a seguir.

As amostras foram secas ao ar, destorroadas e tamisadas em peneira de 2 mm. O pH do solo em água foi determinado em uma solução 1:2,5 (solo: água deionizada). A acidez potencial (H + Al) foi determinada por extração com acetato de cálcio 0,5 mol/L ajustado a pH 7,0. O teor de Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ foram extraídos por KCl 1 mol L⁻¹ e dosados por espectrômetro de absorção atômica.

Os teores de K⁺ e Na⁺ foram dosados por espectrofotômetro de emissão após extração com acetato de amônio ajustado a pH 7,0. A partir desses resultados foram calculadas a soma de bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + Na⁺ + K⁺), a capacidade de troca catiônica efetiva (t = SB + Al³⁺), a capacidade de troca catiônica total a pH 7,0 (T = t + (H + Al)) e a saturação por bases (V% = SB/ T). Os teores de areia, silte e argila foram determinados após agitação lenta com NaOH 0,1 M pelo método da peneira-pipeta.

O teor de carbono orgânico do solo foi determinado por digestão ácida de acordo com o método Walkley-Black (SILVA e MENDONÇA, 2007). A matéria orgânica (MO) foi determinada a partir do carbono orgânico obtido pelo método de Walkley-Black com um fator

de multiplicação que considera o valor médio de 58% de carbono orgânico na matéria orgânica (carbono orgânico x 1,724). O teor de N total foi determinado pelo método de destilação (YEOMANS e BREMNER, 1988) por digestão sulfúrica pelo método de Kjeldahl e titulação (EMBRAPA, 1997).

Amostras indeformadas foram coletadas com anéis volumétricos para definição da densidade do solo e da densidade de partículas. A partir de disso foram calculadas a porosidade total, microporosidade e macroporosidade (DONAGEMA et al., 2011).

2.5 Processamento dos Dados

2.5.1 Identificação do Fluxo de CO₂ no solo com o IRGA (LI8100A)

O processamento dos dados obtidos no LI8100A foi efetuado com o *software* SoilFluxPro, fornecido de forma gratuita no site da LI-COR, empresa fornecedora do equipamento de campo. A partir do *software* SoilFluxPro foi possível realizar o processamento, a avaliação e recomputar os dados armazenados na memória do equipamento. O SoilFluxProTM é um software livre com aplicação compatível para analisar os dados do LI8100A. Com esse *software* é possível gerar gráficos, recomputar dados, analisar resultados e criar arquivos .kml (no caso do equipamento possuir GPS integrado). Posteriormente, os dados foram transformados em planilhas do EXCEL e tabulados, sendo extraídas informações da data e hora de coleta e efluxo de CO₂ observando o coeficiente de variação de cada medição. Os dados que apresentaram coeficiente de variação alto (< 2,0) foram descartados, devido a falta de confiabilidade. Os dados foram processados, tabulados, e foram realizadas as análises estatísticas e gerados os gráficos.

2.5.2 Processamento das Imagens Sentinel 2

As imagens do satélite Sentinel 2 possuem 13 bandas, representadas por vários intervalos de comprimentos de onda. Para o processamento das imagens elas foram transformadas em formato TIFF. como a banda 1 (Aerossol), banda 9 (Vapor d'água) e banda 10 (Cirrus) não são necessárias para o processamento e obtenção dos índices nessa Tese, elas foram excluídas.

O processamento das imagens Sentinel 2 foi realizado no *software* gratuito QGIS versão 3.16.7, com a utilização e do plugin *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP).

Essa fase foi constituída por duas etapas: de pré-processamento e cálculo de reflectância da superfície; da classificação supervisionada; e de geração dos índices de vegetação, do índice de reflectância e do cálculo de sequestro de carbono. O *software* QGIS também foi utilizado para a confecção dos mapas temáticos.

2.5.2.1 Pré Processamento e Cálculo da reflectância da superfície

Na etapa de pré-processamento, foi realizada a correção atmosférica das imagens por banda, reamostragem, reprojeção, empilhamento de bandas e recorte. Para a correção foi usado o *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) desenvolvido por Congedo (2016). A correção atmosférica das imagens foi realizada no *software* QGIS, por meio do método de subtração de objetos escuros, o *Dark Object Subtraction* (DOS). O DOS é a mais simples e mais usada das correções atmosféricas baseadas em imagens e tem o propósito de melhorar a estimativa da reflectância da superfície da terra. As imagens do Sentinel 2 foram convertidas para brilho antes do cálculo do DOS. O cálculo do *Dark Object* foi dado por Sobrino, et al., (2004):

$$LD01\% = 0.01 * [(ESUN\lambda * \cos\theta_s * T_z) + E_{down}] * T_v / (\pi * d^2) \quad (2)$$

Onde:

θ_s = Ângulo do zênite solar em graus, que é igual a $\theta_s = (90^\circ - \theta_e)$, onde θ_e é a elevação do sol;

$ESUN\lambda$ = Irradiâncias eixo-atmosféricas solares médias;

T_z é a transmitância atmosférica na direção da iluminação;

E_{down} é a irradiância difusa para baixo;

T_v é a transmitância atmosférica na direção de visualização;

d = Distância Terra-Sol em unidades astronômicas.

Para as seguintes variáveis foram adotados os valores de acordo com Moran et al., (1992):

$T_v = 1$; $T_z = 1$ e $E_{down} = 0$.

O brilho do caminho (L_p) foi dado por Sobrino, et al., (2004) na equação 3:

$$L_p = M_L * DN_{min} + A_L - 0.01 * ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s / (\pi * d^2) \quad (3)$$

Onde:

M_L = Fator de reescalonamento multiplicativo específico de banda dos metadados Sentinel (RADIANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda);

DN_{min} = radiância obtida com esse valor de contagem digital;

A_L = Fator de reescalonamento aditivo específico de banda dos metadados Landsat (RADIANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda);

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiâncias eixo-atmosféricas solares médias;

θ_s = Ângulo do zênite solar em graus, que é igual a $\theta_s = (90^\circ - \theta_e)$, onde θ_e é a elevação do sol;

d = Distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

O cálculo da reflectância da superfície da terra foi feito com a equação 4:

$$p = [\pi * (L_{\lambda} - L_p) * d^2] / (ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s) \quad (4)$$

Onde:

L_{λ} = Radiância espectral na abertura do sensor (radiância no satélite);

L_p = O brilho do caminho;

d = Distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiâncias eixo-atmosféricas solares médias;

θ_s = Ângulo do zênite solar em graus, que é igual a $\theta_s = (90^\circ - \theta_e)$, onde θ_e é a elevação do sol;

Os valores das Irradiâncias eixo-atmosféricas solares médias (ESUN) para o sensor Sentinel 2 (fornecidos nos metadados da imagem) são ilustrados na tabela 8.

Tabela 8 - Valores de ESUN para o satélite Sentinel 2.

Banda Sentinel 2	ESUN λ [W / (m ² * μ m)]
1	1913.57
2	1941.63
3	1822.61
4	1512.79
5	1425.56
6	1288.32
7	1163.19
8	1036.39
8 ^a	955.19
9	813.04
10	367.15
11	245.59
12	85.25

Fonte: Congedo (2016)

Assim, foram convertidos os valores da reflectância do topo da atmosfera superfície (TOA) para valores de reflectância da superfície (BOA). As imagens obtidas no site da USGS possuem o sistema WGS84 UTM 24S e foram reprojetadas para SIRGAS 2000 UTM 24S por ser o sistema oficial adotado no Brasil. Posteriormente as bandas foram empilhadas e recortadas com o limite da Fazenda Salambaia.

2.5.2.2 Classificação supervisionada

A identificação do uso e cobertura da terra foi realizada por meio da classificação supervisionada, tendo como base as amostras de treinamento coletadas em campo e a definição das classes de acordo com o manual de uso da terra do IBGE e o mapeamento da coleção 5 de uso da terra do MapBiomas (IBGE, 2013; MapBiomas, 2020). Assim, os parâmetros para as classes foram adotados de acordo com a tabela 9:

Tabela 9 - Classes adotadas para a classificação do uso e cobertura da terra.

Classes adotadas	Sistema de Classificação de uso e cobertura da terra (IBGE, 2013; MapBiomas, 2020)
Água	Água ¹ , Águas Continentais ² ; Corpos D'água ³ ; Rio, Lago e Oceano ⁴ .
Vegetação Nativa	Áreas de Vegetação Natural ¹ ; Área Florestal ² ; Floresta ³ ; Floresta Natural ⁴ .
Agrícola	Áreas Antrópicas Agrícolas ¹ ; Culturas Temporárias ² ; Agropecuária ³ ; Agricultura ⁴ .
Solo Exposto	Outras Áreas ¹ , Áreas Descobertas ² ; Área não vegetada ³ ; Outras Áreas não vegetadas.
Afloramento Rochoso	Outras Áreas ¹ , Áreas Descobertas ² ; Formação Natural não Florestal ³ ; Afloramento Rochoso ⁴ .

¹Classes ²Subclasses (IBGE, 2013) ³Classes Nível 1 ⁴Classe Nível 2 ou subclasses (MapBiomas, 2020)

A validação da classificação foi realizada através do plugin AcATaMa no *software* QGIS por meio da amostragem aleatória estratificada. Esse tipo de amostragem permite que se defina um número específico de amostras e que se divida a área de interesse em áreas menores denominadas estratos. Assim, o AcATaMa, através de uma imagem classificada faz o cálculo e a avaliação da precisão de acordo com Olofsson et al., (2014) através da equação 5:

$$O = \sum_{j=1}^q p_{jj} \quad (5)$$

2.5.3 Índices de Vegetação: NDVI, SAVI e IAF

Para obter informações sobre os parâmetros biofísicos da vegetação com o uso dos dados de imagens de satélite foram utilizados os índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF. Os índices utilizados fazem uso da relação inversa entre a banda do vermelho e do infravermelho próximo.

O NDVI foi proposto e desenvolvido por Rouse et. al. (1974). É um índice de vegetação muito utilizado para o monitoramento do desenvolvimento da vegetação e através dele é possível obter as mudanças sazonais e interanuais da vegetação. Para o cálculo desse índice foi usada a equação 6 (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{(P_{nir} - P_{red})}{(P_{nir} + P_{red})} \quad (6)$$

Onde:

P_{nir} = refletância da banda do infravermelho próximo;

P_{red} = refletância da banda do vermelho.

Assim, para a obtenção do NDVI foram utilizadas as bandas 4 (vermelho) e banda 8 (infravermelho próximo), do satélite Sentinel 2.

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) foi proposto por Huete em 1988 como uma adaptação do NDVI, com a pretensão de minimizar o efeito do solo na detecção da vegetação, incorporando um constante de ajuste do solo, denominada como fator L. Uma vez que os solos exercem uma influência muito forte em áreas de Caatinga, o uso desse índice é de elevada importância. Foi calculado pela equação 7:

$$SAVI = \frac{(1+L)(P_{nir}-P_{red})}{(P_{nir}+P_{red}+L)} \quad (7)$$

Onde:

L = 0,5 é o fator de ajuste do solo para uma vegetação intermediária.

P_{nir} = refletância da banda do infravermelho próximo;

P_{red} = refletância da banda do vermelho.

O Índice de Área Foliar (IAF) trata da razão entre a área foliar da vegetação por unidade de área utilizada. Foi medido pela expressão empírica sugerida por Allen et al. (2002) aplicando a Equação 8:

$$IAF = - (\ln((0,69-SAIV)/0,59))/0,91 \quad (8)$$

2.5.4 Índice de Vegetação Fotossintético (PRI)

Foi criado por Gamon et al. (1997) para expressar a relação entre as bandas do verde e azul. Segundo Rahman et al. (2000), pode ser relacionado com a eficiência do uso da luz no processo fotossintético. Para o cálculo do Índice de refletância fotoquímica (PRI) foi usada a equação 9 (GAMON et al., 1997):

$$PRI = (r1 - r2) / (r1 + r2) \quad (9)$$

Onde:

r1 = refletância da banda do azul equivalente a banda 2 do Sentinel;

r2 = refletância da banda do verde equivalente a banda 3 do Sentinel.

2.5.5 Índice de Reflectância Fotossintético reescalado para valores positivos (sPRI)

Após calcular o PRI, foi calculado o índice sPRI (equação 10), seguindo a metodologia proposta por Rahman et al. (2000). O índice PRI e sPRI têm o mesmo significado, a diferença é que o sPRI passa a ser representado em uma escala que varia entre 0 e 1 para, assim, ficar com a mesma escala do NDVI (RAHMAN et al., 2000):

$$\text{sPRI} = (\text{PRI} + 1)/2 \quad (10)$$

2.5.6 Sequestro de Carbono (CO₂flux)

Com a combinação dos índices NDVI e PRI, segundo a metodologia de Rahman et al. (2000), é gerado o índice CO₂flux. Para calcular o fluxo de CO₂ foi utilizada a equação 11 (BAPTISTA, 2003):

$$\text{CO}_2\text{flux} = \text{NDVI} \times \text{sPRI} \quad (11)$$

2.6 Análises Estatísticas

Após o processamentos e tabulação dos dados, os arquivos foram convertidos para serem inseridos no *software* R. As análises estatísticas foram realizadas com o intuito de verificar as relações dos dados coletados *in situ* com os índices biofísicos, parâmetros pedoclimáticos e os dados da dinâmica do CO₂.

Foram realizadas análises descritivas, calculando-se a média ($\bar{X}$), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV) e foram também calculados o teste de hipótese t de Student, a 5% de probabilidade e a correlação de Pearson.

Para avaliar os dados do efluxo de CO₂, os dados foram submetidos à análises estatísticas, usando um teste de hipóteses (Test t de Student) a 5% de probabilidade para verificar a existência de diferença estatística. Foram realizadas para todos os pontos e para as

variações sazonais, para isso foram separadas de acordo com o período de coleta para melhor representar a relações entre essas variáveis.

Para avaliar possíveis relações entre os dados *in situ* do efluxo de CO₂, propriedades dos solos, umidade do solo e a temperatura do solo, foi calculada a correlação de Pearson. O método do coeficiente de correlação de Pearson (r) é adimensional e varia de -1 a 1. O cálculo é feito pela seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (12)$$

A correlação pode ser positiva ou negativa, variando de muito fraca a muito forte (Tabela 10). Os valores foram classificados de acordo com Shimakura (2006) conforme mostra a tabela 10:

Tabela 10 - Classificação das correlações

Coeficiente de Correlação (- ou +)	Correlação
0.00 a 0.19	Muito Fraca
0.20 a 0.39	Fraca
0.40 a 0.69	Moderada
0.70 a 0.89	Forte
0.90 a 1.00	Muito Forte

Fonte : Shimakura (2006)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos tipos de uso e cobertura da terra

A distribuição do uso e cobertura da terra na Fazenda Salambaia referente ao ano de 2017 pode ser visualizada na figura 16. Foi avaliada a acurácia da classificação com precisão geral alta (0,91). Nesse contexto, as categorias foram definidas tomando como base o manual de uso da terra do IBGE, e o mapeamento da coleção 5 de uso da terra do MapBiomas (IBGE, 2013, SOUZA et al, 2020). As classes foram divididas em: vegetação nativa, áreas agrícolas, solo exposto, afloramento rochoso e água.

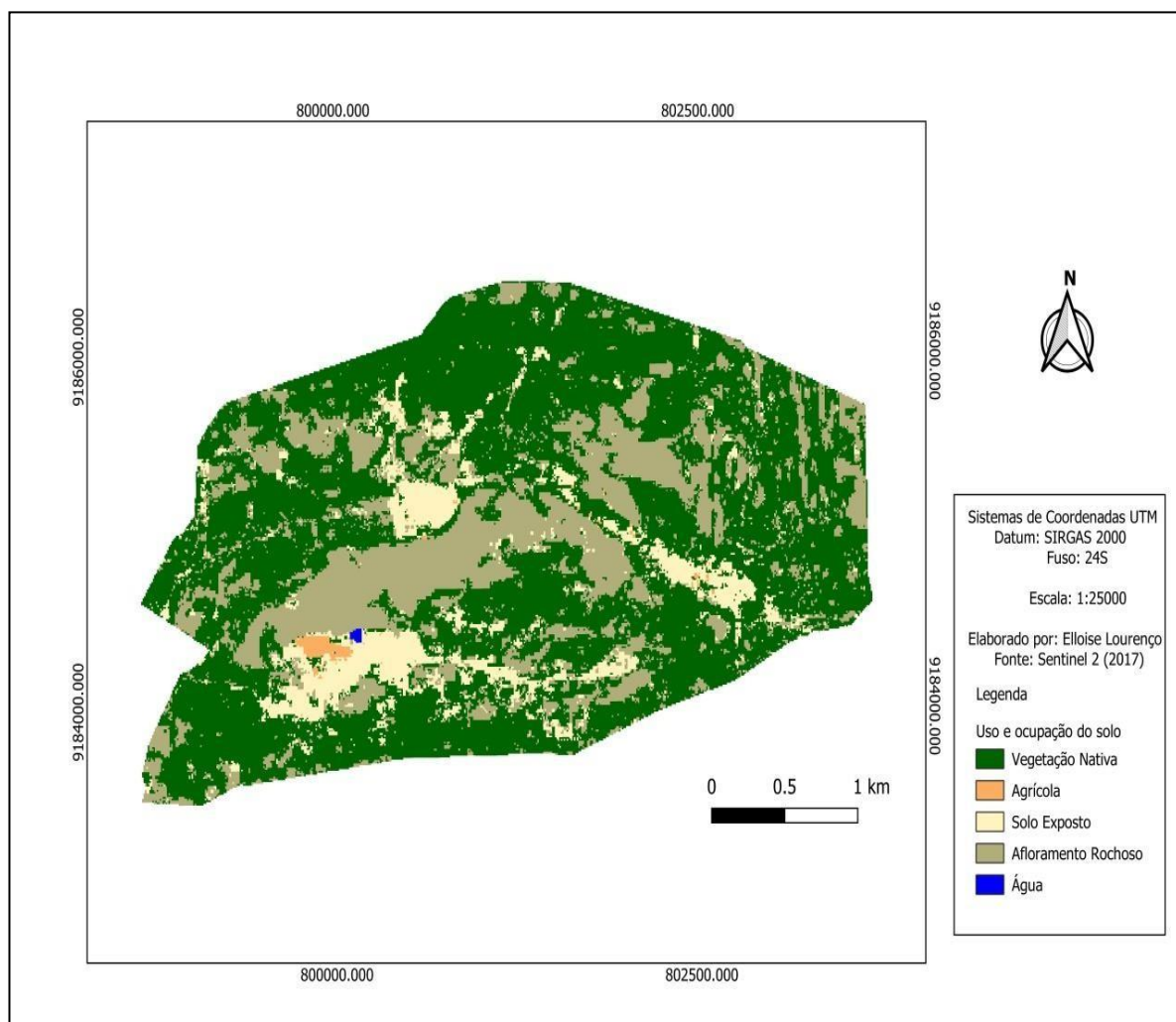


Figura 16: Uso da Terra da área de estudo para o ano de 2017.

A classe Vegetação Nativa compreendeu todas as áreas de Caatinga arbóreo/abustiva e herbácea. A classe Agrícola compreendeu todas as áreas antropizadas cujo uso no período analisado era para cultivo de culturas anuais e temporárias, sendo localizadas próximas a sede da Fazenda e com a plantação de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill).

O relevo de grande parte da propriedade, de acordo com Lunguinho (2018), varia de plano a suave ondulado, favorecendo o uso agropecuário, onde encontra-se a Caatinga degradada. Sendo assim, a classe Solo Exposto foi encontrada nas áreas onde se encontravam grande parte dos solos degradados, usada para pastejo do gado presente na Fazenda.

A classe Afloramento Rochoso levou em consideração as formações pediplanares, onde ocorrem as rochas expostas. Para a classe Água foi somente considerado o açude da propriedade, visto que não foram encontrados outros reservatórios com volume considerável.

Observou-se que as classes Vegetação Nativa e Afloramento Rochoso foram as mais relevantes.

Em contrapartida, no ano de 2018 (figura 17) notou-se um aumento da vegetação nativa em algumas localidades, provavelmente devido ao fim da seca histórica que vinha acontecendo na região, havendo elevada presença de vegetação herbácea. A acurácia da classificação teve precisão geral alta (0,90).

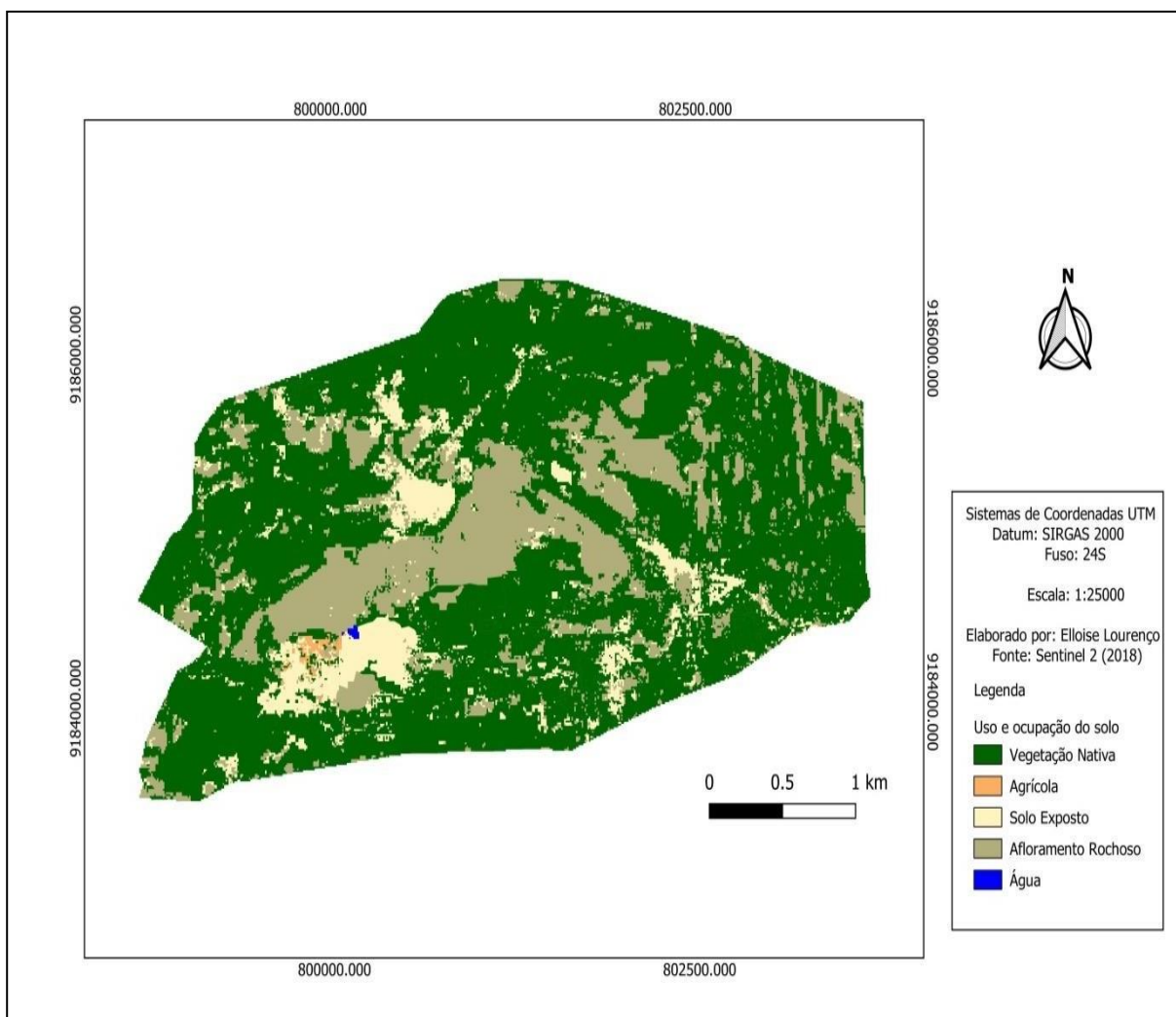


Figura 17: Uso da Terra da área de estudo para o ano de 2018.

Outras áreas, em contrapartida, principalmente próximas a casa-sede, registraram aumento de áreas com Solo Exposto em decorrência do sobrepastoreiro e retirada de algumas espécies vegetais para obra de aumento do represamento de águas pluviais (Figura 18) da propriedade.



Figura 18: Reservatório de água da Fazenda Salambaia no ano de 2018.

Afim de comparar o uso da terra da área de estudo, foram quantificados e obtidas suas porcentagens cujos resultados são apresentados na tabela 11.

Tabela 11- Área em km², porcentagem e mudança do uso e cobertura da terra.

Classes	2017		2018		Mudança	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Vegetação Nativa	6556,98	62,91	6791,57	65,17	234,19	3,57
Agrícola	50,34	0,48	30,66	0,29	-19,68	-39,09
Solo Exposto	1006,97	9,66	899,34	8,63	-107,63	-10,69
Afloramento Rochoso	2803,03	26,89	2696,37	25,87	-106,66	-3,81
Água	5,19	0,06	4,58	0,04	-0,61	-11,75

Os resultados obtidos demonstram o comportamento devido a diferença de chuva nos anos de 2017 e 2018. Observa-se que houve um aumento de 234,19 km² (3,57%) na Vegetação Nativa no ano de 2018, enquanto para as outras classes (Agrícola, Solo Exposto, Afloramento Rochoso e Água), nota-se diminuição. A classe afloramento rochoso, não registrou mudanças importantes, indicando que o uso e ocupação nessas localidades não se alteram faz muito tempo.

3.2 Propriedades dos solos

As análises pedológicas foram feitas nos 7 pontos estudados na Fazenda Salambaia, cujas localizações podem ser observadas na Figura 19.

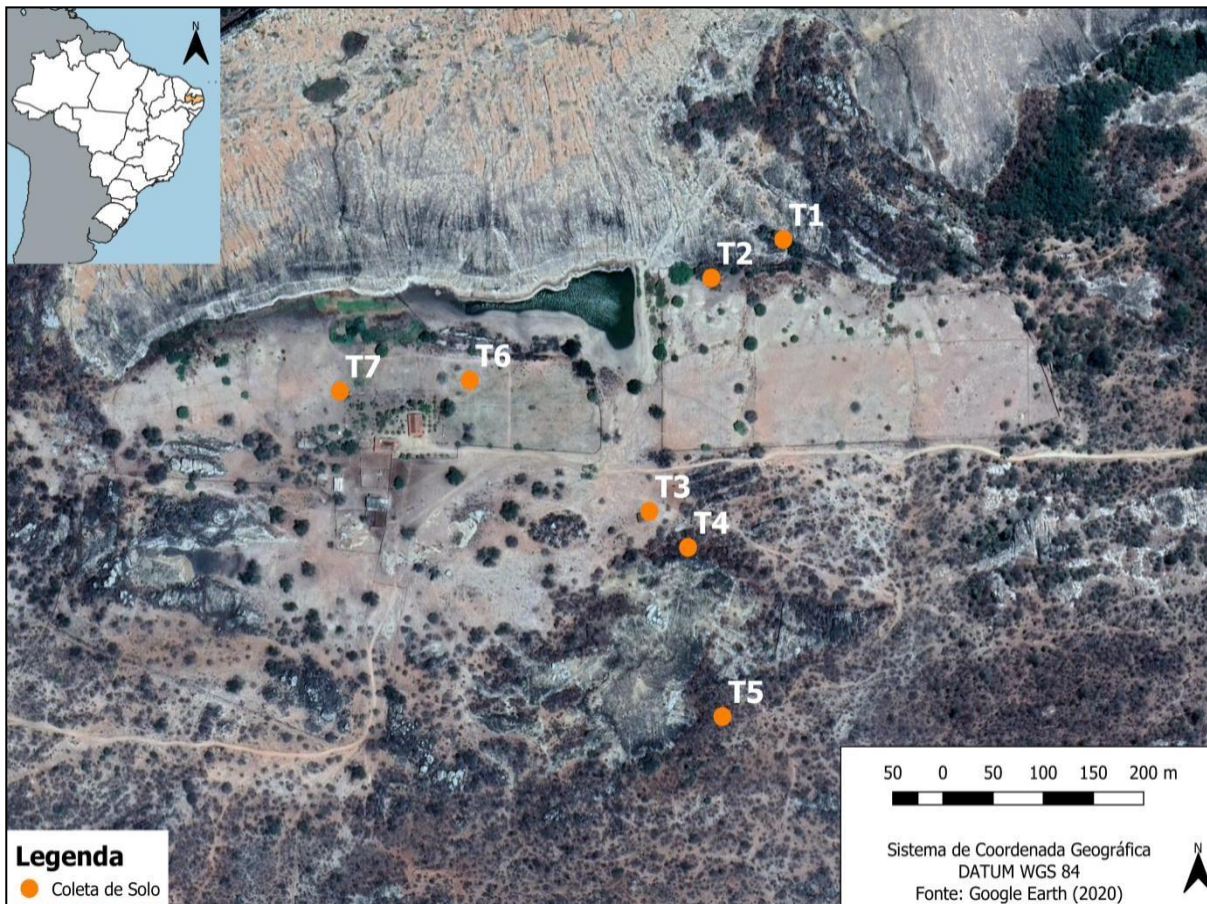


Figura 19: Mapa de pontos de coleta de perfis de solo na Fazenda Salambaia.

Os 7 perfis se localizaram próximos aos pontos de coleta de efluxo de CO_2 (figura 6), selecionados de acordo com o uso e cobertura da terra, sendo classificados de acordo com o SiBCS (SANTOS et al, 2013) e o SATS (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

Os solos identificados nos pontos estudados são os mais expressivos na Caatinga (JACOMINE, 1996). Segundo Lunguinho (2018), os Neossolos Litólicos são mais comuns em áreas de pedimento (caaatinga alterada) e os Neossolos Regolíticos em áreas de sopé coluvial (base), ou seja, mais próximas do afloramento rochoso, sendo encontrada neste estudo também nas áreas de fratura do lajedo. Foram identificados dois tipos de solos, Neossolo Regolítico nos perfis T1 e T4 e Neossolo Litólico nos perfis T2, T3, T5, T6 e T7, conforme mostra a tabela 12.

Tabela 12- Classificação, descrição dos perfis de solos e relação com os pontos de ECO2.

Perfil/Ponto	Coordenadas	SiBCS	SATS	Altitude (m)	Descrição
T1/P1	07°22'10.45" S 36°16'47.21" W	NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico léptico Êutrico	‘Vermic’ Aridic Urtorthents	498	Área preservada com pouca intervenção antrópica.
T2/P2	07°22'11.64" S 36°16'49.55" W	NEOSSOLO LITÓLICO Hístico frangipânico Arênico	Aridic Humusteps	482	Área preservada com pouca intervenção antrópica
T3/D4	07°22'18.84" S 36°16'51.56" W	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico	‘Fragipan’ Lithic Ustorthents	484	Área degradada
T4/P3	07°22'19.96" S 36°16'50.30" W	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico Saprolítico	Vermic Urstorthents	483	Área em processo de restauração
T5/P4	07°22'25.18" S 36°16'49.19" W	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico Fragipânio	‘Vermic’ Aridic Lithic Ustorthents	510	Área em processo de restauração
T6/A2	07°22'14.80" S 36°16'57.40" W	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico	‘Fragipan’ Lithic Ustorthents	494	Área agrícola
T7/D1	07°22'15.13" S 36°17'1.63" W	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico	‘Fragipan’ Lithic Ustorthents	492	Área degradada

Fonte: Adaptado pelo Autor.

A presença de horizonte hístico (orgânico) ou húmico (mineral com alto teor de matéria orgânica) influencia diretamente a dinâmica de carbono e o fluxo de CO₂. Na área degradada, a presença de fragipan no T3 já indica restrições ao aprofundamento do sistema radicular e, conseqüentemente, à produção de CO₂ pelas raízes. Isso deve ser levado em consideração: relacionar características do solo em cada ponto com condições favoráveis ou não para a produção de CO₂ e o seu movimento do solo para a atmosfera. Também importa o solo em determinado ponto ser distrófico ou eutrófico. Isso influencia a dinâmica de decomposição da

MOS e, conseqüentemente, a emissão do CO₂ gerado. RR P1 (T1) e P3 (T4), ambos áreas preservadas. Os demais são RL. Portanto, dois dos pontos preservados são RR (Neossolo Regolítico), mais profundos, um húmico com caráter eutrício e outro distrófico saprolítico. Para a realização das análises granulométricas e de fertilidade, foram coletadas amostras dos horizontes mais próximos a superfície (A), entre 0 e 20 cm, conforme mostra a tabela 13.

Tabela 13 - Frações granulométricas e atributos de fertilidade dos perfis.

Atributos	Pontos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Classe Textural	Areia	Franco-Arenosa	Franco-Arenosa	Franco-Arenosa	Franco-Arenosa	Franco-Arenosa	Franco-Arenosa
Areia Grossa (dag kg⁻¹)	82,9	53,8	53,1	55,3	44,2	31,7	28,7
Areia Fina (dag kg⁻¹)	7,3	17,1	20,3	21,2	26,4	27,7	26,6
Silte (dag kg⁻¹)	1,1	12,1	16,8	10,6	14,9	21,1	25,9
Argila (dag kg⁻¹)	8,7	17,0	9,8	12,9	14,6	19,5	18,8
pH H₂O	5,94	5,65	6,23	5,1	5,95	5,46	6,76
P (mg dm⁻³)	24,1	31,2	19	17,4	9,5	62,1	914,1
K⁺ (cmol dm⁻³)	129	103	355	129	215	88	478
Na⁺ (cmol dm⁻³)	8,3	26,5	28,5	20,4	18,4	81,12	12,33
Ca²⁺ (cmol dm⁻³)	3,31	6,96	4,16	4,32	7,07	4,84	9,06
Mg²⁺ (cmol dm⁻³)	0,74	1,56	1,3	1,48	1,77	2,61	3,45
Al³⁺ (cmol dm⁻³)	0	0	0	0,19	0	0	0
H + Al (cmol dm⁻³)	1,4	6,4	0,9	5,3	2	3,7	1,4
SB (cmol dm⁻³)	4,42	8,9	6,49	6,22	9,47	8,03	13,79
t (cmol dm⁻³)	4,42	8,9	6,49	6,41	9,47	8,03	13,79
T (cmol dm⁻³)	5,82	15,3	7,39	11,52	11,47	11,73	15,19
V (%)	75,9	58,2	87,8	54	82,6	68,5	90,8
MO (dag kg⁻¹)	1,84	14,49	0,92	5,27	3,95	3,13	5,61
N (dag kg⁻¹)	0,062	0,330	0,062	0,163	0,172	0,134	0,239
C_{org}	1,07	8,40	3,06	2,29	1,82	0,5	3,25

*P= Fosforo, (Ca²⁺, Mg²⁺, Na²⁺, K⁺) = base, SB = soma de bases trocáveis, t = capacidade de troca catiônica efetiva, T = capacidade de troca catiônica total a pH 7,0, V = saturação por bases, MO = matéria orgânica, N = Nitrogênio, C_{org} = Teor de Carbono Orgânico.

Nos perfis T1 e T2 o horizonte A variou de 0 a 5 cm, nos perfis T3, T6 e T7 o horizonte A variou de 0-20 cm e nos perfis T4 e T5 o horizonte A variou de 0 a 8cm. As propriedades, como textura e propriedades químicas, são importantes controladores da composição da comunidade de plantas (HOFHANSL et al., 2020). As amostras das áreas preservadas, degradadas e agrícolas são arenosas e apresentaram domínio de textura franco arenosa, sendo que no perfil T1, a textura é arenosa. Nos três casos, a areia grossa é a partícula dominante, sendo os perfis das áreas agrícolas mais argiloso. Tais relações entre propriedades edáficas e composição de espécies vegetais foram propostas para outras regiões tropicais e podem ser explicadas pelo fato de que as propriedades edáficas locais afetam a disponibilidade de recursos de água e nutrientes nos solos tropicais e, assim, possibilitam a ocorrência de comunidades de plantas com funções ecológicas distintas, diferentes materiais parentais e tipos de solo (PRADA et al., 2017).

Em relação à acidez do solo, ambos os tratamentos apresentam solos ácidos, tendo o tratamento T4 o valor de pH mais ácido (5,1). Ambos solos apresentam argila de alta atividade, tendo Ca^{2+} como base de dominância no complexo de troca. A matéria orgânica do solo está condicionada a presença dos compostos orgânicos, substâncias orgânicas, restos de organismos demonstra maior presença na base do lajedo (T2).

Convertendo MOS em C orgânico no horizonte A foi possível constatar que o maior teor foi observado no T4, Neossolo Regolítico e eutrófico, provavelmente devido a quantidade alta de argila encontrada. Esse comportamento também foi constatado na quantidade de nitrogênio (N), onde no tratamento T4 apresentou 0,330 dag/kg.

3.3 Precipitação, umidade e temperatura do solo nos pontos estudados

Em relação aos dados pluviométricos do ano de 2017, observou-se que nos meses de coleta dos dados de chuva (fevereiro e novembro) não houve precipitação. Ainda assim, nos meses de fevereiro a maio de 2017, correspondente a estação chuvosa, foram registrados 43,6 mm de precipitação, e 21,6 mm apenas no mês de maio. Entretanto, no mês de julho, foram registrados 76,6 mm, valor superior ao período considerado de maior ocorrência média histórica de chuvas nessa região. Assim, de fevereiro a julho, a precipitação total foi de 142,6 mm.

Durante a estação seca, no mês de novembro, foram registrados somente 12,2 mm de chuva, em um total geral de 157,2 mm para o ano de 2017. É importante destacar que 2017 foi um ano de seca acentuada, em uma sequência iniciada desde 2012 em grande parte do semiárido brasileiro, portanto, as chuvas no período considerado favorável à pluviosidade (fevereiro à maio) e no decorrer do restante do ano, foi abaixo da média histórica.

No ano de 2018 o comportamento das chuvas foi diferente, com maior incidência nos meses de fevereiro e março. Assim, choveu 80 mm em fevereiro e apenas 0,2 mm em agosto, em um total anual de 182,4 mm. A figura 20 mostra os dados de precipitação com base na estação meteorológica utilizada. As chuvas se concentraram nos meses de fevereiro a julho, destacando-se a maior contribuição nesse último mês. Nos dias das coletas com o IRGA não foram registradas precipitações.

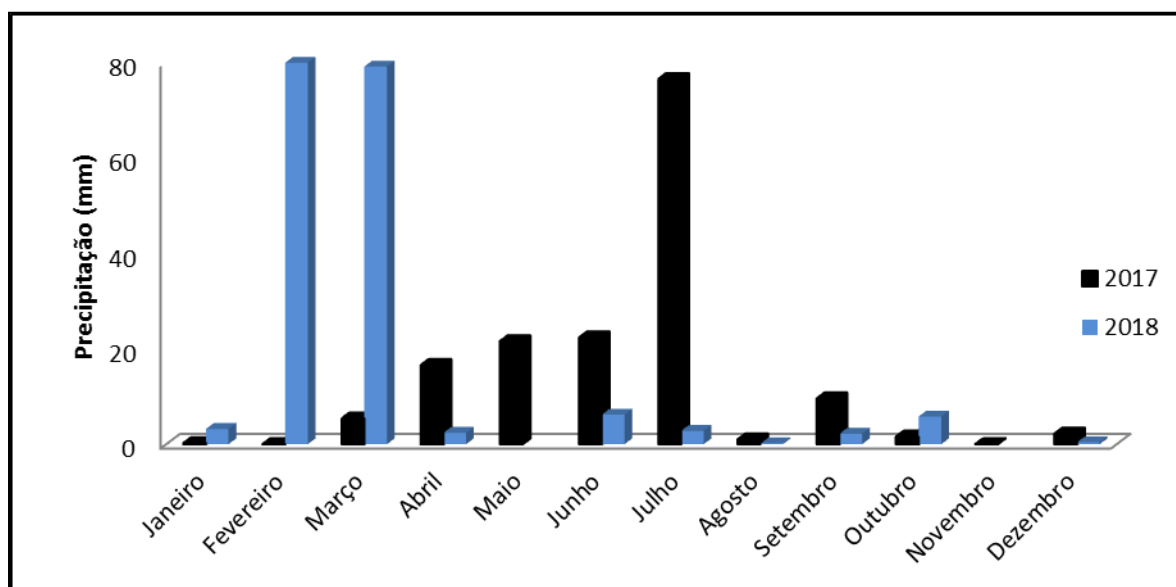


Figura 20: Precipitação mensal da Fazenda Salambaia. Fonte: Elaborada pela Autora.

No ano de 2018, não foi possível coletar dados dos meses de maio e novembro, devido a um problema na estação meteorológica que deixou a série histórica sem registros. Constata-se que apesar do ano de 2018 ter sido mais chuvoso que o ano de 2017, ele ainda apresenta valores inferiores a série histórica da região.

Independente das falhas técnicas observadas, essa irregularidade encontrada na distribuição das precipitações e a forma concentrada em certos períodos do ano é característica do Cariri Paraibano, assim como em todo semiárido brasileiro e outras zonas de

clima seco em todo o mundo (ARAUJO, 2005). Os resultados mostram que os valores encontrados foram bem abaixo da média histórica anual, que é de 336,6 mm (BRECKAM et al., 2013).

A umidade volumétrica do solo foi obtida juntamente com as medições do ECO_2 para todos os pontos de coleta no ano de 2018, conforme mostra a figura 21. O comportamento se mostrou variável temporalmente e de acordo com os pontos estudados. A área preservada apresentou maiores valores de umidade, independente se era um período seco ou chuvoso.

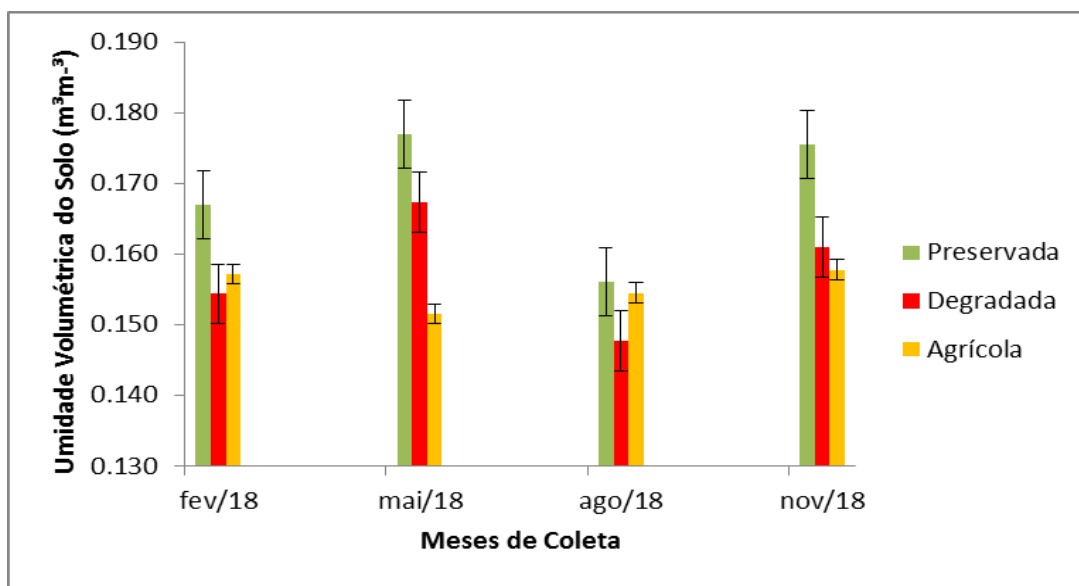


Figura 21: Comportamento mensal da umidade do solo da Fazenda Salambaia. Fonte: Elaborada pela Autora.

O comportamento da temperatura média anual do solo para todos os pontos de coleta e para a estação meteorológica da Fazenda Salambaia mostrou-se variável conforme pode-se observar na figura 22. O comportamento da estação se assemelha aos das áreas degradadas, devido a proximidade com os pontos de coleta. Foram realizadas medições em a cada 3 meses juntamente com as medições de efluxo de CO_2 .

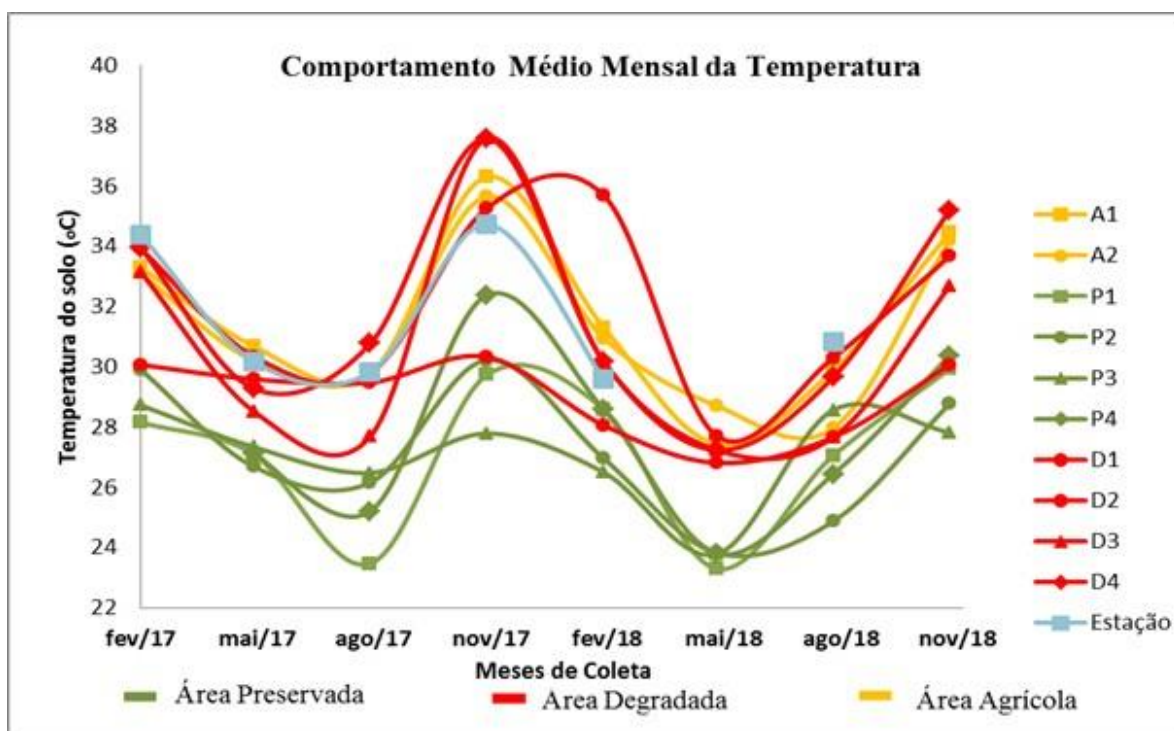


Figura 22: Comportamento mensal da temperatura do solo da Fazenda Salambaia. Fonte: Elaborada pela Autora.

As maiores temperaturas encontradas foram nas áreas agrícolas e nas áreas degradadas, sendo o maior valor no ponto D4 (37,58 °C) e o menor valor registrado no ponto P1 (23,29 °C). Relacionando os locais de menor T média (e menor variação de T), mais água no solo (menor evaporação). O comportamento da temperatura do solo seguiu o padrão das estações pré-definidas, sendo registrados maiores valores para as áreas degradadas e áreas agrícolas. De forma mais específica, além do aumento dos processos erosivos superficiais, a retirada da vegetação faz com que ocorram alterações no microclima, gerando menor umidade e aumento da temperatura local.

Sob temperaturas acima de 30°C, em geral, a atividade microbológica é interrompida e não ocorre a germinação de sementes (ARAÚJO et al., 2016). No caso da Caatinga, para a maioria das espécies, esse limite também é observado (SALOMÃO et al., 1987; PRAZERES, 1996; PACHECO et al., 2006; MEIADO et al., 2010; SILVEIRA et al., 2011; NOGUEIRA et al., 2012; SOUZA et al., 2016). Neste trabalho, os dados apresentados mostram valores de temperatura acima de 30°C, principalmente nas áreas degradadas, enquanto os pontos nas áreas preservadas possuem temperaturas médias abaixo desse patamar, o que favorece a germinação das sementes.

Em relação a temperatura do solo, foram realizadas medidas na profundidade de 10 cm, utilizando o sensor acoplado ao IRGA para a medição das áreas preservada, degradada e agrícola, além dos dados da estação. Os dados do sensor de temperatura do IRGA foram coletados no mesmo período que o efluxo de CO₂, para o período denominado pré-chuvoso (fevereiro) e chuvoso (maio) para os anos de 2017 e 2018 (Figura 23). Os resultados mostram maiores valores no mês de fevereiro de 2017, para as áreas degradadas e menores no mês de maio para as áreas preservadas.

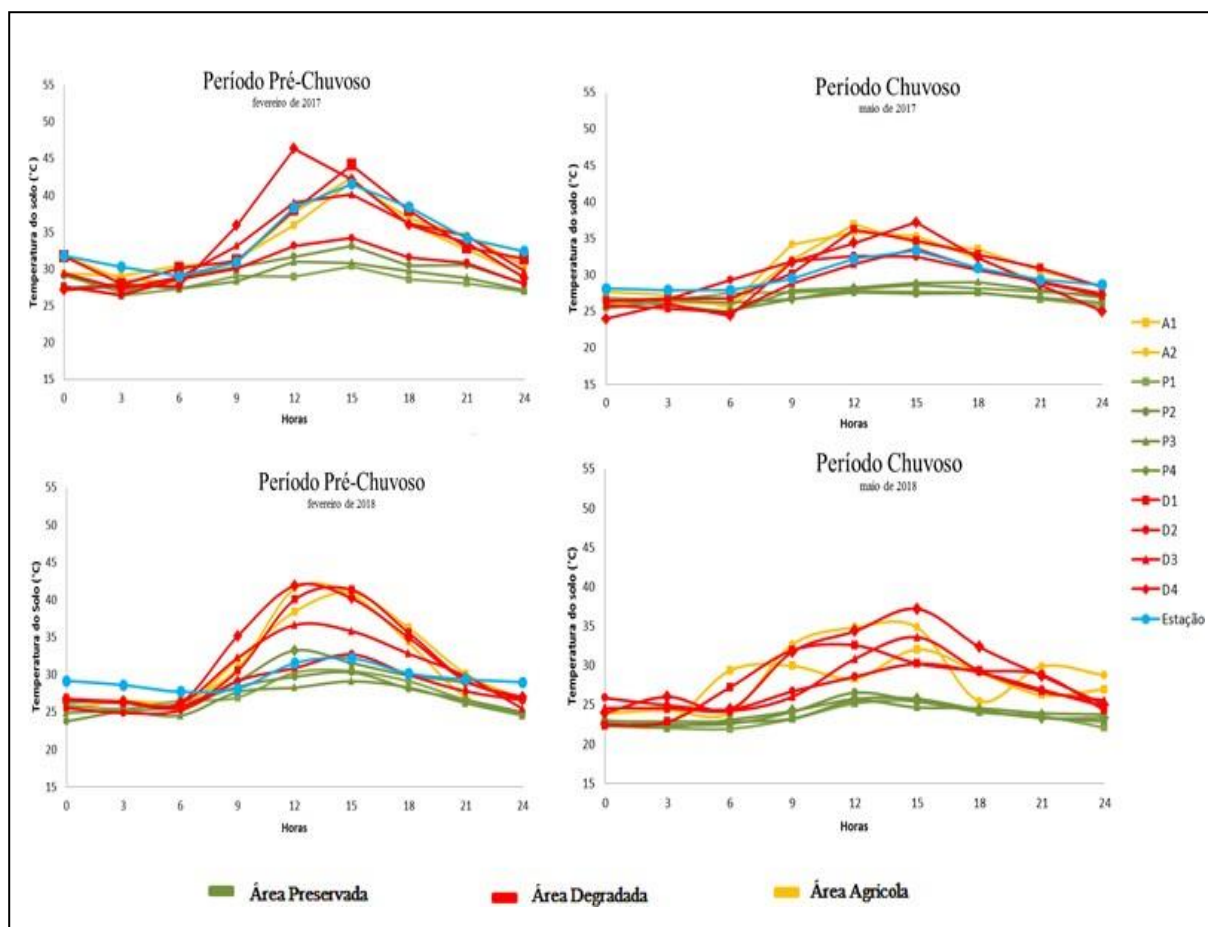


Figura 23: Comportamento mensal da Temperatura do solo no período chuvoso da Fazenda Salambaia.

Nas áreas preservadas, no período chuvoso, foram registradas as menores temperaturas nos anos de coleta (2017 e 2018). As temperaturas do solo dos períodos pré-seca (agosto) e seca (novembro) para os anos de 2017 e 2018, podem ser observadas na figura 24.

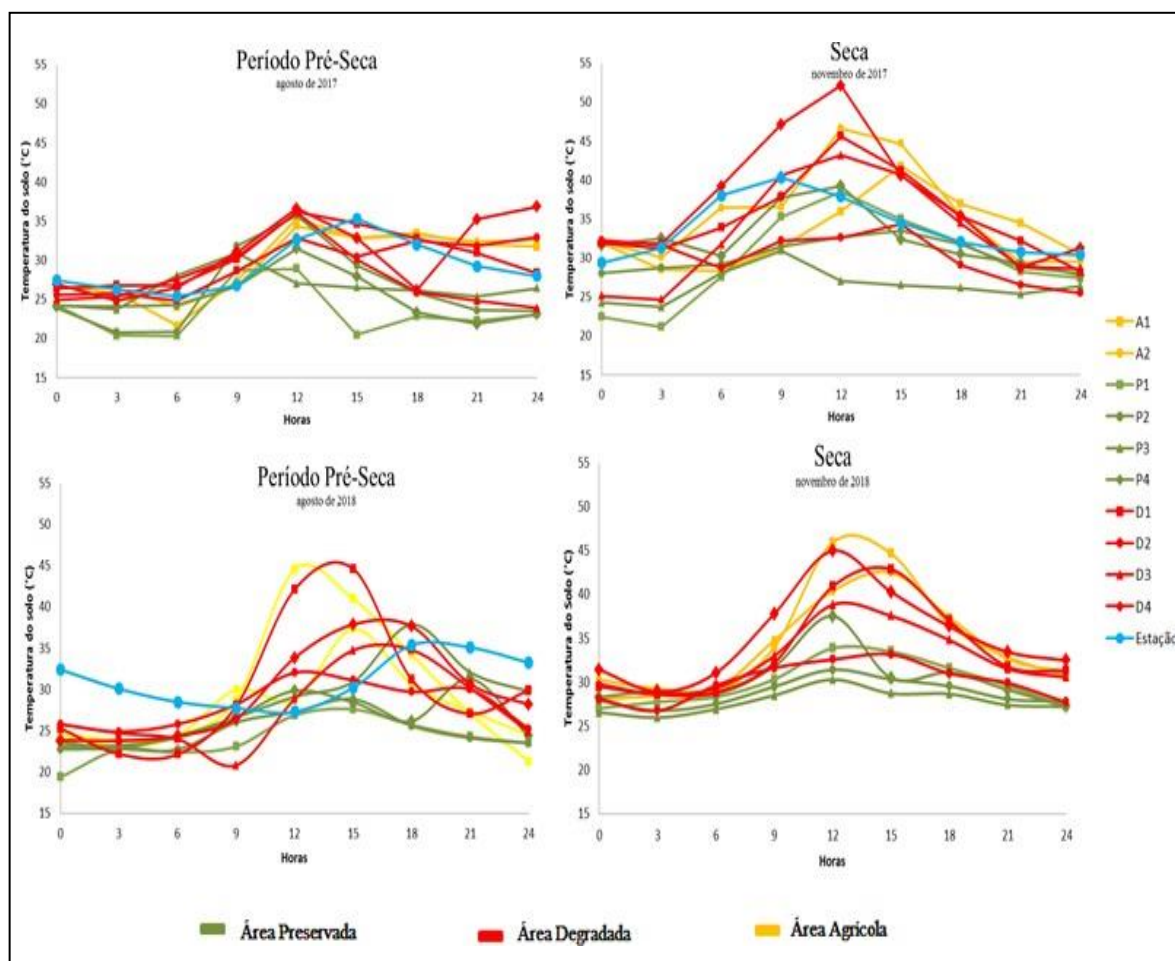


Figura 24: Comportamento mensal da Temperatura do solo no período seco da Fazenda Salambaia.

Vale lembrar novamente que no mês de novembro a coleta dos dados da estação foi comprometida por conta de uma falha no equipamento, sendo a série não preenchida totalmente. Ainda assim, optamos por não descartar esses resultados, para não comprometer os dados encontrados nesse ano. Também destacamos que no ponto 10 não constam valores de temperatura do mês de fevereiro, pois o anel de coleta foi instalado no mês de maio.

O balanço hídrico (BH), exposto na Tabela 14 e na Figura 27, foi gerado a partir dos dados de temperatura do solo (profundidade de 0,10 m) e pluviométricos dos anos de 2017 e 2018 da estação Salambaia e considerando a textura do solo Franco-Arenosa. Foi gerada uma tabela onde apresentamos todas as variáveis calculadas para o BH e um gráfico onde podemos observar o comportamento mensal do balanço. Os resultados mostram que houve déficit hídrico em todos os períodos, sendo maior no período seco (outubro a dezembro).

Tabela 14 – Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather (1957) para o ano de 2017 e 2018 na Estação Salambaia.

Mês	T	P	ETP	P-ETP	ppa	ST	Δ ST	ETR	Dh	S
Janeiro	26,76	1,70	142,81	-141,11	-4377,39	1,00	0,00	1,70	141,11	0,00
Fevereiro	26,49	40,00	136,32	-96,32	-4473,72	1,00	0,00	40,00	-96,32	0,00
Março	26,02	42,30	126,50	-84,20	-4557,92	1,00	0,00	42,30	-84,20	0,00
Abril	24,61	9,50	102,35	-92,85	-4650,77	1,00	0,00	9,50	-92,85	0,00
Maio	26,10	21,60	125,39	-103,79	-4754,55	1,00	0,00	21,60	103,79	0,00
Junho	23,71	14,30	87,63	-73,33	-4827,88	1,00	0,00	14,30	-73,33	0,00
Julho	23,29	39,70	82,97	-43,27	-4871,15	1,00	0,00	39,70	-43,27	0,00
Agosto	24,63	0,60	101,62	-101,02	-4972,17	1,00	0,00	0,60	101,02	0,00
Setembro	26,77	5,90	138,84	-132,94	-5105,11	1,00	0,00	5,90	132,94	0,00
Outubro	28,80	3,70	184,59	-180,89	-5286,00	1,00	0,00	3,70	180,89	0,00
Novembro	27,36	0,00	154,77	-154,77	-5440,77	1,00	0,00	0,00	154,77	0,00
Dezembro	29,72	1,30	208,90	-207,60	-5648,37	1,00	0,00	1,30	207,60	0,00
Total	26,19	180,60	592,69	-1412,09	-	-	-	180,60	412,09	0,00

*T = Temperatura (°C); P = Precipitação (mm); ETP= Evapotranspiração Potencial (mm), ppa = Perdas potenciais acumuladas; ST = Capacidade de armazenamento de água no solo ; ETR = Evapotranspiração Real; Dh = Déficit Hídrico; S = Excesso de umidade.

Mensalmente, podem ser percebidas as variações da evapotranspiração potencial de acordo com o regime de precipitação, que apresentam valores elevados contribuindo para o deficit hídrico na região, conforme pode ser observado na figura 25. O deficit hídrico se encontra por todo o período analisado e segundo Souza, Artigas & Lima (2015), está relacionada a outros fatores, como a relação planta-planta e planta-solo, condicionando a existência de microclimas.

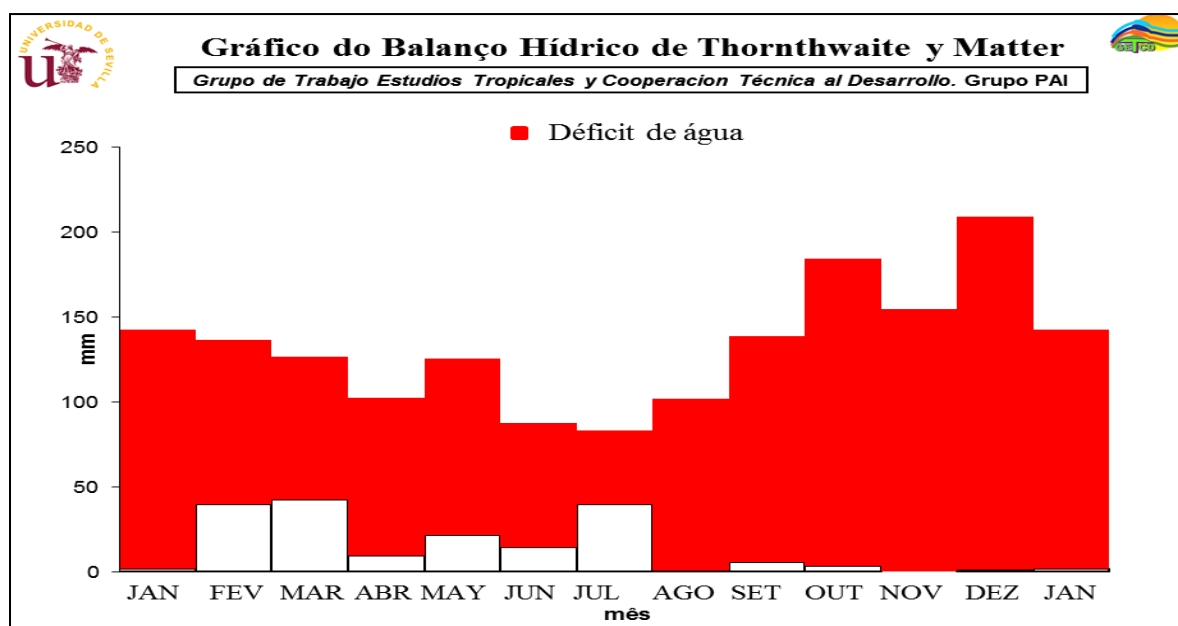


Figura 25: Balanço Hídrico de Thornthwaite y Matter (1957) para os anos de 2017 e 2018. Fonte: Adaptado de Cámara, Battle e Olmo (2004).

3.4 Análises dos Índices Biofísicos e do CO₂flux

Quanto aos resultados para o comportamento da vegetação, foram obtidos dados referentes aos meses de fevereiro, maio, agosto e novembro, tanto em 2017 como em 2018, conforme exposto na metodologia. Os produtos gerados após processamento das imagens estão representados nas figuras a seguir, que apresentam vegetação densa e preservada com coloração verde, e vegetação degradada ou estressada e áreas agrícolas com coloração amarela e vermelha.

Após o período de chuvas foram observados os valores mais altos de NDVI, mostrando a resposta da vegetação devido a presença de umidade no sistema, principalmente nas áreas próximas ao sopé coluvial do afloramento rochoso, demonstrando a importância desses para o armazenamento de água no solo e para o desenvolvimento da vegetação na Caatinga. Foi possível também observar que as áreas de solo exposto e vegetação escassa não apresentaram muita variação de um ano para o outro. Em relação as áreas de vegetação nativa, o comportamento seguiu o padrão de chuvas da região, apresentando maiores valores após as precipitações.

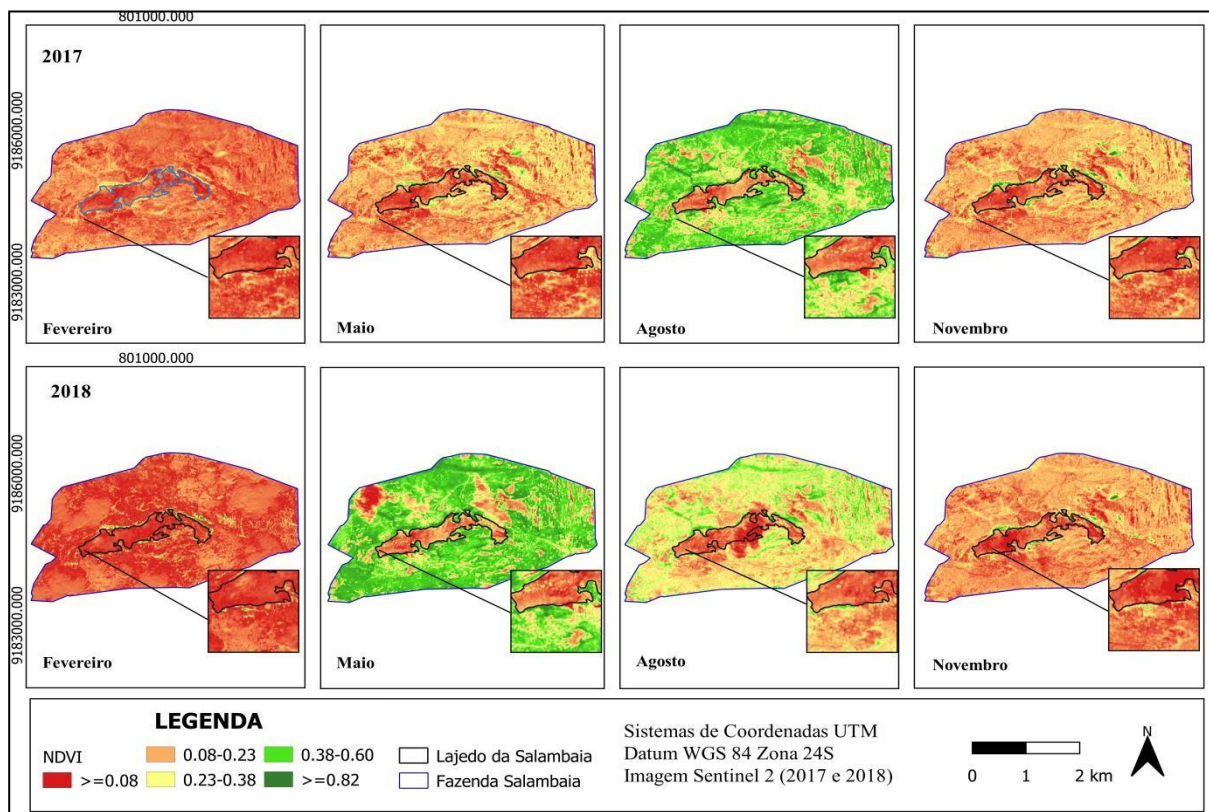


Figura 26: Representação do NDVI para a fazenda Salambaia no ano de 2017 e 2018.

Os valores obtidos de NDVI variaram de -0,003 a 0,844, sendo registrados em fevereiro de 2017 e agosto de 2017, respectivamente. Diante dos valores encontrados é possível observar que esse índice mostra um maior vigor da biomassa nos meses de maio (estação chuvoso) e agosto (estação pós chuva), indicando uma relação direta do padrão sazonal da precipitação com a sazonalidade da vegetação. Essa mesma relação foi constatada por Alves e Vieira (2015). Um aspecto a ser destacado é que a localização das áreas preservadas conforme mostra a figura 9, próximas a base do afloramento rochoso, favorece o menor uso por atividades humanas, devido a rochosidade e pedregosidade dominantes, o que influencia diretamente no melhor nível de preservação da cobertura vegetal.

O Índice de Vegetação Ajustado ao Solo também foi calculado conforme mostra a figura 27. Os resultados do SAVI mostraram que mesmo com a adoção do fator de ajuste referente ao solo para uma vegetação intermediária foi encontrada similaridade com o NDVI. De forma geral, nos dois casos percebemos que os índices apresentaram valores superiores nos meses de agosto do ano de 2017 e maio de 2018, sendo esse comportamento semelhante ao da precipitação registrada nesse ano pela estação meteorológica.

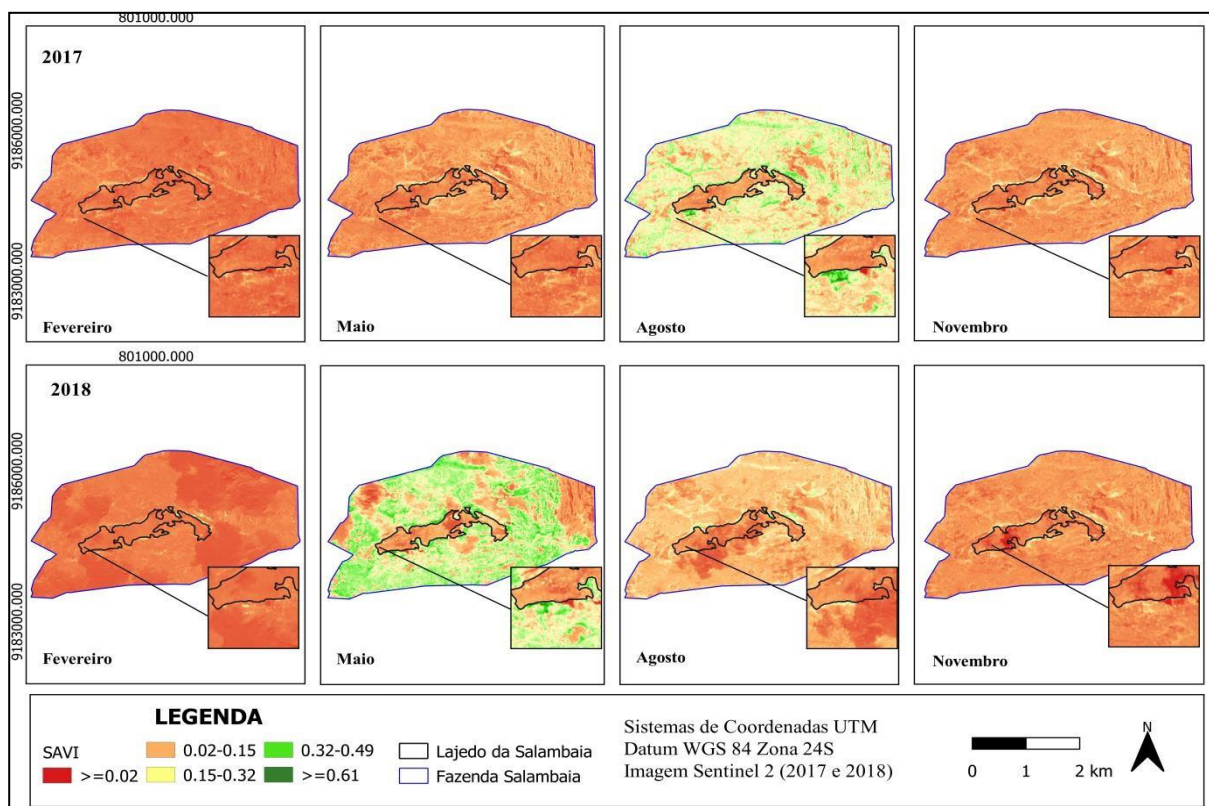


Figura 27: Representação do SAVI para a fazenda Salambaia no ano de 2017 e 2018.

Os valores obtidos de SAVI variaram de -0,001 a 0,634, sendo registrados em fevereiro de 2017 e agosto de 2017, respectivamente. Esses valores mostram a resposta da vegetação ajustada ao solo em um curto período de tempo. Uma análise visual permite inferir uma redução da cobertura vegetal no mês de novembro, onde foram encontradas as maiores temperaturas. Resultados semelhantes foram encontrados por Ballén et al. (2016) na APA do Cariri e por Nascimento et al., (2014) na sub-bacia do alto Paraíba.

Vale lembrar que, conforme relatado anteriormente o período de análise foi atípico com precipitações baixas quando comparado com as médias mensais da série histórica relatada por Nimer (1979) e por Medeiros (2015). As áreas de entorno do lajedo da Salambaia, principalmente próxima as pontos de coleta, independente do período apresentaram os maiores índices de NDVI e SAVI, mostrando assim a importância desses ambientes para a fixação da vegetação e maior aporte de biomassa nessa área. Esse fato corrobora com os dados levantados por Lunguinho (2018) para a Fazenda Salambaia no período de 2014 a 2017.

Quando analisamos o ano de 2017, observamos que o mês de agosto, mostrou maior presença de biomassa, nos dois índices de vegetação analisados. Vale salientar que no mês de julho foi registrado o maior volume de precipitação para esse ano, o que justifica esse comportamento. Para o ano de 2018 observamos comportamento semelhante, tendo valor elevado nos meses após a precipitação.

O SAVI para o ano de 2018 mostrou um comportamento diferente, seguindo o comportamento do período de chuva registrado iniciando no mês de fevereiro, mostrando a maior presença de umidade no sistema, que proporcionou uma resposta positiva da vegetação, principalmente nas áreas de Caatinga típica e de Caatinga preservada.

Os valores obtidos para o IAF (Figura 28) variaram de -0,174 a 3,177, sendo registrados em fevereiro de 2017 e maio de 2018, respectivamente. Assim, observa-se similaridade entre o comportamento do IAF com os outros índices biofísicos, devido ser um subproduto do NDVI e SAVI. Os resultados indicam aumento de biomassa após eventos de precipitação.

O IAF pode ser observado na figura 28 e mostra a razão entre a área foliar da vegetação por unidade de área analisada. Os resultados indicam que os períodos secos apresentam

predominantemente menos biomassa e menor IAF, representado pela cor vermelha, enquanto no período úmido podemos observar um valor de IAF superior a 0,65 representado pela cor verde. Um local que apresenta pouca mudança e semelhança em todos os períodos, é onde se encontra o Lajedo da Salambaia, sendo representado pelos menores valores, no entanto nas áreas do sopé coluvial e entorno do afloramento, pode-se observar sempre a presença de biomassa.

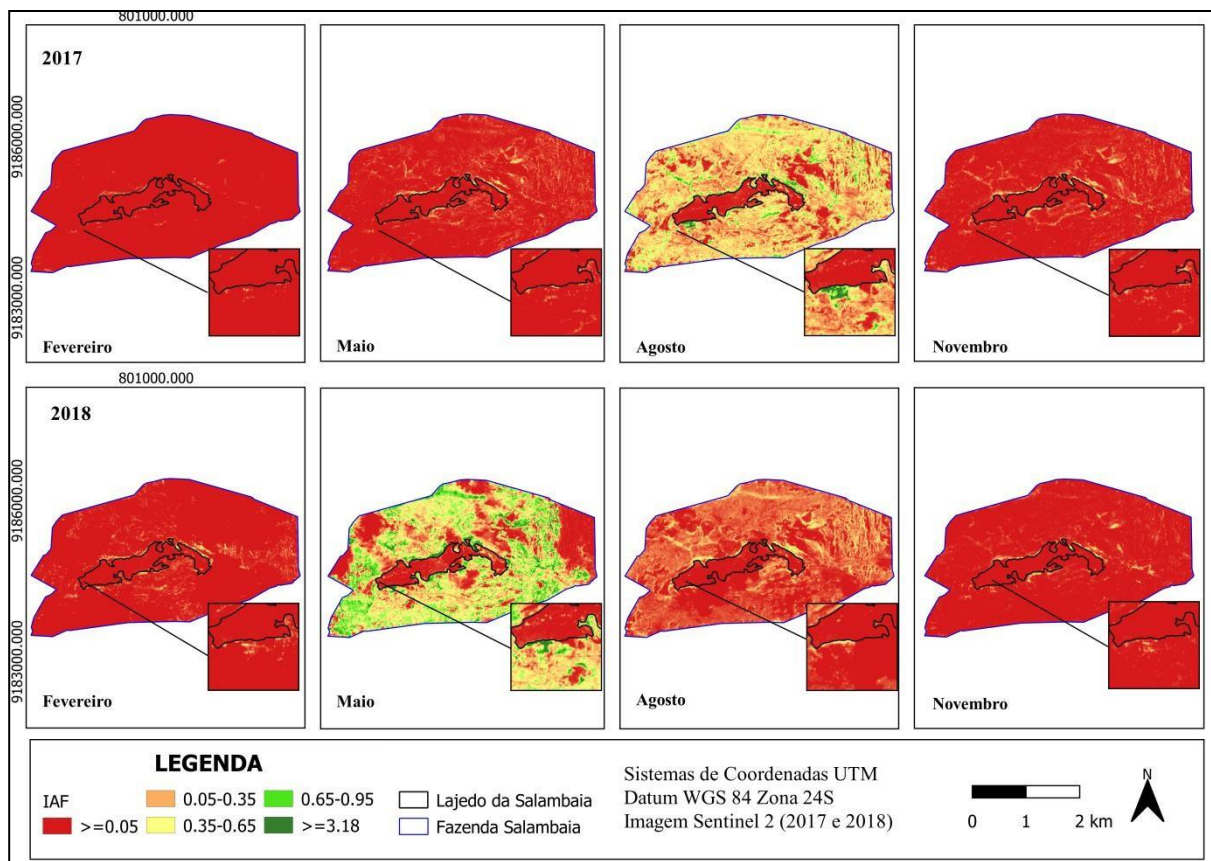


Figura 28: Representação do IAF para a fazenda Salambaia no ano de 2017 e 2018.

Os dados de sequestro de carbono pela vegetação ou CO₂flux (figura 29), mostraram diferença dos valores na estação seca. Nas áreas de Caatinga aberta foram observados os menores fluxos, devido a menor cobertura vegetal existente e pelo fato dessa ter seu vigor comprometido pela falta de chuva nesse período. Já nas regiões próximas ao afloramento rochoso, onde estão as áreas com maior cobertura vegetal, o comportamento do CO₂flux mostrou os maiores valores. Os valores obtidos do CO₂flux variaram de -0,001 a 0,422, sendo registrados em fevereiro de 2017 e novembro de 2017, respectivamente

Relacionando os dados com o uso e cobertura a terra, podemos observar que as áreas que não mostraram mudanças importantes nos valores registrados indicam presença de solo exposto, afloramento rochoso e estradas, cujo padrão de uso e ocupação não se alteram faz muito tempo, apresentando menores valores de fluxo e recebendo menor influência da cobertura vegetal, devido a menor presença nessas áreas.

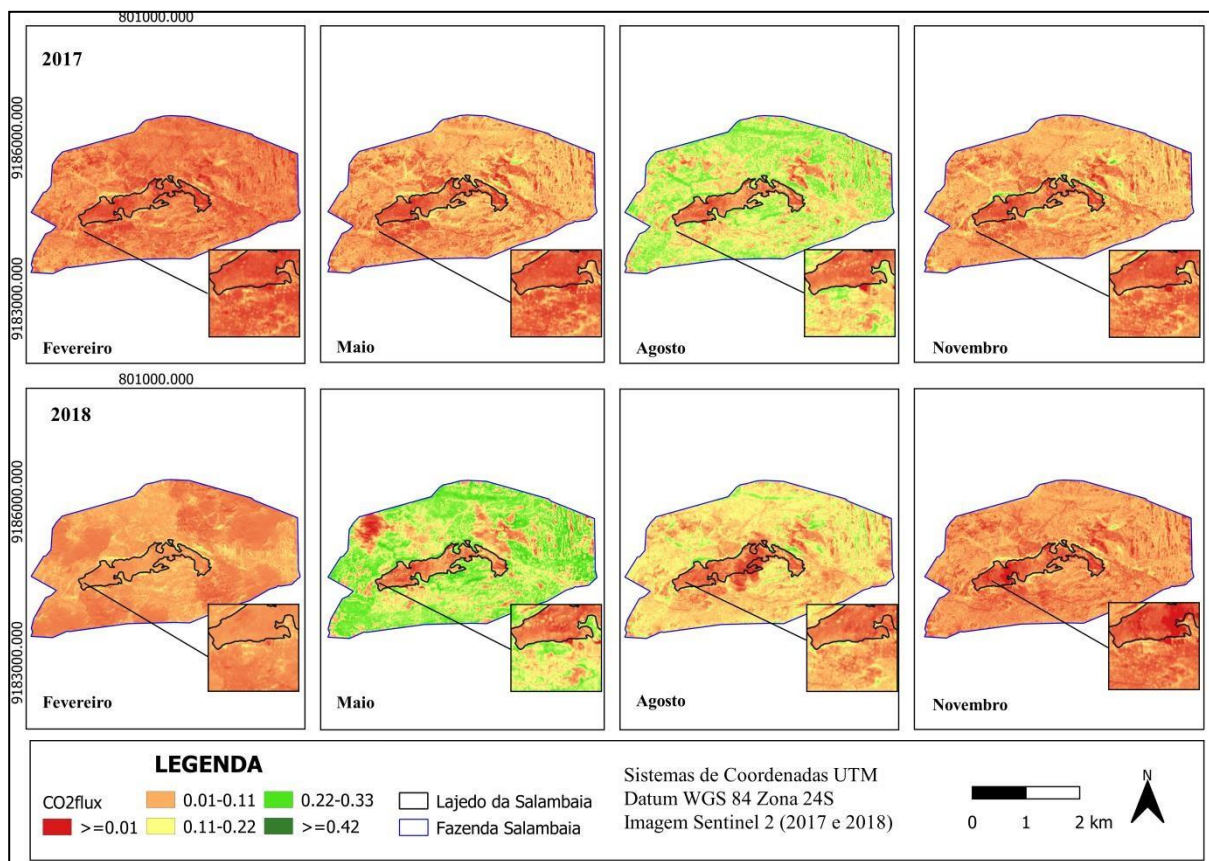


Figura 29: Mapa do CO₂flux para a fazenda Salambaia no ano de 2017 e 2018.

O CO₂flux encontrado nas imagens mostrou uma variação nos meses de maio de 2017, com a presença de menores fluxos, enquanto em agosto, após as chuvas, há um aumento no fluxo de CO₂, representando o aumento da atividade biológica, absorção de carbono e do processo fotossintetizante nas plantas. Esses resultados são esperados devido ao efeito da chuva e da umidade do solo na Caatinga (SOUTO et al., 2009).

Os valores positivos, segundo Oliveira et al. (2006), indicam fluxos de carbono da vegetação para a atmosfera, representando emissões de CO₂ durante o processo respiratório, enquanto os valores negativos indicam fluxos de carbono da atmosfera para a vegetação, devido a atividade fotossintética, ou seja, sequestro de carbono. Por isso, a conversão da

floresta nativa para a área de cultivo reduz a incorporação de MOS nessas áreas, mas a conversão para pastagens pode até aumentar o potencial dos solos para funcionarem como sumidouros de carbono (FERREIRA et al. 2014). Entretanto, caso esse uso seja intenso, Schulz et al. (2018) destacam que essas regiões diminuem o armazenamento de carbono no solo, afetando diretamente a floresta e o uso dos ecossistemas, fatos que serão verificados posteriormente.

3.5 Variação temporal e diária dos efluxos de CO₂ em diferentes situações de uso e cobertura da terra

Para obtermos a variação temporal do efluxo de CO₂ foram calculados os efluxos médios dos períodos coletados (Figura 30). O efluxo de CO₂ médio variou de -0,28 a 8,92 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$. O maior efluxo de CO₂ foi registrado na área preservada P1, tendo os menores valores e inclusive valores negativos no ponto D1.

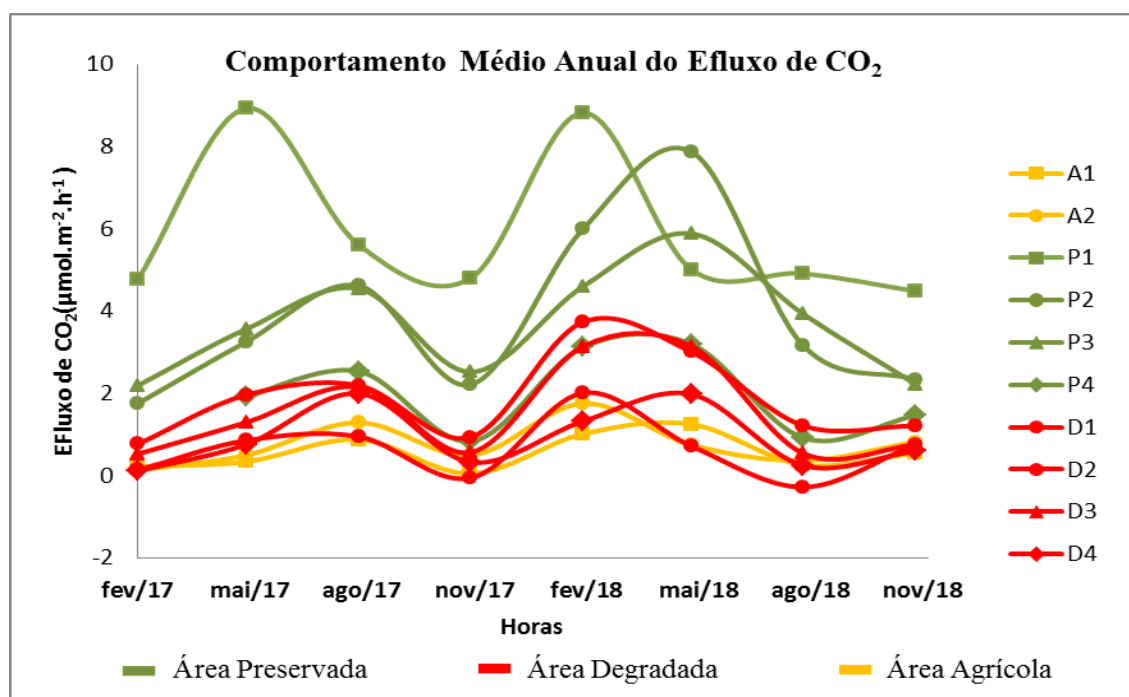


Figura 30: Variação Temporal do Efluxo de CO₂ (ECO₂).

Conforme observamos na figura 30, o comportamento anual dos pontos das áreas preservadas foi o que mostrou os maiores valores médios, enquanto os menores valores foram observados nas áreas degradadas e agrícolas. O P4 apresentou valores próximos dos pontos D1 e D2, provavelmente por se tratar de uma área de caatinga em processo de regeneração.

Destacamos ainda que nos pontos D1 e D2 atualmente são utilizado para cultivo de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*), cultura bastante utilizada na região semiárida, devido sua resistência a seca e uso como forragem pelo gado, que é a principal atividade econômica da região (DRUMOND; CARVALHO FILHO, 2005). Segundo os mesmos autores, o sucesso da adaptação das *Opuntias* e outras cactáceas ao ambiente seco se deve em parte ao seu padrão de consumo de CO₂, que ocorre principalmente à noite. Esse comportamento é devido as menores temperaturas no período noturno, quando existem condições favoráveis à atividade dos microrganismos do solo.

Em comparação a outros locais de Caatinga, o efluxo médio das áreas pode ser observado na tabela 15.

Tabela 15- Efluxo de CO₂ do solo em diferentes locais de Caatinga

Local	Período (meses)	ECO ₂ máximo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	ECO ₂ mínimo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Autores
Patos – PB	10	2,21	0,95	Alves et al. (2006)
Petrolina – PE	12	5,00	-4,20	Oliveira et al. (2006)
São João – PE	12	2,81	0,62	Ferreira et al. (2013)
São João – PE	7	2,12	0,63	Oliveira e Soares (2016)
Picuí – PB	9	2,03	-0,02	Silveira (2017)
São João – PE	9	3,47	0,40	Ferreira et al. (2018)
Serra Talhada – PE	9	5,01	0,20	Lima et al. (2020)

Nas áreas preservadas deste estudo foram encontrados valores superiores ao ECO₂ médios obtidos por outros autores na Caatinga, apresentando um padrão próximo a regiões com maior acúmulo de serrapilheira e de biomassa, como por exemplo a Floresta Amazônica (ZANCHI et al., 2012; SOTTA et al., 2004).

Em relação ao efluxo de CO₂ diário, podemos observar pouca variação nas medições diurnas e noturnas (Figura 31). Entretanto, nos pontos de coleta ocorre uma diferença significativa, nos diferentes períodos do estudo. No período chuvoso foram encontrados os

maiores valores de ECO_2 podendo ser relacionados com a umidade presente (proveniente da chuva) e resultando em maior atividade biológica.

Em comparação com outras pesquisas desenvolvidas no semiárido brasileiro, Ferreira et al. (2018) encontraram comportamento semelhante em Pernambuco, utilizando outro tipo de aparelho, o IRGA (Licor LI-6400-09), que mostra a coerência dos resultados obtidos neste estudo. Resultados semelhantes também foram encontrados por Martins et al. (2010) em solo do semiárido paraibano, mostrando que nos períodos chuvosos e com menores temperaturas ocorreu uma maior liberação de CO_2 , sendo isso atribuído ao aumento da população microbiana, que favoreceu a presença de organismos decompositores.

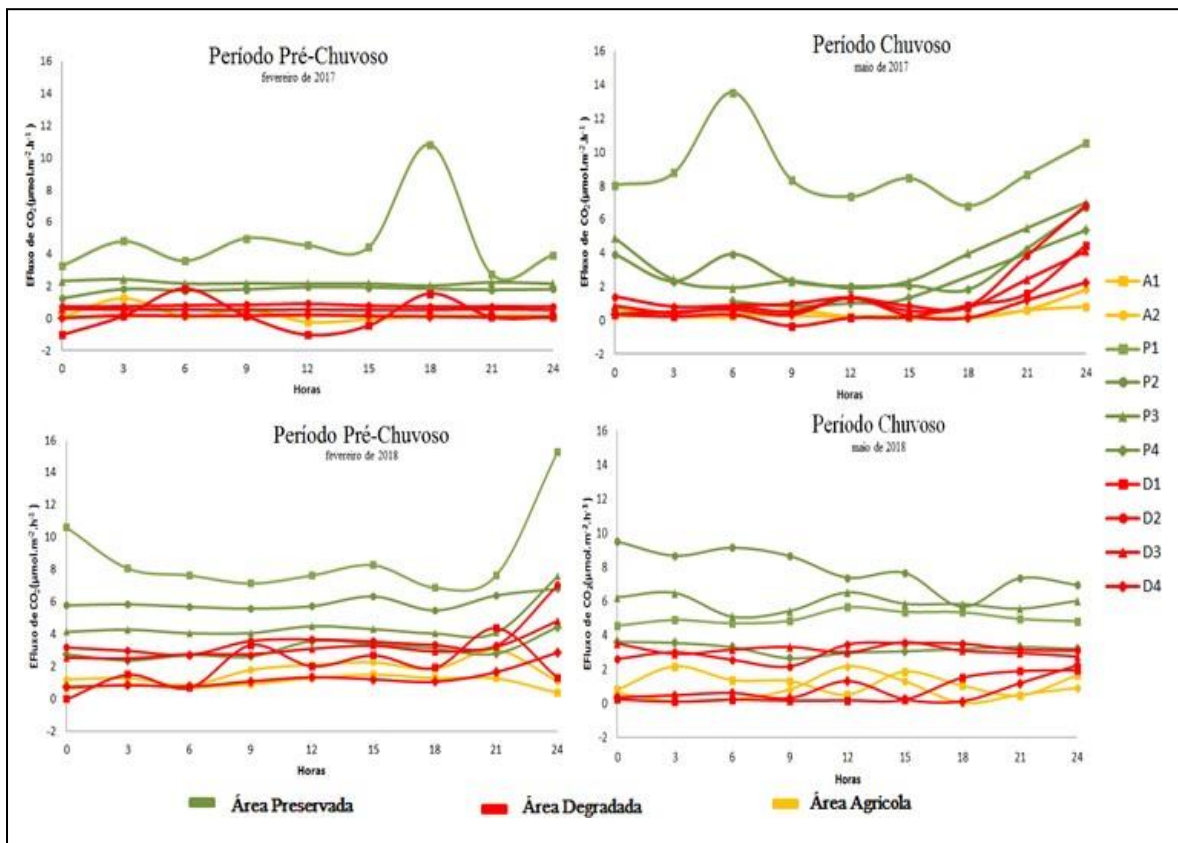


Figura 31: Efluxo de CO_2 para o período chuvoso (Fevereiro e Maio) de 2017 e 2018.

Os maiores fluxos foram encontrados no mês de maio, caracterizado como parte do período chuvoso na região da Salambaia, estabelecendo alterações na dinâmica do sistema, do ponto de vista positivo, como a respiração das raízes das plantas e a atividade microbiana do solo. Valores máximos foram encontrados nos pontos P1 e P2, onde existe a presença de uma Caatinga arbóreo/arbustiva, gerando elevada quantidade de serapilheira e consequentemente

de matéria orgânica. Os maiores efluxos foram registrados nas áreas preservadas, na estação chuvosa, entre 21 e 0 h.

Em ambientes de Caatinga, a disponibilidade de água resulta em maior atividade microbológica (MARTINS et al.; 2010), influenciando a respiração do solo e variação do efluxo (AMACHER & MACKOWIAK, 2011; HOLANDA et al., 2015). Além disso, a maior disponibilidade de água nos pontos P1 e P2 influenciou positivamente a atividade microbiana, o que segundo Martins et al. (2010), proporciona um melhor desenvolvimento de microorganismos no solo. Em comparação com outras pesquisas desenvolvidas no semiárido brasileiro, Ferreira et al. (2018) e Mendes et al. (2020) encontraram padrão semelhante, com maior variação no período chuvoso, podendo esse comportamento, possivelmente, ser extrapolado para outras áreas de Caatinga.

Segundo Campo e Merino (2016), a mudança no regime de chuvas perturba os mecanismos de decomposição da matéria orgânica do solo (MOS). Entretanto, mesmo nesse período onde ocorreu mais chuva, nas análises das áreas com pouca cobertura vegetal (D1 e D2), a exemplo das áreas degradadas e agrícolas, foram encontrados efluxos de CO₂ negativos (Figura 14). Esse fato demonstra a importância da presença da cobertura vegetal nas áreas de Caatinga, também para esse tipo de dinâmica, onde somente a presença de precipitação não é capaz de resultar em respostas positivas no sistema. Isso comprova a importância fundamental desse elemento e das suas relações de causa e efeito com os solos em sua capacidade de reter umidade e na produção de matéria orgânica.

O mês fevereiro no ponto P1, com alto valor de efluxo, de 15,28 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, foi dado em função da liberação do CO₂ retido no solo bem como pela atividade microbiana, após eventos de precipitação. Esse comportamento está relacionado a elevação da respiração das raízes das plantas e a atividade microbiana do solo, beneficiada pelo aumento da umidade em função das chuvas e pela presença de temperaturas menos elevadas (ALVES et al., 2006; FERREIRA et al., 2018). Efluxos mais elevados também foram observados em outros biomas por Valentinni (2005), em um monitoramento em Sinop – MT, no período de 1 ano em uma floresta de transição (7,5 $\mu\text{mol m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e por Sotta et al., (2004) na estação chuvosa em Manaus - AM em uma floresta ombrófila densa (6,4 $\pm$ 0,25 $\mu\text{mol m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Os menores efluxos

foram encontrados nas áreas agrícolas e degradadas, por conta da ausência de cobertura vegetal, apresentando valores baixos ou até negativos.

Os menores valores de efluxo nos sítios degradados podem ser atribuídos a pouca cobertura vegetal ocasionando menor atividade biológica e estoques baixos de carbono orgânico no solo (PLAZA et al, 2018; MENDES et al, 2020). Assim, as áreas degradadas possuem baixa emissão e valores muito altos em comparação com a quantidade de carbono que estoca no solo. Os estoques reduzidos de carbono orgânico estão parcialmente relacionados com as baixas taxas de emissão, quando comparamos com áreas úmidas (PLAZA et al., 2018). Logo, a degradação reduz o teor de carbono no solo e aumenta relativamente a perda de carbono por emissão.

Amacher e Marckowiak (2011) afirmam que para regiões semi-áridas ou áridas, onde a precipitação é menor que a evapotranspiração, o fluxo anual total de CO₂ medido no solo será inferior ao encontrado em outras regiões, apresentando o máximo potencial devido a supressão da respiração no solo durante a estação seca, quando o teor de água no solo é muito baixo.

Os efluxos de CO₂ identificados na estação seca (Figura 32) foram inferiores aos verificados no período chuvoso, conforme pode ser visto parcialmente na figura 30 e totalmente na figura 31.

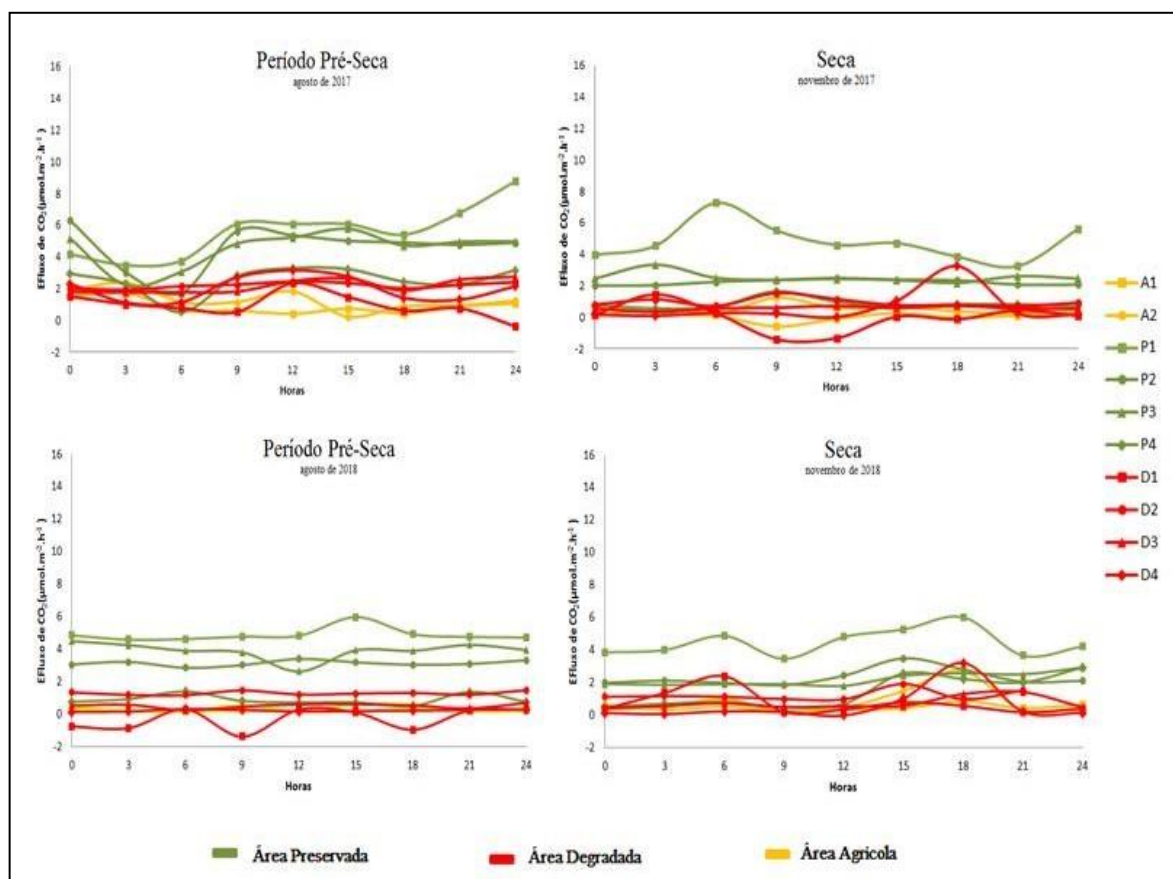


Figura 32: Efluxo de CO₂ para o período seco (Agosto e Novembro) de 2017 e 2018.

Esse comportamento foi constatado por Oliveira et al. (2006) em uma área com Caatinga nativa em Pernambuco, onde a liberação de CO₂ se tornou nula devido ao fechamento dos estômatos e perda das folhas devido ao déficit hídrico. Assim, nesse período nota-se diminuição nos valores médios e no comportamento das áreas preservadas, sendo encontrados valores negativos para as áreas degradadas e agrícolas. Vale lembrar que os pontos A1 e A2 atualmente são usados para o cultivo de palma forrageira, utilizada para alimento do gado. Essas plantas consomem mais CO₂ à noite, devido as menores temperaturas e as condições favoráveis aos microorganismos do solo.

Segundo Mendes et al. (2020), o declínio da precipitação pode influenciar na variabilidade sazonal dos fluxos de CO₂. Nesse caso, os valores inferiores identificados durante a seca podem estar relacionados ao período de dormência das plantas e dos microorganismos nessa estação. Esse processo ocorre em vista da ausência de ingredientes necessários para o metabolismo dos organismos do solo e das plantas, sendo principalmente

substratos orgânicos, com ausência de umidade e ambiente químico-físico favorável. (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006).

Através de informações obtidas com moradores da propriedade, o ponto D1 teve uso agrícola intenso destacando-se a produção de milho durante vários anos seguidos. Como a espécie requer muito nitrogênio, fósforo e potássio (COELHO, 2006), que são pouco encontrados nos Neossolos Regolíticos, o uso contínuo dessas áreas, sem tratamentos culturais que adicionassem matéria orgânica e outros elementos, contribuíram decisivamente para os resultados encontrados.

3.6 Análises Estatísticas

A seguir, nas tabelas 16 e 17, são apresentados os resultados da estatística básica, média ($\bar{X}$), desvio-padrão (σ) e Coeficiente de Variação (CV), para as propriedades físicas e químicas dos solos analisados, localizados nas áreas preservadas (P), degradadas (D) e agrícolas (A):

Tabela 16. Estatística descritiva das propriedades físicas dos perfis no horizonte A.

Pontos	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	DP	DS	PT	Mi	Ma	Classe Textural
	(%)				(g cm ⁻³)					
P$\bar{X}$	59,05	18,00	9,68	13,30	2,52	1,15	0,56	0,22	0,33	Franco- Arenosa
Pσ	16,64	8,08	5,99	3,50	0,16	0,20	0,06	0,08	0,06	-
PCV	28,18	44,92	61,89	26,30	6,25	17,61	10,09	36,84	18,95	-
D$\bar{X}$	40,90	23,45	21,35	14,30	2,69	1,42	0,47	0,23	0,25	Franco-Arenosa
Dσ	17,25	4,45	6,43	6,36	-	-	-	-	-	-
DCV	42,18	19,00	30,14	44,50	-	-	-	-	-	-
A$\bar{X}$	31,7	27,7	21,1	19,5	-	-	-	-	-	Franco-Arenosa

(DP: Densidade de Partículas; DS: Densidade do Solo; PT: Porosidade total; Mi: Microporosidade; Ma: Macroporosidade).

Tabela 17. Estatísticas descritivas das propriedades químicas dos perfis no horizonte A.

Pontos	pH H ₂ O	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al
		(mg dm ⁻³)						
					(cmol dm ⁻³)			
P	5,45	22,53	122,50	18,90	4,73	1,32	0,10	4,60
Pσ	0,42	6,59	13,00	7,63	1,56	0,39	0,11	2,20
PCV	7,68	29,25	10,61	40,37	33,05	29,29	115,47	47,63
D $\ddot{X}$	6,50	466,55	416,50	20,42	6,61	2,38	0,00	1,15
Dσ	0,37	632,93	86,97	11,43	3,46	1,52	0	0,35
DCV	5,77	135,66	20,88	56,01	52,42	64,01	-	30,74
A $\ddot{X}$	5,46	62,1	88	81,12	4,84	2,61	0	3,7
Pontos	SB	t	T	V	MOS	N	C _{org}	C/N
		(cmol dm ⁻³)		(%)				
				(dag/kg)				
P	6,44	6,54	11,04	60,53	6,39	0,15	3,70	26,51
Pσ	1,85	1,83	3,91	10,44	5,58	0,13	3,24	15,94
PCV	28,67	28,07	35,41	17,25	87,41	81,99	87,41	60,12
D $\ddot{X}$	10,14	10,14	11,29	89,30	3,27	0,19	1,89	8,80
Dσ	5,16	5,16	5,52	2,12	3,32	0,07	1,92	6,81
DCV	50,91	50,91	48,85	2,38	101,57	39,81	101,57	77,41
A $\ddot{X}$	8,03	8,03	11,73	68,5	3,13	0,17	3,25	10,55

(P: Fosforo; K⁺: Potássio; Na⁺: Sódio; Ca²⁺: Cálcio; Mg²⁺: Magnésio; Al³⁺: Acidez trocável; H+Al: Acidez Potencial; Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺: Base; SB: Soma de Bases; t: Capacidade de Troca Catiônica Efetiva ; T: Capacidade de troca Catiônica (PH 7,0); V: Saturação de Bases; C: Carbono; N: Nitrogênio; MOS: Matéria Orgânica do Solo; C_{org}: Teor de Carbono Orgânico).

De forma geral, observamos que os solos das áreas preservadas (P) apresentaram maiores valores de porosidade total (PT) e macroporosidade (Ma), em comparação aos solos em áreas degradadas. A porosidade do solo mostra que o tratamento P é mais poroso, significando assim que essas áreas possuem capacidade de armazenamento de água maior.

Na microporosidade, os solos do tratamento D apresentaram valores superiores e possuem mais argila, indicando que possuem maior capacidade de armazenamento de água. Em relação às análises de solos das áreas, os solos apresentaram o mesmo material parental derivado do gnaiss. Os resultados encontrados não foram significativamente diferentes quando comparamos suas partículas, existindo maior quantidade da fração areia.

Os horizontes superficiais A variaram de moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos. Uma propriedade que está diretamente correlacionada com a acidez é o pH, considerado importante indicador das condições químicas do solo, por possuir capacidade de

interferir na disponibilidade de vários elementos químicos essenciais (BRANDÃO e LIMA, 2002). O efeito da acidez e alcalinidade está diretamente relacionado ao pH, e esse fator tem influência na disponibilidade de nutrientes para as plantas (MALAVOLTA et al, 1997). A maior acidez nos solos das áreas preservadas influencia positivamente na disponibilidade de nutrientes (Ca, Mg, Na e K) para os organismos, aumentando a emissão de CO₂ do solo (OERTEL et al., 2016). Além disso, a interação entre o pH do solo e a matéria orgânica determinam a população de plantas e as espécies de microrganismos (i.e., bactérias e fungos micorrízicos) dominantes na paisagem (SOUZA e SANTOS, 2017). Sendo assim, se o pH é similar entre os solos de distintas formas de uso e tipologias, quer dizer que as populações de micro-organismos não devem ser muito diferentes, pois vivem em condições químicas similares, corroborando com os resultados obtidos por Pereira et al (2009) e por Melo et al (2010).

Os solos de ambientes preservados apresentaram maiores teores de C_{org}, MOS e nitrogênio. Assim, as áreas degradadas apresentaram metade do estoque de carbono e menos de 1% de matéria orgânica no solo. De acordo com Santos et al. (2019), os efeitos da mudança do uso da terra em ambientes semiáridos contribuem para a diminuição do estoques de carbono orgânico e do carbono da biomassa microbiana (44% e 68%, respectivamente).

Os valores de efluxo de CO₂ também foram relacionados com as propriedades do solo (Tabela 18) através do coeficiente de correlação de Pearson (r). A correlação de Pearson foi utilizada para obter e comparar a influência das propriedades do solo, variando de fraca a muito forte. As propriedades do solo que apresentaram correlações mais significativas foram o magnésio, alumínio, Capacidade de Troca Catiônica, matéria orgânica do solo, carbono orgânico e a relação C/N.

Tabela 18. Correlação entre o efluxo de CO₂ com as propriedades do solo.

Propriedade	R	Propriedade	R
pH H ₂ O	-0,36	SB (cmol dm ⁻³)	-0,71
P (mg dm ⁻³)	-0,42	t (cmol dm ⁻³)	-0,70
K ⁺ (cmol dm ⁻³)	-0,26	T(cmol dm ⁻³)	-0,87
Na ⁺ (cmol dm ⁻³)	-0,66	V (%)	-0,59
Ca ²⁺ (cmol dm ⁻³)	-0,40	MOS (dag/kg)	0,99
Mg ²⁺ (cmol dm ⁻³)	-1,00	N (dag/kg)	-0,81
Al ³⁺ (cmol dm ⁻³)	0,99	C _{org}	0,99
H + Al (cmol dm ⁻³)	0,57	C/N	0,97

A fixação do carbono no solo é mediada principalmente pelas plantas através da fotossíntese, com o carbono armazenado na forma de carbono orgânico do solo (ONTL & SCHULTE, 2012). Esse comportamento também foi encontrado por Souza et al. (2019) em área de Caatinga no município de Sousa (PB), onde os autores relataram que os maiores teores de C orgânico foram identificados nas áreas de vegetação preservada. Assim, diversos estudos comprovam que os maiores reservatórios de carbono estão nas áreas florestais ou com maior presença de vegetação (ARAÚJO FILHO et al., 2018; PELLIKKA et al., 2018; ANTA et al., 2020).

Em solos mais arenosos e expostos, a matéria orgânica acaba sendo menos fixada, fato que ocorreu em locais mais distantes do afloramento rochoso. Quando observamos a quantidade de estoque de carbono e MOS, os dados mostraram que a área preservada possui esses valores elevados, devido a fixação e absorção da vegetação tanto no que se refere ao carbono no solo, quanto a serapilheira. Isso reforça a importância da presença e de medidas de preservação da vegetação. Além do solo, a vegetação está diretamente ligada aos estoques de carbono orgânico, sendo fortemente afetada por ele e pelo uso da terra (WIESMEIER et al., 2019).

O carbono orgânico apresentou-se como estimulador das populações de microrganismos o que é concordante com o fato de a matéria orgânica ser um dos principais fatores associados ao incremento de biomassa microbiana como indicador biológico do processo de biodegradação de resíduos no solo (TEDESCO et al., 1999). Esses dados corroboram com os obtidos por Moraes (2012), que encontrou maior teor de carbono orgânico no Neossolo Regolítico em área de campo nativo quando comparado com áreas de eucalipto.

O teor de carbono orgânico tem sido utilizado frequentemente como indicador-chave da qualidade do solo, tanto em sistemas agrícolas como em áreas de vegetação nativa (JANSEN, 2005, LIMA et al., 2020). Com isso, observa-se que os solos das áreas preservadas e com maior presença de vegetação, além de apresentarem maior quantidade de matéria orgânica, apresenta também maior teor de carbono orgânico, sendo assim, são solos de maior qualidade quando comparados com os solos das áreas degradadas e com uso agrícola.

Os macronutrientes C, N e P exercem fundamental importância nas atividades biológicas. Uma vez que o tratamento D possui teores de C, N e P ele pode desfavorecer a

atividade microbiológica e, consequentemente, reduzir a emissão de CO₂. Esses três elementos são fundamentalmente derivados da matéria orgânica do solo, já que o input derivado do intemperismo dos minerais é irrisório. O N é especialmente importante para micro-organismos que não são fixadores de N. Maior macroporosidade nas áreas preservadas favorece a renovação da atmosfera do solo por maior difusão de gases (FERREIRA et al., 2018), consequentemente, a atividade microbiológica é favorecida (SOTTA, 1998).

A relação Carbono/Nitrogênio nos solos teve variações, mesmo com os perfis em uma mesma região climática. Essa diferença ocorreu em razão do uso da terra. O tratamento P apresentou 26:1, o tratamento D com 8:1 e o tratamento A com 10:1, apresentando relação C/N relativamente baixa no D. Esses valores são baixos principalmente pelos baixos teores de C, fazendo com que a relação C/N seja baixa. Em um ecossistema de floresta tropical, grande parte da produção de CO₂ é proveniente da respiração do solo, e os fluxos de CO₂ na interface solo-atmosfera dependem das mudanças nas características físicas, químicas e biológicas na superfície (DIAS, 2006). Nos dados de solo é possível observar diversas relações com as emissões de CO₂, sendo a relação C/N correlacionada positivamente (SHI et al., 2014).

Nos resultados obtidos, as relações C/N foram diferentes em razão do uso da terra, sendo relativamente baixa nas amostras das áreas D (8:1) e das áreas A (10:1), e alta nas amostras das áreas P tiveram relação C/N maior (23:1). A relação C/N baixa nas áreas D e A foi muito mais devida aos teores baixos de carbono do que aos teores elevados de N, visto que não houve manejo de plantas fixadoras de N na área agrícola. O teor de nutrientes (C, N, P) a favorece atividade micro, segundo dados de Holanda et al. (2015), sendo assim, podemos considerar que as áreas P são adequadas para as atividades microbianas, cujos nutrientes são mineralizados ou imobilizados. A elevada relação C/N nas áreas preservadas pode ser explicada pelo aporte de carbono predominante com a queda das folhas e acúmulo de resíduos vegetais no horizonte superficial do solo.

Outra diferença entre os tratamentos é a porosidade, sendo os maiores valores encontrados nas áreas preservadas, favorecendo a retenção de água no solo e a atividade microbiológica. Quando o solo está seco, as taxas de difusão gasosa são quase linearmente relacionadas à porosidade preenchida com ar, em grande parte das condições texturais (GHILDYAL & TRIPATHI, 1987). A difusão de gases na água é aproximadamente 4 vezes menor que no ar (LIVINGSTON & HUTCHINSON, 1995); então, espaços porosos com água

ou isolados por lâminas de água representam barreiras efetivas para o transporte de gás, mesmo que a porosidade total do solo preenchida com ar se mantenha alta. Segundo Sotta (1998), as características da superfície e da porosidade do solo, definidas por sua textura e estrutura, vão determinar como a umidade, a temperatura, o soluto e a concentração de gás, influenciam a taxa e o regime de trocas gasosas. Com os resultados encontrados, foi possível constatar que a textura do solo não influencia na diferença entre os efluxos nas áreas preservadas, degradadas e agrícolas, pois elas apresentaram a mesma textura, diferentemente da porosidade e acidez do solo, que apresentam variações. Nesse caso, a hipótese é a de que somente os dois últimos fatores físicos exercem influência nos efluxos, fator que deve ser investigado com mais estudos. Além disso, grande parte das chuvas acabam direcionando o fluxo das águas do alto dos afloramentos rochosos para as áreas de entorno mais imediato.

Em relação à variabilidade observa-se que os pontos das áreas preservadas mostram dados com baixa dispersão em todos os períodos analisados e dados homogêneos. A tabela 19 mostra a estatística descritiva para as áreas preservadas, degradadas e agrícolas.

Tabela 19. Valores médios, mínimos, máximos, Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variação (CV) de ECO_2 por meses de coletas de dados para o ano de 2017.

Ponto	ECO_2 médio	Σ	Mínimo	Máximo	CV
Fevereiro					
Preservadas	2,91a	0,90	1,50	3,79	22,27
Degradadas	0,38b	0,29	0,04	0,88	206,31
Agrícolas	0,17b	0,23	-0,08	0,70	110,46
Maio					
Preservadas	4,41a	1,85	2,82	8,14	56,04
Degradadas	1,22b	1,35	0,25	4,40	115,02
Agrícolas	0,42c	0,39	0,13	1,30	90,36
Agosto					
Preservadas	4,32a	1,26	1,98	6,02	29,71
Degradadas	1,82b	0,54	1,10	2,66	37,12
Agrícolas	1,08b	0,55	0,31	2,04	51,22
Novembro					
Preservadas	2,59a	0,51	1,99	3,67	21,25
Degradadas	0,44b	0,43	-0,20	1,22	-319,93
Agrícolas	0,27b	0,31	-0,23	0,86	352,04
Anual					
Preservadas	3,49a	0,72	1,47	8,14	26,26
Degradadas	0,96b	0,53	-0,20	4,63	54,31
Agrícolas	0,48b	0,19	-0,26	2,04	36,36

Preservadas (P1 ao P4); Degradadas (D1 ao D4) e Agrícolas (A1 e A2). Médias seguidas de mesma letra em coluna, não diferem entre si pelo teste de Turkey a 5%.

Vale salientar que foram obtidos os valores para todos os pontos de coleta para o ano de 2017 (Apêndice A), para o ano de 2018 (Apêndice B) e geral para os dois anos (Apêndice C). Os maiores efluxos de CO₂ no ano de 2017 foram registrados na área preservada, tendo valores significativamente iguais ao ponto P1, variando de 1,47 a 8,14 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Valores que se diferem foram encontrados somente nos meses de fevereiro e agosto de 2017. As maiores variações sazonais foram identificadas nas áreas degradadas, tendo essas apresentadas o mais alto coeficiente de variação (206%) entre todos os períodos analisados no ano de 2017. Os valores obtidos pela metodologia do IRGA foram semelhantes nas medições diurnas e noturnas mostrando assim pouca variação no fluxo de CO₂ diário. Ferreira et al. (2018) ao analisarem a variação diária e noturna, observaram o mesmo comportamento (pouca variação) na Caatinga no município de São João, no estado de Pernambuco, Brasil. Entretanto, em relação aos pontos de coleta, ocorre uma diferença significativa entre os valores obtidos.

Em comparação aos efluxos médios deste trabalho, também em áreas de Caatinga na Paraíba, Alves et al. (2006) encontraram valores médios de 1,35 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ nos meses de novembro de 2002 a maio de 2003, sendo esses valores ligeiramente inferiores ao estimados para as áreas preservadas deste trabalho, enquanto em Pernambuco, foram encontrados valores semelhantes aos sítios considerados preservados neste trabalho.

No período chuvoso, conforme já destacamos em outro momento deste trabalho, foram encontrados os maiores valores de efluxo de CO₂, como pode ser visualizado na figura 30, comprovando a observação de Martins et al. (2010), que afirmaram que na Caatinga a maior disponibilidade de água durante a estação chuvosa deve resultar em maior atividade biológica. Comportamento semelhante foi observado por Amacher & Mackowiak (2011) na região de Logan, nos Estados Unidos, ao utilizar o IRGA para relacionar o efluxo de CO₂ e a umidade do solo, detectando que quanto mais água presente no solo, mais o fluxo aumentava.

Em relação ao efluxo mensal no ano de 2018 (tabela 20), nota-se pouca variação quando comparado com o ano de 2017, principalmente nas áreas preservadas. Por outro lado, há grande variação diária do efluxo de CO₂ nas áreas agrícolas e degradadas no período de seca.

Tabela 20. Valores médios, mínimos, máximos, Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variação (CV) de ECO_2 por meses de coletas de dados o ano de 2018.

Ponto	ECO_2 médio	Σ	Mínimo	Máximo	CV
Fevereiro					
Preservadas	5,63a	1,21	4,72	8,54	20,60
Degradadas	2,55b	1,00	1,51	4,80	43,50
Agrícolas	1,38c	0,53	0,65	2,30	38,22
Maio					
Preservadas	5,49a	0,58	4,48	6,30	9,96
Degradadas	2,21b	0,50	1,63	2,95	39,88
Agrícolas	0,99c	0,63	0,65	2,17	68,79
Agosto					
Preservadas	3,22a	0,35	2,66	3,84	15,13
Degradadas	0,45b	0,25	0,06	2,26	-44,50
Agrícolas	0,31b	0,14	0,19	1,88	43,01
Novembro					
Preservadas	2,62a	0,35	1,92	3,86	31,78
Degradadas	0,83b	0,25	0,39	2,26	86,49
Agrícolas	0,68b	0,14	0,23	1,88	73,46
Anual					
Preservadas	4,42a	0,54	1,92	9,20	12,69
Degradadas	1,51b	0,37	-0,05	4,88	28,24
Agrícolas	0,84c	0,24	0,11	2,62	28,61

Preservadas (P1 ao P4); Degradadas (D1 ao D4) e Agrícolas (A1 e A2). Médias seguidas de mesma letra em coluna, não diferem entre si pelo teste de Turkey a 5%.

Os resultados mostraram oscilações entre valores positivos e negativos, nos levando a considerar que o ecossistema podem atuar tanto como fonte, como sumidouro no decorrer dos anos. Ao compararmos com os dados sazonais, os valores obtidos no IRGA mostraram pouca variação no efluxo, tanto para áreas preservadas, áreas degradadas e agrícolas, mas principalmente nas áreas preservadas. A elevação da variação no efluxo sazonal entre os sítios degradados e agrícolas é atribuída as alterações antrópicas, perturbando o estado de equilíbrio, de acordo com a intensidade de uso a que os mesmos foram submetidos. A mudança no estado de equilíbrio altera a capacidade de regeneração das funções ecossistêmicas, com perdas praticamente irreversíveis e custos de recuperação altíssimos (LEMOS et al.; 2020).

A baixa variação de efluxo entre as áreas preservadas serve como valor de referência para a dinâmica de decomposição de compostos orgânicos e emissão de CO_2 na Caatinga. A respiração é baixa (possivelmente porque a baixa umidade do solo inibe a decomposição), resultando em uma eficiência de armazenamento de carbono superior (SCHIMEL, 2010). Assim, ela é influenciada pela presença de vegetação, das condições ambientais do local e da

atividade microbiana (CAMPO & MERINO, 2016), logo o percentual perdido é pequeno quando comparado ao estocado nas áreas preservadas.

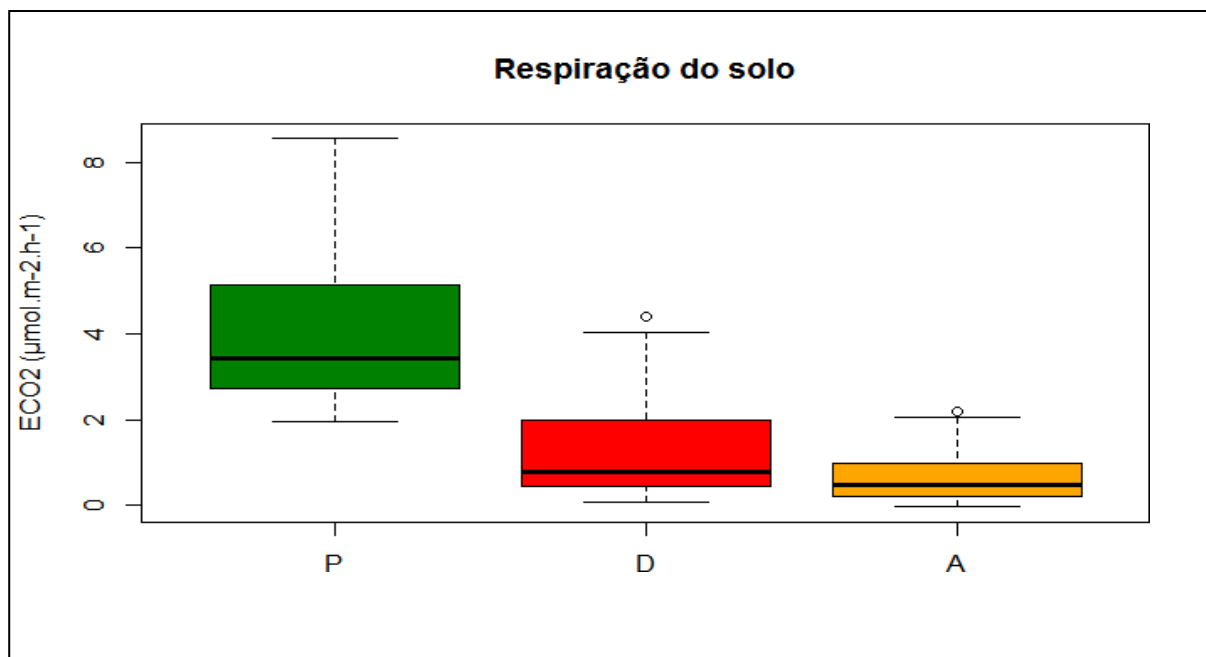


Figura 33 – Respiração do solo para as áreas agrícolas, degradadas e agrícolas.

Nesse caso, nossos dados apresentaram valores superiores aos encontrados por Ferreira et al. (2018), medindo áreas de Caatinga no período diurno e noturno em São João - Pernambuco, onde encontrou ECO₂ médio durante o dia de 3,16 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ no período chuvoso e no período seco 1,18 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Já no período noturno, os autores detectaram 3,47 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ no período chuvoso e 1,18 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ no período seco.

De forma geral, nosso trabalho confirma que tanto a biomassa quanto a liberação de CO₂ e a população microbiana apresentam grande flutuação devido a fatores climáticos e sazonalidade (ARAÚJO et al., 2009), principalmente umidade e temperatura do solo (CATTELAN;VIDOR, 1990), sendo correlacionada positivamente com a temperatura (COSTA et al., 2008).

Em áreas agrícolas e de floresta, a resposta da emissão de CO₂ está relacionada com as condições de temperatura e umidade do solo, podendo variar tanto espacial como temporalmente (KÖCHY et al., 2015). Para este trabalho, as análises da variação do ECO₂ em

função dos fatores ambientais foram realizadas com base na correlação de Pearson, através do coeficiente de correlação (r) (Tabela 21).

Tabela 21 - Correlação entre o efluxo de CO₂ e os fatores ambientais para as áreas preservadas, degradadas e agrícola.

Fatores Ambientais	Coef. de correlação	Coef. de correlação	Coef. de correlação
	(r) Preservada	(r) Degradada	(r) Agrícola
Temperatura do solo (°C)	-0,247***	-0,232***	-0,083 ^{ns}
Umidade do Solo (cm ³ .cm ⁻³)	-0,220**	0,002 ^{ns}	-0,168 ^{ns}
Precip. acumulada (mm)	0,662*	0,746*	0,786*

Ns: não significativa a diferença ($p \geq 0.05$); *: significativa a diferença ($p < 0.05$); **: significativa a diferença ($p < 0.01$); ***: significativa a diferença ($p < 0.001$)

A correlações encontradas para a temperatura e umidade do solo são negativas e classificadas de acordo com Shimakura (2006) como fracas, portanto, essas variáveis não demonstraram relação no controle da quantidade de emissão de CO₂ do solo para a Fazenda Salambaia. Em relação as correlações negativas, Lima et al. (2020) encontraram valores negativos para uma área de caatinga em Pernambuco quando avaliaram o efeito da temperatura do solo em sua respiração, o que demonstra que os maiores valores de ECO₂ podem ser decorrentes das menores temperaturas do solo, tanto para áreas de Caatinga como de pastagem degradada. D'Andrea et al., (2010) analisando variações de curto prazo em floresta nativa também não encontraram efeitos significativos entre o ECO₂ e atributos do ambiente (temperatura, umidade e evaporação) no Sudeste Brasileiro.

Entretanto, o efluxo de CO₂ correlacionou positivamente com a precipitação acumulada, na área preservadas ($r = 0,662$, $p < 0.01$), nas áreas degradadas ($r = 0,746$, $p < 0.01$) e na área agrícola ($r = 0,786$, $p < 0.01$). Isso indica que, para as áreas agrícolas e degradadas, há maior dependência da precipitação acumulada justamente por causa da maior evapotranspiração. Foi obtida correlação moderada para a área preservada, e forte para as áreas degradadas e agrícola. De acordo com Ferreira (2015), a precipitação pluviométrica pode exercer influência física sobre as emissões de CO₂. Zanchi et al. (2012) corroboram com essa constatação, afirmando que após eventos de chuva ocorre aumento da respiração do solo, devido a saída de CO₂ dos poros do solo, sendo um efeito físico. Em áreas de prática agrícola na Coréia do Sul, Kim et al. (2010) observaram alterações no fluxo de CO₂, sendo mais intenso após eventos de precipitação. Os valores encontrados sugerem que nas áreas degradadas e agrícolas os fatores ambientais exercem mais influência que na área preservada.

Para os fatores ambientais analisados não foram encontradas relações significativas. Em solos de Caatinga, foi constatado em outros trabalhos que as altas temperaturas do solo limitam a atividade microbiana porque provocam redução das populações microbianas alterando o fluxo de CO₂ (ARAÚJO et al., 2009; HOLANDA et al., 2015). Assim, a temperatura é importante para o efluxo de CO₂, pois ela regula a atividade microbiológica do solo e a germinação de sementes, apesar deste trabalho não ter identificado relevância quanto ao coeficiente de correlação encontrado, cuja explicação pode ser atribuída a baixa variação diária e sazonal dos dados de temperatura das áreas analisadas (MCKILLUP & DYAR, 2010). Esses comportamentos também foram encontrados por Silva (2016) em uma área no estado de São Paulo. O autor constatou que possivelmente não foram encontrados modelos lineares ou quadráticos significativos devido a baixa variação da temperatura do solo.

Entretanto, observamos similaridade nos padrões do ECO₂ com a precipitação acumulada. O efeito dessas variáveis do ambiente sobre os efluxos de CO₂ foram devido a presença de árvores no local, a fração menos decomposta da serrapilheira (horizonte HOo) foi apontada como o mais importante atributo relacionado à matéria orgânica do solo para os ECO₂ (D'ANDREA, 2004). Assim, a presença de árvores e, conseqüentemente, a influência do seu sistema radicular e a camada serrapilheira ou resíduos orgânicos à superfície têm uma contribuição expressiva nos ECO₂. No presente trabalho, isso também foi observado que a serrapilheira é fonte de carbono e intensifica a dinâmica de decomposição da MOS, mantém a umidade do solo em níveis mais elevados e isso pode auxiliar a manter localmente a água do solo adicionada por precipitação.

Assim, podemos considerar que no caso da Fazenda Salambaia, o fator de influência para a variação dos efluxos pode ser a recarga hídrica através da precipitação. Em relação a correlação positiva com a precipitação, Leon et al. (2014) encontraram relação positiva entre a precipitação e o fluxo de CO₂, mas em contrapartida, em eventos de seca não foi observada correlação significativa. A precipitação acumulada demonstra importância para o ECO₂, sendo ela fundamental para os processos biológicos/ecológicos em toda a região semiárida. Notou-se que mesmo com ocorrência de chuvas o efluxo nas áreas degradadas é negativo, mostrando que a influência do uso da terra é tão importante quanto a presença de pluviosidade para a manutenção positiva do sistema.

3.7 Efluxos de CO₂ negativos como identificador de desertificação

Durante a condução desta pesquisa foram encontrados comportamentos semelhantes, e foram feitas coletas em áreas bastante degradadas, identificadas recentemente no semiárido paraibano na pesquisa de Silveira (2017) para o município de Picuí. A pesquisa resultou em efluxos com valores negativos para o fluxo líquido de CO₂ no solo e troca baixa entre fatores abióticos desse elemento (SILVEIRA, 2017).

Denominado como Influxo, ele consiste no processo de absorção de CO₂, encontrados em regiões desérticas, áridas e semiáridas, a temperaturas maiores que 30 °C, e em solos alcalinos (XIE et al., 2008; SCHIMEL et al., 2010; SCHLESINGER et al., 2009; WANG et al., 2016). Regiões áridas e semiáridas apresentam capacidade de sequestro de CO₂, assim, o influxo foi medido na área degradada e agrícola. Importe ressaltar que nessa pesquisa não há influxo nas áreas denominadas preservadas. O influxo não impacta no sequestro de C, pois se refere ao ar do solo, e não à MOS ou ao C nas raízes ou na biomassa microbiana. Foram encontrados para as áreas degradadas influxos nos pontos D1 e D4 e para a agrícola no ponto A1, conforme mostra a tabela 22.

Tabela 22 - Influxo de CO₂ na Fazenda Salambaia, PB.

Ano	Período	Ponto	Horário	Influxo de CO ₂ ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)
2017	Pré-chuvoso	D1	0 AM	-1,04
			12 AM	-1,04
			15 PM	-0,47
		A1	12 AM	-0,24
			15 PM	-0,07
			15 PM	-0,07
	Chuvoso	D1	9 AM	-0,36
	Pré-seca	D1	12 PM	-0,39
			9 AM	-1,42
			12 AM	-1,35
		D4	18 PM	-0,14
			0 AM	-0,39
			9 AM	-0,60
		A1	12 AM	-0,12
			18 PM	-0,05
			18 PM	-0,05
2018	Pré-chuvoso	-	-	-
	Chuvoso	-	-	-
	Pré-seca	D1	0 AM	-0,73
			3 AM	-0,83
			9 AM	-1,35
			18 AM	-0,93
	Seca	-	-	-
	Seca	-	-	-

Os efluxos negativos foram registrados nas áreas denominadas degradadas e agrícolas nos horários 0 horas, 3 horas, 9 horas, 12 horas, 15 horas e 18 horas. Para o horário das 15 horas foi somente obtido influxo no período chuvoso no mês de fevereiro de 2017 para os pontos D1 e A1.

Foi constatada a predominância desses valores durante a noite e nas primeiras horas do dia tanto para as áreas degradadas como agrícolas, sendo que esse comportamento da absorção noturna foi semelhante ao relatado por Xie et al., (2008) em um local de deserto salino na China e no deserto do Chihuahuan por Hamerlynck et al. (2013), onde ocorre elevada salinidade, alcalinidade, temperaturas baixas e em períodos de seca, como determinantes desse processo. Os fluxos negativos foram encontrados no período que possuía as menores temperaturas do solo, facilitando a difusão do CO₂ do ar próximo ao solo (maiores concentrações) para os poros do solo. Levantando a hipótese que a atividade no solo é tão baixa que os poros do solo contém ar com uma menor concentração de CO₂.

A microbiota do solo é extremamente sensível à qualquer mudança e é utilizada como indicador de desertificação. Segundo Martins et al. (2010), poucos são os trabalhos que envolvem variáveis químicas e microbianas de solos na região semiárida, bem como a sua utilização como indicadores do processo de desertificação em áreas com níveis crescentes de degradação.

Através do seu efeito na vegetação e nos solos, a desertificação altera a absorção e liberação de gases de efeito estufa associados (IPCC, 2019). Diante das análises realizadas, os resultados indicam que os solos que mais armazenam carbono também são os que mais emitem, e sugerem que esses solos chegaram a um estágio de desertificação, não sustentando mais atividade microbiológica, quando comparado com as áreas preservadas da região.

A mudança na dinâmica, tanto do ponto de vista natural como de uso, perturba o sistema, principalmente nas áreas denominadas degradadas e agrícolas, criando portanto ambientes desequilibrados, o que se reflete diretamente nos solos e nos efluxos de CO₂, onde há nestes últimas situações de elevada degradação, como destacam Alves et al. (2011). Assim, é importante ressaltar que os dados apresentados e os valores baixos encontrados nos sítios D e A, indicam que os solos denominados degradados e agrícolas estão passando por elevado stress biológico e degradação a nível microbiológico.

Como estamos analisando áreas situadas em uma região de clima seco, o efeito acumulado desses processos ao longo do tempo em ambientes com as características das áreas degradadas e agrícolas, podem levar ao processo de desertificação. A desertificação ameaça a região Semiárida Brasileira, sendo ela considerada uma das maiores áreas propensas a esse processo, conforme relatado pelo PAN-BRASIL (2005) e por Vieira et al. (2015). Além disso, Silva & Barbosa (2017) afirmam que mais de 60% da Caatinga foi transformada em ecossistemas antropogênicos. No caso do Cariri Paraibano, microrregião deste estudo, levando em consideração aspectos da cobertura vegetal, Souza, Queiroz & Cardoso (2015) identificaram que mais de 80% dessa região estão submetidos a algum nível de desertificação, especialmente nas áreas de solos Neossolos Litólicos, predominantes na área de estudo deste trabalho.

Diante das análises realizadas, os resultados indicam que os solos das áreas degradadas e com uso agrícola chegaram a um estágio de degradação elevado, com baixo efluxo de CO₂, chegando a uma situação microclimática semelhante ao que se encontra em zonas áridas (HAMERLYNCK, et al., 2013; SOPER et al, 2017), ainda que sob o domínio de outra realidade pluviométrica, diminuindo em muito sua capacidade natural de sustentar a atividade microbiológica, quando comparado com outros solos na região, submetidos a usos menos intensos.

Estimativas e mapeamentos para identificação de áreas em processo de desertificação no Brasil, assim como em todo o mundo, dada a sua complexidade, ainda compõem uma lacuna em aberto nesse tipo de investigação, nas escalas global, regional e local (ZUCCA et al., 2012; ZHANG & HUISINGH, 2018). Embora os solos coletados nos sítios degradados e agrícolas nesta pesquisa não sejam alcalinos, além de a região não apresentar clima árido, esse mesmo processo foi observado no período seco e com temperaturas mais baixas quando comparamos a variação diária. Assim, esse comportamento deve ser melhor observado em uma série temporal maior, pois os resultados aqui apresentados, adicionados a esses outros, podem indicar, portanto, um comportamento inédito em se tratando de ambientes de Caatinga, o que deve ser melhor investigado e discutido em trabalhos futuros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Destacamos que o estudo contribuiu para o entendimento do efluxo de CO₂ em florestas sazonalmente secas do tipo Caatinga, com informações ainda bastante escassas na literatura, principalmente aquelas resultantes de medições em campo. Por conta de sua exploração secular e com boa parte da área antropizada, a Caatinga poderá sofrer drasticamente caso não sejam tomadas medidas de manejo sustentável para essa região.

Os resultados encontrados demonstram uma estreita relação do efluxo de CO₂ com a presença/ausência de vegetação, cabendo a pluviosidade, umidade e as temperaturas um efeito macroclimático não negligenciável. Nesse caso, destacamos a importância da Caatinga como fonte de armazenamento de carbono, indicando que, sendo preservada a biomassa através da matéria orgânica do solo, quer seja através de ações conservacionistas ou uso sustentável, haverá contribuição positiva.

Os efluxos de CO₂ encontrados nos anos de 2017 e 2018 são relativamente baixos, demonstrando o impacto da seca na Caatinga. A Fazenda Salambaia pode atuar como fonte e sumidouro de CO₂, entretanto para poder inferir esses efeitos a longo prazo é necessário fazer monitoramentos contínuos dessa dinâmica. Destacamos a importância dos resultados experimentais que devem ser usados e expandidos para outras áreas de Caatinga, bem como a influência do ECO₂ no armazenamento de carbono em áreas que estão pouco representadas.

A mudança no uso e cobertura do solo, e a retirada de forma intensa da vegetação, pode provocar uma situação microclimática semelhante ao que se encontra em zonas áridas, a despeito da ocorrência “normal” ou acima da média do que é registrado quanto a pluviosidade para regiões como essa, sinalizando que o desmatamento excessivo pode estar afetando a capacidade de retenção de carbono, portanto afetando o sistema em seu funcionamento, passível de ser observado na paisagem através das áreas desmatadas.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios da natureza no Brasil**: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AGUIAR, A. E. X.; OLIVEIRA, I de P.; CRUZ, M. L. B. da. Degradação ambiental/desertificação na região de Canindé- Ce: Análise e mapeamento espectro-temporal a partir de Imagens Landsat. **VI Seminário Latino Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero Americano de Geografia Física**. Universidade de Coimbra, 2010.

AGUIAR, S.; SANTOS, I. S.; ARÊDES, N.; SILVA, S. Biome-networks: in-formation and communication for sociopolitical action in eco-regions. **Ambiente & sociedade**, v. 19, n. 3, p. 231-248, 2016.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – **Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation**, version 1.0.

ALVES, A. R.; SOUTO, J. S.; SANTOS, R. V.; CAMPOS, M. C. C. Decomposição de resíduos vegetais de espécies da Caatinga na região de Patos, PB. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 1, n. 1, 2006.

ALVES, J. J. A. Caatinga do Cariri Paraibano. **GEONOMOS**, v. 17, n.1, p. 19-25, 2009.

ALVES, T. dos S.; CAMPOS, L. L.; NETO, N. E.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Sci. Agron. (Online)**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 341-347. 2011.

ALVES, T. L. B.; VIEIRA, P. A. 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 (Online)**, Goiânia, v. 35, n. 3, p. 530-553, 2015.

AMACHER, M. C.; MACKOWIAK, C. L. Seasonal Soil CO₂ Flux Under Big Sagebrush (*Artemisia tridentata* Nutt.). **Natural Resources and Environmental Issues**. v. 17. n. 27, p. 1-13, 2011.

ANA. Monitor de Secas. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/o-monitor-de-secas>> Acesso em: 05 abr. 2019.

ANDRADE, L. A.; PEREIRA, I. M.; LEITE, U. T.; BARBOSA, M. R. V. Análise da cobertura de duas fitofisionomias de caatinga, com diferentes históricos de uso, no município de São João do Cariri, Estado da Paraíba. **Cerne**, Lavras, v. 11, nº 3, p. 253 – 262, jul/set. 2005.

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

ANTA, R. C. de; LUÍS, E.; FEBRERO-BANDE, M.; GALIÑANES, J.; MACÍAS, F.; ORTÍZ, R.; CASÁS, F. Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution, **Geoderma**, v. 370, 2020.

ARAUJO, K. D. **Variabilidade temporal das condições climáticas sobre as perdas de CO₂ na encosta do açude Namorados, em São João do Cariri-PB**. 2005. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação do Solo e Água). Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia.

ARAUJO. A. S. F; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23. n. 3, p. 66-75, 2007

ARAUJO, K.; PARENTE, H.; CORREIA, K.; DANTAS, R.; ANDRADE, A.; PAZERA JR, E. Liberação de Dióxido de Carbono (CO₂) Em área de Caatinga no Semi-Árido da Paraíba. **Geoambiente On-Line**, v. 12, p. 01-12, 2009.

ARAUJO, K. D.; DANTAS, R.T.; ANDRADE, A. P.; PARENTE, H.N. Cinética de Evolução de dióxido de carbono em área de Caatinga em São João do Cariri-PB. **Revista Arvore**. v. 35, n. 5, p. 1099-1106, 2011.

ARAUJO, K. D.; SOUZA, M. A.; SANTOS, G. R. dos; ANDRADE, A. P. de; NETO, J. V. F. Atividade microbiana no solo em diferentes ambientes da região semiárida de Alagoas. **Geografia**, Londrina, v. 25, n. 2, p. 05- 18, 2016.

ARAUJO, M. A.; ZINN, Y. L.; LAL, R. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands. **Geoderma**, v. 300, p.1-10, 2017.

ARAUJO FILHO, J. C. de; RIBEIRO, M. R.; BURGOS, N.; MARQUES, F. A. Solos da caatinga. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). *Pedologia: solos dos biomas brasileiros*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 227-260. 2017.

ARAÚJO FILHO, R. N. de; FREIRE, M. B. G. D. S.; 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**, v. 407, p. 210-220, 2018.

ASNER, G. P.; SCURLOCK, J. M. O.; HICKE, J. A. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. **Global Ecology & Biogeography**, v. 12, p. 191-205, 2003.

BAHN, M.; REICHSTEIN, M.; DAVIDSON, E.; GRÜNZWEIG, J.; JUNG, M.; CARBONE, M.; EPRON, D.; MISSON, L.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; SAVAGE, K.; TRUMBORE, S.; GIMENO, C.; CURIEL YUSTE, J.; TANG, J.; VARGAS, R.; JANSSENS, I. Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes. **Biogeosciences (Online)**, v. 7, p. 2147-2157, 2010. doi: 10.5194/bg-7-2147-2010.

BALDOCCHI, D., FALGE, E., GU, L., OLSON, R., HOLLINGER, D., RUNNING, S., ANTHONI, P., BERNHOFER, CH., DAVIS, K., EVANS, R., FUENTES, J., GOLDSTEIN, A., KATUL, G., LAW, B., LEE, X., MALHI, Y., MEYERS, T., MUNGER, W., OECHEL, W., PAW U, KT, PILEGAARD, K., SCHMID, HP, VALENTINI, R., VERMA, S., VESALA, T., WILSON, K., & WOFSY, S. FLUXNET: Uma nova ferramenta para estudar a variabilidade temporal e espacial de dióxido de carbono em escala de ecossistema, vapor de água e densidades de fluxo de energia, **Bulletin of the American Meteorological Society** , 82 (11), 2415-2434, 2001.

BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, p.479-492, 2003.

BALLÉN, L. A. C., SOUZA, B. I., LIMA, E. R. V. Análise espaço-temporal da cobertura vegetal na Área de Proteção Ambiental do cariri, Paraíba, Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**. v. 36, n. 3, p. 555-571, 2016.

BAPTISTA, G. M. M. Validação da Modelagem de Sequestro de Carbono para Ambientes Tropicais de Cerrado, por meio de Dados AVIRIS e HYPERION. **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte. p. 1037-1044, 2003.

BARBERA, A. C. Greenhouse Gases Formation and Emission. **Encyclopedia of Ecology**, 2nd Edition (2.a ed.). v. 2, p. 329-333, 2019.

BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brasil. **Jornal of Arid Environments**, v. 67, p. 288-307, 2006.

BARKLEY, M. P.; FRIEß, U.; MONKS, P. S. Measuring atmosférico CO₂ do espaço usando Full Spectral Initiation (FSI) WFM-DOAS, **Atmos. Chem. Phys.**, 6, 3517-3534, <https://doi.org/10.5194/acp-6-3517-2006>, 2006.

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.

BATJES, N. H.; DIJKSHOORN, J. A. Carbon and Nitrogen Stocks in the Soils of the Amazon Region. **Geoderma**, v. 89, p. 273-286, 1999.

BAZAME, H. C.; ALTHOFF, D.; FILGUEIRAS, R.; CALIJURI, M. J.; OLIVEIRA, J. C. de. Modeling the Net Primary Productivity: A Study Case in the Brazilian Territory. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**. V. 47, p. 1727-1735, 2019.

BECERRIL-PIÑA, R.; MASTACHI-LOZA, C. A.; GONZÁLEZ-SOSA, E.; DÍAZ-DELGADO, C.; BÂ, K. M. Assessing desertification risk in the semi-arid highlands of central Mexico. **Jornal of Arid Environments**, v. 120, p. 4-13, 2015.

BECKER, E. L. S. **História do Pensamento Geográfico**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano. 2006. 112p.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. Tradução Olga Cruz – Caderno de Ciências da Terra. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, nº13, 1972.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. de A.; SILVA, B. B. da; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. de F. e; Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 18, n.1, p. 73-84, 2014.

BOND-LAMBERTY, B.; THOMSON, A. A global database of soil respiration data. **Biogeosciences**, v. 7, p. 1915-1926, 2010.

BOUSSINGAULT, J. B., LEVY,. Sur la composition de l'air confiné dans la terre végétale (On the composition of stable air in vegetable earth). **Annales de Chimie et Physique** 37 (3), 5-50, 1853.

BRANDÃO, S. L; LIMA, S. C. pH e condutividade elétrica em solução do solo, em áreas de Pinus e Cerrado na Chapada, em Uberlândia (MG). **Caminhos de Geografia**, v. 3, n. 6, p. 46-56, 2002.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p.

BRASIL. Lei nº 7.827, de 27 de setembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/17827.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%207.827%2C%20DE%2027%20DE%20SETEMBRO%20DE%201989.&text=159%2C%20inciso%20I%2C%20al%C3%ADnea%20c,FCO%2C%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A2ncias. Acesso em: 10 de fevereiro de 2019.

BRASSEUR, G; PRINN, R. G.; PSZENNY, A. A. P. EDS. Atmospheric Chemistry in a Changing World. An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research. The International Global Atmospheric Chemistry Project of the International Geosphere-Biosphere Programme. Berlin & Heidelberg, Springer-Verlag. (2003)

BRECKAM, C. T.; MEDEIROS, R. M. de; FRANCISCO, P. R. M.; GOMES FILHO, M. F. Climatologia da precipitação de Cabaceiras – PB no período entre 1926 – 2011. **Revista Educação Agrícola Superior**. v. 28, n. 2, p. 132-135, 2013.

CÁMARA, R. República Dominicana: dinámica del medio físico en la región Caribe (Geografía física, Sabanas y Litoral). Aportación al conocimiento de la tropicalidad insular. 1997. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Doctorado en Geografía Física. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Sevilla, Espanha, 1997.

CÁMARA, R. Passo bioclimático, regimes ecodinâmicos e formações vegetais da ilha de Hispaniola na República Dominicana. in JM Panareda. **Estudios en Biogeografía**. Terrassa. Serviço de Publicações da Universidade de Girona, pp. 39-58, 2004.

CÁMARA, R.; MARTÍNEZ, B. **Plantilla para el cálculo del balance hídrico y el diagrama bioclimático: su aplicación a estudios de hidrología y geobotánica**. Equipo de Trabajo Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo del Grupo de Investigación Cuaternario y Geomorfología (PAI RNM-273). Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Sevilla, España, 2012.

CAMPO, J.; MERINO, A. Variations in soil carbon sequestration and their determinants along a precipitation gradient in seasonally dry tropical forest ecosystems. **Global Change Biology**, v. 22, n. 5, p. 1942-1956, 2016.

CARVALHO, T. R. A. de. **Índice de Área Foliar em Caatinga Preservada: Avaliação in-situ e através da resposta espectral da vegetação**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 80 f., 2016.

CATTELAN, A. J. VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 133-142, 1990.

CAVALCANTE, M. B. Ecoturismo no Bioma Caatinga: O caso do Parque Estadual da Pedra da Boca, Paraíba. **Revista Nordestina de Ecoturismo**. Aracaju, v. 2, n. 1, p. 25-38, 2009.

CERQUEIRA, D. B. de. **Levantamento do estoque de carbono na vegetação com base em geotecnologias**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2007.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.

COHEN, M.; DUQUÉ, G. Les deux visages du Sertão: stratégies paysannes face aux sécheresses (Nordeste du Brésil). **Éditions de L'IRD**, 2001.

COLWELL, R. N. (Ed.), **Manual of Remote Sensing**, 2nd. Ed., Falls Church: ASP&RS, 1983.

CONGEDO, L. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Release 7.9.5.1**, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25480.65286/1>

COELHO, A. M. **Nutrição e adubação do milho**. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Milho para silagem: tecnologias, sistemas e custo de produção. Sete Lagoas: EMBRAPA, 2006. p. 1-10. (EMBRAPA-. Circular Técnica, 18)

CORREIA, K. G.; ARAÚJO FILHO, R. N.; MENEZES, R. S. C.; SOUTO, J. S.; FERNANDES, P. D. Atividade microbiana e matéria orgânica leve em áreas de Caatinga de diferentes estágios sucessionais no semiárido paraibano. **Revista Caatinga**, v. 28, p. 196-202, 2015.

COSTA, F. de S.; GOMES, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 693-700, 2006.

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.323-332, 2008.

COSTA, C. R. G. **Dinâmica temporal do efluxo de CO₂ e produção de glomalina em área de Caatinga sob Neossolo Litólico**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação e, Ciências do Solo), Universidade Federal da Paraíba, Areia, 83 f., 2019.

DALAL, R. C.; ALLEN, D. E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. **Australian Journal of Botany**, v. 56, p. 369-407, 2008. <https://doi.org/10.1071/BT07128>

DALMAGO, G. A.; CUNHA, G. R.; SANTI, A.; PIRES, J. L. F.; SCHWEIG, E. **Produtividade primária líquida do ambiente natural – indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. (ISSN 1518-6512 – Documentos Online 100. http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do100.htm)

DAVIDSON, E. A.; SAVAGE, K.; VERCHOT, L.V.; NAVARRO, R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. **Agricultural and Forest Meteorology** 2002; 113(1-4): 21-37. [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00100-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00100-4).

D' ANDREA, A. F. **Fluxo de CO₂ do solo em áreas com cafeeiros e povoamentos florestais**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Agronomia), Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 110 f., 2004.

D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N. ; SILVA, C. A. Emissões de CO₂ do solo: métodos de avaliação e influência do uso da terra. In: Renato Roscoe; Fabio Martins Mercante; Julio Cesar Salton. (Org.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. 1 ed.Dourados: EMBRAPA AGROPECUÁRIA OESTE, p. 198-242, 2006.

D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FREITAS, D. A. F. de; ROSCOE, R.; GUIMARAES, P. T. G. **VARIAÇÕES DE CURTO PRAZO NAS EMISSÕES DE CO₂ DO SOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO DO CAFEIEIRO**. **Quim. Nova**, v. 32, N. 9, p. 2314-2317, 2009.

D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; SILVA, C. A. **Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa**. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, p. 85-92, 2010.

D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F. de; CURI, N.; SILVA, C. A. VARIABILIDADE ESPACIAL DO FLUXO DE CO₂ DO SOLO EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO. *FLORESTA*, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 407-422, abr./jun. 2011.

DENG, Q.; HUI, D.; ZHANG, D.; ZHOU, L.; LIU, J.; LIU, S.; CHU, G.; LI, J. Effects of precipitation increase on soil respiration a threeyear old experiment in subtropical forests in China. *PLoS ONE*, v. 7, n. 7, 2012; e41493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041493>

DIAS, J. D. **Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em floresta nativa da Amazônia**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade Federal da São Paulo, Piracicaba. 88 fl.

DIAS, E. F.; MAZETTO, F. A importância da paisagem na Geografia. *Sociedade e Território*, Natal, v. 26, n.1, p. 92-106. 2014.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, Washington, v. 263, n. 5169, p. 185-190, 1994.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. DE; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos**. 2nd ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2011.

DONOHUE, R. J.; RODERICK, M. L.; MCVICAR, T. R.; FARQUHAR, G. D. Impact of CO₂ fertilization on maximum foliage cover across the globe's warm, arid environment. *Geophysical Research Letters*, v. 40, p. 3031–3035, 2013.

DRUMOND, M. A.; CARVALHO FILHO, O. M. de. G. In: Kiill, L. H. P.; Menezes, E. A. (Ed.). **Espécies vegetais exóticas com potencialidades para o semi-árido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. cap. 10, p. 301-321, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de levantamento e Conservação de solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

ERASMI, S.; SCHUCKNECHT, A.; BARBOSA, M. P.; MATSCHULLAT, J. Vegetation Greenness in Northeastern Brazil and Its Relation to ENSO Warm Events. **Remote Sensing**, v. 6, p. 3041-3058, 2014.

ESA – EUROPEAN SPACE AGENCY. **MultiSpectral Instrument (MSI) Overview**. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>> . Acesso em: 31 de dezembro de 2018.

FAN, L.; WIGNERON, J.; CIAIS, P.; CHAVE, J.; BRANDT, M.; FENSHOLT, R.; SAATCHI, S. S.; BASTOS, A.; AL-YAARI, A.; HUFKENS, K.; QIN, Y. XIAO, X.; CHEN, C.; MYNEMI, R. B.; FERNANDEZ-MORAN, R.; MIALON, A.; RODRIGUES-FERNANDEZ, N. J.; KERR, Y.; TIAN, F.; PEÑUELAS, J. Satellite-observed pantropical carbon dynamics. **Nature Plants**, v. 5, p. 944-951, 2019.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature, **Soil Biol. Biochem.**, v. 33, p. 155-165, 2001.

FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. D.; OLIVEIRA, S. R. D. M.; TAVARES, R. L. M.; CARVALHO, J. L. N. Use of data mining techniques to classify soil CO₂ emission induced by crop management in sugarcane field. **PLoS ONE**, v. 13(3): e0193537, 2018.

FÉRET, J. B.; LE MAIRE, G.; JAY, S.; BERVEILLER, D.; BENDOULA, R.; HMIMINA, G.; CHERAIET, A.; OLIVEIRA, J. C.; PONZONI, F. J.; SOLANKI, T.; BOISSIEU, F.; CHAVE, J.; NOUVELLON, Y.; PORCAR-CASTELL, A.; PROISY, C.; SOUDANI, K.; GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P.; LEFEVRE-FONOLLOSA, M. J. Estimating leaf mass per area and equivalent water thickness based on leaf optical properties: potential and limitations of physical modeling and machine learning. **Remote Sensing of Environment** 231: 110959, 2018.

FERREIRA, E. A. B.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. **Medidas do Fluxo de CO₂ do Solo pelos Métodos da Absorção Alcalina e Analisador de Gás Infravermelho em Diferentes Sistemas de Manejo no Cerrado**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2005.

FERREIRA, C. C.; XAVIER, F. S.; CORREIRA, K. G.; ANTONINO, A. C. D. Estudo do Efluxo de CO₂ do solo em caatinga e pasto no agreste meridional de Pernambuco. In: **XIII**

Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão – JEPEX 2013 – UFRPE: Recife, 09 a 13 de dezembro, 2013.

FERREIRA, A. C. C.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F. de; EISENHAUER, N. Land-Use Type Effects on Soil Organic Carbon and Microbial Properties in a Semi-arid Region of Northeast Brazil. **Land Degradation and Development**. v. 27: p. 171-178, 2014. doi: 10.1002/ldr.2282.

FERREIRA, C. R. P. C. **Respiração do solo em áreas de caatinga e de pastagem no agreste de Pernambuco**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 63 f., 2015.

FERREIRA, C. R. P. C.; ANTONINO, A. C. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CORREIA, K. G.; LIMA, J. R. S.; SOARES, W. A.; MENEZES, R. S. C. Soil CO₂ Efflux Measurements by Alkali Absorption and Infrared Gas Analyzer in the Brazilian Semiarid Region. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.

FIGUEIRÓ, A. S. **Biogeografia: dinâmicas e transformações da natureza**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FRANK, A. B.; LIEBIG, M. A.; TANAKA, D. L. Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland. **Soil & Tillage Research**, v. 89, p. 78–85, 2006.

FURTADO NETO, A. T.; JUNIOR, M.; MACHADO, W., TAPAJÓS, R.; FIGUEIRA, A. P. B.; AGUIAR, D. R.; SILVA, H. C. P.; SILVA, R. da. Efluxo de CO₂ do solo em uma área de -bosque localizada no campus II da UFPA, Santarém , PA. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 31, p . 117-120, 2009.

FURTADO NETO, A. T.; JUNIOR, M.; TAPAJÓS, R.; VALENTE, F.; COSME, R.; MOURA, J. M. S.; SILVA, H. C. P.; SILVA, R.; KELLER, M.; CRILL, P. Influência da umidade no efluxo de CO₂ do solo para atmosfera em uma área de floresta primária, Belterra, PA. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, Edição especial, p. 25-27, 2013.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J.S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, p. 492-501, 1997.

GERRARD, J. **Soil Geomorphology** - an integration of pedology and geomorphology. Londres: Chapman & Hall, 1992).

GHILDYAL, B. P.; TRIPATHI, R. P. **Soil Physics**. New York: John Wiley & Sons, 1987.

GIONGO, V; CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. S. M.; GAVA, C. A. T. Carbono no Sistema Solo-Planta no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1233-1253, 2011.

GOVERNO DA PARAÍBA. **Decreto de 4 de junho de 2004**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Dnn/Dnn10203.htm

GROFFMAN, P. M.; McDOWELL, W. H.; MYERS, J. C.; MERRIAM, J. L. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests. **Soil Biology & Biochemistry**, v.33, p.1339-1348, 2001.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C O. (Org.). **Degradação dos Solos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014.

HAMERLYNCK, E. P; SCOTT, R. L.; SÁNCHEZ-CAÑETE, E. P.; BARRON-GAFFORD, G. A. Nocturnal soil CO₂ uptake and its relationship to subsurface soil and ecosystem carbon fluxes in a Chihuahuan Desert shrubland. **J. Geophys. Res. Biogeosci.**, v. 118, p. 1593-1603, 2013.

HARRIS, N. L., BROWN, S., HAGEN, S. C., SAATCHI, S. S., PETROVA, S., SALAS, W., HANSEN, M C.; POTAPOV, P.; LOTSCH, A. Baseline Map of Carbon Emissions from Deforestation in Tropical Regions. **Science**, v. 336, p. 1573-1576, 2012.

HOFHANSL, F., CHACÓN-MADRIGAL, E., FUCHSLUEGER, L. JEJNKING, D.; MORERA-BEITA, A.; PLUTZAR, C.; SILLA, F.; ANDERSEN, K. M.; BUCHS, D. M.; DULLINGER, S.; FIEDLER, K.; FRANKLIN, O.; HIETZ, P.; HUBER, W.; QUESADA, C. A.; RAMMIG, A.; SCHRODT, F.; VICENT, A. G.; WEISSENHOFER, A.; WANEK, W.

Climatic and edaphic controls over tropical forest diversity and vegetation carbon storage. **Scientific Reports**, v. 10, n. 5066, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61868-5>.

HOLANDA, A. C.; FELICIANO, A. L. P.; MARANGON, L. C.; FREIRE, F. J.; HOLANDA, E. M. Decomposição da serapilheira foliar e respiração edáfica em um remanescente de Caatinga na Paraíba. **Revista Arvore**, v.39, p.245-254, 2015.

HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p.205-309, 1988.

HUETE, A. R., JUSTICE, C., LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing Environment**, v 49, p. 224-234, 1994.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

IBGE. **Mapa de Biomas do Brasil, primeira aproximação**. Rio de Janeiro : IBGE, 2004.

IBGE. **Censo Demográfico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. rev. e amp. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171 p.

IBGE. **IBGE divulga nova divisão territorial com foco nas articulações regionais**.

Publicado em 29/06/2017. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-salade-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/10515-ibge-divulga-nova-divisao-territorialcom-foco-nas-articulacoes-regionais>> . Acesso em: 15 de abril de 2019.

IBGE. **Biomas e Sistema Costeiro-Marinheiro do Brasil**. Disponível em : <<https://www.ibge.gov.br/apps/biomas/>> Acesso em 20 de janeiro de 2020.

INPE. **Catálogo de Imagens**. Disponível em: < <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>> Acesso em: 11 de janeiro de 2017.

IPCC - **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Climate Change 2001: the scientific basis. Cambridge: University Press.

IPCC, 2007: **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R. K, Pachauri and L. a. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014, 151 p.

IPCC 2019: **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems** [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].

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**. Vol. 1. Boletim Técnico 26, Série Pedologia, Nº 14, Recife, 1973.

JACOMINE, P. K. T. Solos sob caatinga: características e uso agrícola. In: Alvarez, VH.; Fontes, LEF.; Fontes, MPF. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS; UFV, DPS, 1996. p. 95-133.

JANSEN, H. H. Soil carbon: A measure of ecosystem response in a changing world? **Canadian Journal of Soil Science**, v. 85, numero especial, p. 467-480, 2005.

JASSAL, R.S.; BLACK, T.A.; DREWITT, G.B.; NOVAK, M.D.; GAUMONT-GUAY, D. & NESIC, Z. A model of the production and transport of CO₂ in soil: Predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor. **Agric. For. Meteorol.**, v, 124, p.219-236, 2004.

JENNY, H. **Factors of soil formation** – a system of quantitative edology. New York: McGraw-Hill, 1941.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Editora Parêntese, São José dos Campos, SP, 2009. 598p.

JOHNSON, M. G. **The role of soil management in sequestering soil carbon**. In: LAL, R. et al. (eds). Soil management and greenhouse effect Advances in soil science. Boca Raton: CRC, p.351-362, 1995.

JUNGKUNST, H. F.; FIEDLER, S.; STAHR, K. N₂O emissions of a mature Norway spruce (*Picea abies*) stand in the Black Florest (southwest Germany) as differentiated by the soil pattern. – **J. Geophys. Research** 109: D07302, 2004.

KANG, S.; DOH, S.; LEE, D.; JIN, V.L.; KIMBALL, J. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. **Global Change Biology**, v.9, p.1427-1437, 2003.

KARABURUN, A. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. **Ozean journal of applied sciences**, 2010.

KAZMIERCZAKI, M. L. **Uso de dados AVHRR/NOA GAC para análise da sazonalidade da caatinga**. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, INPE, p.513-518, 1996.

KIM, D. G.; MU, S.; KANG, S.; LEE, D. Factors controlling soil CO₂ effluxes and the effects of rewetting in adjacent deciduous, coniferous, and mixed forests in Korea. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 42, n. 4, p. 576–585, 2010.

KÖCHY, M.; HIEDERER, R.; FREIBAUER, A. Global distribution of soil organic carbon- Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world. **Soil** 1, p.351-365. 2015.

KUZYAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 38, p. 425-448, 2006.

LAGE, C. A.; RIBEIRO, J. P. F. M.; BAPTISTA, G. M. de M. Análise do Sequestro de Carbono com Dados Hiperespectrais Hyperion Reamostrados para WorldView 2. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, 2015.

LAGES, G. de A.; MARINHO, M. de S.; NASCIMENTO, M. A. L. do; MEDEIROS, V. C. de; DANTAS, E. L. & FIALHO, D. Mar de Bolas do Lajedo do Pai Mateus, Cabaceiras, PB: Campo de matações graníticas gigantes e registros rupestres de civilização pré-colombiana. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S.; Xavier et al., **REGNE**, v. 2, n. Especial (2016) 303 BerbertBorn, M.; Sallunfilho, W.; Queiroz, E.T.; (Edit.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, 2013.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, p. 1623-1627, 2004. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>

LAL, R. Carbon sequestration in soil. **CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources**. v. 3, 2008.

LAMB, A.; GREEN, R.; BATEMAN, I.; BROADMEADOW, M.; BRUCE, T.; BURNEY, J.; GOUDING, K. The potencial for land sparing to offset greenhouse gas emissions from agriculture. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 488-492, 2016.

LAPOLA, D. M. **Conseqüências das mudanças climáticas globais nos biomas da América do Sul: um modelo de vegetação potencial incluindo ciclo de carbono**. 183 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007-03-26 .2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.25.18.15>>. Acesso em: 01 fev. 2018.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D. & PEREIRA, G. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 91, n. 1-2, p. 244-248, 2006.

LEMOES, J. E.; SOUZA, B. I.; DINIZ, M. T. M. Sistema, Caos e o Processo de Desertificação no Semiárido Brasileiro: complexidade e interações. **Ateliê Geográfico**, v. 14, n. 01, p. 136-154, 2020.

LEON, E.; VARGAS, R.; BULLOCK, S.; LOPEZ, E.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA, N. Hot spots, hot moments, and spatio-temporal controls on soil CO₂ efflux in a waterlimited ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 77, p. 12–21, 2014.

LE QUÉRÉ, C.; ANDREW, R. M.; FRIEDLINGSTEIN, P.; SITCH, S.; HAUCK, J.; PONGRATZ, J.; PICKERS, P. A.; KORSBAKKEN, J. I.; PETERS, G. P.; CANADELL, J. G.; ARNETH, A.; ARORA, V. K.; BARBERO, L.; BASTOS, A.; BOPP, L.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; CIAIS, P.; DONEY, S. C.; GKRTZALIS, T.; GOLL, D. S.; HARRIS, I.; HAVERD, V.; HOFFMAN, F. M.; HOPPEMA, M.; HOUGHTON R. A.; HURTT, G.; ILYINA, T.; JAIN, A. K.; JOHANNESSEN, T.; JONES, C. D.; KATO, E.; KEELING, R. F.; GOLDEWIJK, K. K.; LANDSCHÜTZER, P.; LEFÈVRE, N.; LIENERT, S.; LIU, Z.; LOMBARDOZZI, D.; METZL, N.; MUNRO, D. R.; NABEL, J. E. M. S.; NAKAOKA, S.; NEILL, C.; OLSEN, A.; ONO, T.; PATRA, P.; PEREGON, A.; PETERS, W.; PEYLIN, P.; PFEIL, B.; PIERROT, D.; POUTER, B.; REHDER, G.; RESPLANDY, L.; ROBERTSON, E.; ROCHER, M.; RÖDENBECK, C.; SCHUSTER, U.; SCHWINGER, J.; SÉFÉRIAN, R.; SKJELVAN, I.; STEINHOFF, T.; SUTTON, A.; TANS, P. P.; TIAN, H.; TILBROOK, B.; TUBIELLO, F. N.; LAAN-LUIJKK, I. T. van der L.; WERF, G. R. van der.; VIOVY, N.; WALKER, A. P.; WILTSHIRE, A. J.; WRIGHT, R.; ZAEHLE, S.; ZENG, B. Global Carbon Budget 2018. **Earth System Science Data**, v. 10, p. 2141–2194, 2018.

LI-COR. LI-8100A **Automated Soil Gas Flux System**. Disponível em: https://www.licor.com/env/products/soil_flux/

LI-COR. **Using the LI-8100A Soil Gas Flux System & the LI-8150 Multiplexer**. Disponível em: <https://licor.app.boxenterprise.net/s/jtpq4vg358reu4c8r4id>. Acesso em: 20 de outubro de 2021.

LIMA, D. A. Vegetation of Brasil. In: INTEWATIONAL GRASSLANDS CONGRESS, 9. São Paulo, SP. **Proceedings**. São Paulo, Departamento de Produção Animal, 1966. p.29-38. 1965.

LIMA, J. R. de S.; SOUZA, R. M. S.; SANTOS, E. S. dos; SOUZA, E. S. de; OLIVEIRA, J. E. da S.; MEDEIROS, E. V. de; PESSOA, L. G. M.; ANTONINO, A. C. D.; HAMMECKER, C. Impacts of land-use changes on soil respiration in the semi-arid region of Brazil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 44, 2020.

LISBOA, B. B. **Parâmetros microbiológicos como indicadores de qualidade do solo em sistemas de manejo**. 2009, 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009.

LIVINGSTON, G. P.; HUTCHINSON, G. L. **Enclosure-based Measurement of Trace Gas Exchange: Applications and Sources of Error**. In: P.A. Matson & R.C. Harriss (eds) *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*. Cambridge: Blackwell Science Ltd., p. 14-51, 1995.

LUNGUINHO, R. L. **Nos caminhos dos relevos residuais: contribuição a ecohidrologia de encostas no Semiárido Brasileiro**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geografia), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 266 f., 2018.

LUYSSAERT, S.; INGLIMA, I.; JUNG, M.; RICHARDSON, A. D.; REICHSTEIN, M.; PAPALE, D.; PIAO, S. L.; SCHULZE, E. -D.; WINGATE, L.; MATTEUCCI, G.; ARAGAO, L. E. O. C.; AUBINET, M.; BEER, C.; BERNHOFER, C.; BLACK, K. G.; BONAL, D.; BONNEFOND, J. -M.; CHAMBERS, J.; CIAIS, P.; COOK, B.; DAVIS, K. J.; DOLMAN, A. J.; GIELEN, B.; GOULDEN, M.; GRACE, J.; GRANIER, A.; GRELLÉ, A.; GRIFFIS, T. J.; GRUNWALD, T.; GUIDOLOTTI, G.; HANSON, P. J.; HARDING, R. B.; HOLLINGER, D. Y.; HUTYRA, L. R.; KOLARI, P.; KRUIJT, B.; KUTSCH, W. L.; LAGERGREN, F.; LAURILA, T.; LAW, B. E.; LE MAIRE, G.; LINDROTH, A.; LOUSTAU, D.; MALHI, Y.; MATEUS, J.; MIGLIAVACCA, M.; MISSION, L.; MONTAGNANI, L.; MONCRIEFF, J. B.; MOORS, E. J.; MUNGER, J. W.; NIKINMAA, E.; OLLINGER, S. V.; PITA, G.; REBMANN, C.; ROUPSARD, O.; SAIGUSA, N.; SANZ, M. J.; SEUFERT, G.; SIERRA, C.; SMITH, M.-L.; TANG, J.; VALENTINI, R.; VESALA, T., JANSSENS, I. A. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. **Global Change Biology**, v. 13, p. 2509–2537, 2007. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x

MAGRIN, G. O.; MARENGO, J. A.; BOULANGER, J. P.; BUCKERIDGE, M. S.; CASTELLANOS, E.; POVEDA, G.; SCARANO, F. R.; VICUÑA, S. “**Central and South America**”. In: *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Barros, V. R.; Field, C. B.; Dokken, D. J.;

Mastrandrea, M. D.; Mach, K. L.; Bilir, T. E. (eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p 1499-1566, 2014.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.

MALDONADO, F. D. Rotação Espectral Controlada como alternativa em Análise por Componentes Principais para detecção de mudanças em regiões do semi-árido. In: **Anais do X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, 2001, p. 627-630.

MARENGUE, J. A. et al. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. In: MEDEIROS, S. de S.; GREYI, H. R.; GALVÃO, C. de O.; SILVA PAZ, V. P. da. (Ed.). Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande-PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. 440 p

MARINHO JUNIOR, J. L.; LIMA, D. de S.; DIAS, J. L. A.; ARAÚJO FILHO, R. N. de. Análise dos estoques de carbono no solo sob diferentes coberturas vegetais no Brasil. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 8, n. 1, p. 031-040, 2020.

MARTINS, C. M.; GALINDO, I. C. L.; SOUZA, E. R.; POROCA, H. A. Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1883-1890, 2010.

MARTINS, L. N.; BAPTISTA, G. M. de M. Análise multitemporal do sequestro florestal de carbono no projeto de assentamento Carão, Acre. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 06, p. 1648-1657, 2013.

MARTINS, C. S. C.; NAZARIES, L.; MACDONALD, C. A.; ANDERSON, I. C.; SINGH, B. K. Soil Biology & Biochemistry Water availability and abundance of microbial groups are key determinants of greenhouse gas fluxes in a dryland forest ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, v 86, p. 5-16, 2015.

MKILLUP, S.; DYAR, M. D. **Geostatistics Explained** – Na introductory guide for earth scientists. Cambridge University Press, 2010.

MEDEIROS, R. M. **Estudo Agrometeorológico para o Estado da Paraíba**. p.123. 2015.

MEIADO, M. V.; ALBUQUERQUE, L. S. C.; ROCHA, E. A. RÓJAS-ARÉCHIGA, M.; LEAL, I. R. Seed germination responses of *Cereus jamacaru* DC. ssp. *jamacaru*(Cactaceae) to environmental factors. **Plant Species Biology**, v. 25, p. 120-128, 2010.

MELO, J. A. B. de; PEREIRA, R. A.; DANTAS NETO, J.; LIMA, E. R. V. de. Propriedades do solo e propensão à desertificação na Microbacia do Riacho do Tronco, Boa Vista, PB. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 5, n. 2, p. 234-246, 2010.

MENDES, K. R.; CAMPOS, S.; SILVA, L. L. da; MUTTI, P. R.; FERREIRA, R. R.; MEDEIROS, S. S.; PERZ-MARIN, A. M.; MARQUES, T. V.; RAMOS, T. M.; VIEIRA, M. M. de L.; OLIVEIRA, C. P.; GONÇALVES, W. A.; COSTA, G. B.; ANTONINO, A. C. D.; MENEZES, R. S. C.; BEZERRA, B. G.; SANTOS E SILVA, C. M. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v. 10, n. 9454, 2020.

MENEZES, R. C. S.; GARRIDO, M. S.; PEREZ-MARIN, M. A. Fertilidade dos solos no semi-árido. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 30, Recife, 2005. Palestras... Recife, UFRPE/SBCS, 2005. CD-ROM.

MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; GIONGO, V.; PEREZ-MARIN, A. M. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, p. 643-653, 2012. ISSN 1519- 6984.

MEYER, W. B.; TURNER II, B. L. **Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective** (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1994).

MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B.; ANGERS, D. A. ARROUAYS, D.; CHAMBERS, A.; CHAPLOT, V.; CHEN, Z. S.; CHENG, K.; DAS, B. S.; FIELD, D. J.; GIMONA, A.; HEDLEY, C. B.; HONG, S. Y.; MANDAL, B.; MARCHANT, B. P. MARTIN, M.; MCCONKEY, B. G.; MULDER, V. L.; O'ROURKE, S.; RICHER-DE-FORGES, A. C.; ODEH, I.; PADARIAN, J.; PAUSTIAN, K.; PAN, G.; POGGIO, L.; SAVIN, I.; STOLBOVOY, V.; STOCKMANN, U.; SULAEMAN, Y.; TSUI, C. C.; VÅGEN, T. G.; VAN WESEMAEL, B.; WINOWIECKI, L. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, 292 p. 59-86, 2017.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC). **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 5. ed. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/livro_digital_5ed_estimativas_anuais.pdf.

MMA. **Biodiversidade Brasileira**: Avaliação e Identificação de Áreas Prioritárias para Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira. Série Biodiversidade n°. 404pp, 2002.

MMA – Ministério do Meio Ambiente e Secretaria de Recursos Hídricos da Paraíba. Marcos Oliveira Santana, organizador. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**, 2007, 134p

MMA. Ministério do Meio Ambiente: TNC (MMA). **Mapa das Unidades de Conservação e Terras Indígenas do Bioma Caatinga**. Org. Shirley Hauff. Coronário, Brasília, 2008.

MMA. **Caatinga**: Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite. Relatório Técnico 2010-2011, 2017. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80049/PMDBBS/RelatorioBiomaCaatinga_2010-2011_V2%20-%20MMA.pdf. Acesso em: 15 de julho de 2020.

MORAES, J. R. de. **Alterações nos atributos microbiológicos do solo e nos estoques de carbono decorrentes do cultivo de eucalipto no Bioma Pampa**. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. 2012.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. Oxford: Blackwell, 2005.

MOREIRA, E.R.F. **Mesorregiões e microrregiões da Paraíba: delimitação e caracterização**. João Pessoa: GAPLAN. 1988. 74p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. ed. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. 320p.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006.

MYNENI, R.; HALL, F.; SELLERS, P.; MARSHAK, A. The interpretation of spectral vegetation indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 481- 486, 1995.

NASCIMENTO, S. S.; LIMA, E. R. V. de; SOUZA, P. L. Uso do NDVI na análise temporal da degradação da Caatinga na Sub Bacia do Alto Paraíba. **Revista OKARA: Geografia em debate**, v. 8, n. 1, p. 72-93, 2014.

NETO, A. T. F.; JUNIOR, M.; MACHADO, W.; TAPAJÓS, R.; FIGUEIRA, A. P. B.; AGUIAR, D. R.; SILVA, H. C. P.; SILVA, R. Efluxo de CO₂ do solo em uma área de bosque localizada no campus II da UFPA, Santarém, PA. **Anais: VI Workshop Brasileiro de Micrometeorologia** , 2009.

NIMER, E. Climatologia da região Nordeste do Brasil. Introdução à climatologia dinâmica. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 34, p. 3-51, 1972.

NIMER, E. **Pluviometria e recursos hídricos de Pernambuco e Paraíba**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1979.

NOBRE, C. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima. In: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. **Mudança do clima**. Brasília, DF. 250p. (Cadernos NAE, 3).

NOGUEIRA, F. C. B.; SILVA, J. W. L.; BEZERRA, A. M. E.; MEDEIROS FILHO, S. Efeito da temperatura e luz na germinação de sementes de *Luetzelburgia auriculata* (Alemão) Ducke –Fabaceae. **Acta Botânica Brasílica**, 26 (4): 772-778, 2012.

OETEL, C.; MATSCHULLAT, J.; ZURBA, K.; ZIMMERMANN, F.; ERASMI, S. Greenhouse gas emissions from soils - A review. **Geochemistry**, v. 76, n. 3, p. 327-352, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>.

OLIVEIRA, M. B. L. de; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. dos S.; CORREIA, M. de F.; MOURA, M. S. B. Trocas de Energia e Fluxo de Carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 378-386, 2006.

OLIVEIRA, G.; DINIZ-FILHO, J. A. F. Spatial patterns of terrestrial vertebrates richness in Brazilian semiarid, Northeastern Brazil: selecting hypotheses and revealing constraints. **Journal Arid Environment**, v.74, p. 1418-1426, 2010.

OLIVEIRA, M. T. de; BAPTISTA, G. M. de M. **Variações na Modelagem do Fluxo de CO₂ na Área Metropolitana de Brasília, por meio de Dados OLI do Landsat 8**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

OLIVEIRA, E. R. S.; SOARES, W. A. Estimativa de Efluxo de Dióxido de Carbono em Resquícios de Caatinga. **Revista Diálogos**, n. 16, 2016.

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 (EUA): CRC Press. p. 159-190, 2006.

OLOFSSON, P.; FOODY, G. M.; HEROLD, M.; STEHMAN, S. V.; WOODCOCK, C. E.; WULDER, M. A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of Land change. **Remote Sensing of Environment**, v. 148, p. 42-57, 2014.

ONTL, T. A.; SCHULTE, L. A. Soil Carbon Storage. **Nature**. Education Knowledge. 3(10):35, 2012.

PACHECO, M. V.; MATOS, V. P.; FERREIRA, R. L. C.; FELICIANO, A. L. P.; PINTO, K. M. S. Efeito das temperaturas e substratos na germinação de sementes de *Myracrodruon urundeuva* Fr. All. (Anacardiaceae). Viçosa: **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 359-367, 2006.

PAN-BRASIL. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**. Brasília: MMA, 2005.

PANOSSO, A. R.; PERILLO, L. I.; FERRAUDO, A. S.; PEREIRA, G. T.; MIRANDA, J. G. V.; LA SCALA JR, N. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production area. **Soil & Tillage Research**, v. 124, n., p. 8-16, 2012.

PARAÍBA. **Decreto nº 25.083, de 08 de junho de 2004.** Dispõe sobre a criação da Área de Proteção Ambiental do Cariri. João Pessoa, 2003. Disponível em: <<http://www.sudema.pb.gov.br>>. Acesso em 15 out. 2016.

PAREYN, F. G. C. **A importância da produção não-madeireira na Caatinga.** In: GARIGLIO, MARIA AUXILIADORA; SAMPAIO, EVERARDO VALADARES DE SÁ BARRETO; CESTARO, LUIS ANTÔNIO & KAGEYAMA, PAULO YOSHIO. (orgs.) *Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga.* Brasília: Ministério do Meio Ambiente/Serviço Florestal Brasileiro. 2010. P. 131-144.

PBMC. **Scientific Basis of Climate Change.** Contribution of Working Group 1 of the Brazilian Climate Change Panel to the First National Assessment Report on Climate Change. Rio de Janeiro: Federal University of Rio de Janeiro, 2014.

PEIXOTO, A. L.; LUZ, J. R. P.; BRITO, M. A. **Conhecendo a biodiversidade.** Brasília: MCTIC, CNPq, PPBio, 196p. 2016.

PELLIKKA, P. K. E.; HEIKINHEIMO, V.; HIETANEN, J.; SCHÄFER, E.; SILJANDER, M.; HEISKANEN, J. Impact of land cover change on aboveground carbon stocks in Afromontane landscape in Kenya. **Applied Geography**, v. 94, p. 178-189. 2018.

PEREIRA, I. M.; ANDRADE, L. A. de; COSTA, J. R. M.; DIAS, J. M. Regeneração natural em um remanescente de Caatinga sob diferentes níveis de perturbação, no agreste paraibano. **Acta Botanica Brasilica [online]**. v. 15, n. 3, p. 413-426, 2001.

PEREIRA, R. G.; ALBUQUERQUE, A. W. de; CUNHA, J. L. X. L.; PAES, R. de A.; CAVALCANTE, M. Atributos químicos do solo influenciados por sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 1, p. 78-84, 2009.

PEREIRA FILHO, J. M. P.; BAKKE, O. A. **Produção de Forragem de espécies herbáceas da caatinga.** In: GARIGLIO... [et al.], (Org.). *Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga.* Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. p. 145- 156.

PILLON, C. N.; MIELNICZUK, J. M.; NETO, L. M. **Dinâmica da matéria orgânica no ambiente.** Documentos 105. Embrapa. p. 41, 2002.

PINTO-JUNIOR, O. B.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A. C.; NOGUEIRA, J. S. Efluxo de CO₂ do solo em florestas de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 4, p. 813-822, 2009.

PIRES, C. V.; SCHAEFER, C. E. R. G.; HASHIGUSHI, A. K.; THOMAZINI, A.; FILHO, E. I. F.; MENDONÇA, E. S. Soil organic carbon and nitrogen pools drive soil C-CO₂ emissions from selected soils in Maritime Antarctica. **Sci Total Environ.**, v. 596-597, n. 15, p. 124-135, 2017.

PLAZA, C., ZACCONE, C., SAWICKA, K.; MÉNDEZ, A. M.; TARQUIS, A.; GASCÓ, G.; HEUVELINK, G. B. M.; SCHUUR, E. A. G.; MAESTRE, F. T. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. **Scientific Reports**, v. 8, n. 13788, 2018.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. Oficina de Textos, 2012.

PRADA, C. M.; MORRIS, A.; ANDERSEN, K. M.; TURNER, B. L.; CABALLERO, P.; DALLING, J. W. Soils and rainfall drive landscape scale changes in the diversity and functional composition of tree communities in premontane tropical forest. **Journal of Vegetation Science**, v. 28, p. 859-870, 2017. doi:10.1111/jvs.12540

PRAZERES, S. M. Germinação de sementes e propagação vegetativa. In: SAMPAIO, E. V. S. B.; MAYO, S. J. & BARBOSA, M. R. (eds.). **Pesquisa botânica nordestina: Progresso e perspectivas**. Recife: Sociedade Botânica do Brasil, p. 179-189, 1996.

PULRONIK, K.; BARROS, N. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BRANDANI, C. B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no vale do jequitinhonha – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1125-1136, 2009.

QGIS. Disponível em: <http://www.qgis.org/en/site/>

RAHMAN, A. F.; GAMON, J. A.; FUENTES, D. A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; Qiu, H. **Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from aviris imagery**. In: AVIRIS Workshop. 2000.

RAHMAN, A.F.; SIMS, D.A.; CORDOVA, V.D.; EL-MASRI, B.Z. Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes. **Geophysical Research Letters**, v. 32, 2005. <https://doi.org/10.1029/2005GL024127>

RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 44, n. 2, p. 81-99, 1992.

RAICH, J. W.; POTTER, C. S. BHAGAWATI, D. Interannual variability in global soil respiration. **Global Change Biology**, v. 8, p. 800-812, 2002.

RAICH, J. W.; POTTER, C. S.; BHAGAWATI, D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. **Global Change Biology**, v. 8, p. 800-812, 2014.

REBOUÇAS, A. da C. **Água na Região Nordeste: desperdício e escassez. Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, p. 127-154, 1997.

REIS, L. B. **Estudo comparativo dos fluxos de CO₂ na interface solo-atmosfera em um sistema agroflorestal com manejo contrastante no nordeste de Portugal**. Dissertação de Mestrado, Mestrado de dupla diplomação em Tecnologia Ambiental com a Escola Superior Agrária de Bragança e a UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Bragança – Portugal, 111f, 2019.

RIBEIRO, W. C. Meio ambiente: o natural e o produzido. **Revista do Departamento de Geografia– FFLCH-USP**, p. 29-32, São Paulo, 1991.

RIBEIRO, J. M. **Atributos Químicos e Microbiológicos do Solo em Sistemas Agroflorestais do Norte de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-graduação em Produção Vegetal do Instituto de Ciências Agrárias. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Montes Claros, 2014.

RIBEIRO, K.; SOUSA NETO, E. R.; JUNIOR, J. A. de C.; LIMA, J. R. de S.; MENEZES, R, S. C. DUARTE-NETO, P. J.; GUERRA, G. da 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.

RIBEIRO, K. **Mudança no uso do solo e emissões de gases de efeito estufa (GEE) em diferentes coberturas vegetais na caatinga brasileira.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). 59 f. : il.

RIEBEEK, H. **The Carbon Cycle.** Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>. Acesso em: 20 de junho de 2018.

ROUSE, J. W., R. H. HAAS, J. A. SCHELL, D. W. DEERING, J. C. HARLAN. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation.** NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 1974, 371 p.

RYU, S.; CONCILIO, A.; CHEN, J.; NORTH, M.; MA, S. Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil respiration in a mixedconifer forest, California. **Forest Ecology and Management**, 257(4), p. 1324-1332, 2009. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.11.033

SAIZ, G.; BYRNE, K. A.; BUTTERBACH-BAHL, K.; KIESE, R.; VIOREL, B.; FARRELL, E. P. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland. **Global Change Biology**, v. 12, p. 1007-1020, 2006. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01145.x

SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. **Matéria orgânica do solo no bioma Caatinga.** In: Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2ª Ed. SANTOS, G. A.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds). Porto Alegre, Metrópole, p. 419-441, 2008.

SALOMÃO, A. N.; EIRA, N. M. T. S.; CUNHA, R.; SANTOS, I. R. I.; MUNDIM, R. C.; REIS, R. B. **Padrões de germinação e comportamento para fins de conservação de sementes de espécies autóctones: madeireiras, alimentícias, medicinais e ornamentais.** Brasília: EMBRAPA–Centro Nacional de Pesquisa de Recursos Genéticos e Biotecnologia, Comunicado Técnico, n. 32, 1987.

SAMPAIO, E. V. de S. B. **Overview of the Brazilian Caatinga.** In: S. H. BULLOCK; H.A. MOONEY.; E. MEDINA (Eds.). Seasonally Dry Tropical Forests. Cambridge: Cambridge University Press, p.35-63, 1995.

SAMPAIO, E. V. de S. B. **Caracterização do Bioma Caatinga - Características e Potencialidades**. In: Uso sustentável e conservação dos Recursos Florestais da Caatinga. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, p. 29-48, 2010.

SANTOS, M. A. **Metamorfose do espaço habitado**. São Paulo: Hucitec, 1991.

SANTOS, E. O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de Carbono dentro da Floresta Amazônica**. 1999. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1999.

SANTOS, M. A. **A natureza do espaço: técnica e tempo – razão e emoção**. São Paulo: Edusp, 2002.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, F. A. C. **Estimativa dos fluxos de CO₂ e evapotranspiração em áreas de caatinga em recuperação e degradada no estado da Paraíba**. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 122 f., 2015.

SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, M. T.; FIGUEIREDO, K. V.; FALCÃO, H. M.; ARRUDA, E. C. P.; CORTEZ, J. A.; ANTONINO, A. C. Caatinga, the Brazilian Dry Tropical Forest: Can It Tolerate Climate Changes?. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**. v. 26, p. 83-99, 2014. doi:10.1007/s40626-014-0008-0.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de ; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F.. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS , U.J.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; MARQUES, M. C.; SOUZA, E. S.; BROSSARD, M.; HAMMECKER, C. Land use changes the soil carbon stocks, microbial biomass and fatty acid methyl ester (FAME) in Brazilian semiarid area. **Archives of Agronomy Soil Science**, v. 65, p. 755-769, 2019.

- SCHAUFLE, G., KITZLER, B., SCHINDLBACHER, A., SKIBA, U., SUTTON, M. A. and ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 683-696, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01277.x>
- SCHIMEL, D. S. Drylands in the Earth system. **Science**, v. 327, p. 418–419, 2010.
- SCHLESINGER, W. H., & ANDREWS, J. A. Soil respiration and the global carbon cycle. **Biogeochemistry**, v. 48, p.7-20, 2000.
- SCHLESINGER, W. H.; BELNAP, J.; MARION, G. On carbon sequestration in desert ecosystems. **Global Change Biology**, v. 15, n. 6, p. 1488-1490, 2009.
- SCHLESINGER, W. H., & BERNHARDT, E. S. Chapter 11 - The Global Carbon Cycle. *Biogeochemistry* (Third Edition), p. 419-444, 2013. doi:10.1016/b978-0-12-385874-0.00011-x
- SCHOLES, R. J.; VAN BREEMEN, N.; **Geoderma**. 1997, 79, 1.
- SCHULZ, K.; GUSCHAL, M.; KOWARIK, I; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CIERJACKS, A. Grazing, forest density, and carbon storage: towards a more sustainable land use in Caatinga dry forests of Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, p. 1969-1981, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1303-0>.
- SENA, L. M. M. de. **Conheça e Conserve a Caatinga – O Bioma Caatinga**. Vol.1. Fortaleza: Associação Caatinga, 2011. 54p.
- SHI, W.Y.; YAN, M. J.; ZHANG, J. G.; GUAN, J.H.; DU, S. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. **Atmos. Environ.**, 88, p. 74-82, 2014.
- SHIMAKURA, S.E. (2006) **Interpretação do coeficiente de correlação**. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~shimakur/CE003/node74.html>>. Acesso em: 05 fev. 2020.
- SHUGART, H. H. Equilibrium versus nonequilibrium landscape. In: WIES, J. A.; MOSS, M. R. et al. **Foundation papers in Landscape Ecology**, New York: Columbia University, 2006.

SILVA, F. B. R.; RICHÉ, G. R. TONNEAU, J. P.; SOUZA NETO, N. C.; BRITO, L. T. L.; CORREIA, R. C.; CAVALCANTI, A. C.; SILVA, A. B.; ARAÚJO, F. J. C.; LEITE, A. P. **Zoneamento agroecológico do Nordeste:** diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico. Petrolina: EMBRAPA-CPTSA, 1993. 2 v.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. **Matéria orgânica do solo.** In: Novais RF, Alvarez V VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL, editores. Fertilidade do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.275-374.

SILVA, I.; SEGANTINE, P. C.. L.; ERWES, H. **Introdução à Geomática.** São Carlos : USP, 2002.

SILVA, S. C. P.; BAPTISTA, G. M. M. Análises espectrais da vegetação com dados Hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO₂ em diferentes ambientes na Amazônia brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.21, n.2, p.354-370, 2015.

SILVA, J. M. C. & BARBOSA, L. C. F. Impact of human activities on the Caatinga. In: Silva, J. M. C.; Leal, I. R. & Tabarelli, M. **Caatinga: the largest Tropical Dry Forest region in South America.** Cham (SWI): Springer, 2017, p. 359 - 368.

SILVA, K. K. da. **Avaliação da Produtividade Primária Bruta da Caatinga do Semiárido Paraibano.** Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2019. 64 f.

SILVA, L. F.; SOUZA, B. I de; BACANI, V. M. Intensidade da ação antrópica na área de proteção ambiental do Cariri Paraibano. **Caminhos de Geografia**, online, v. 20, n. 71, p. 364-383, 2019.

SILVA JUNIOR, J. A. S.; COSTA, A. C. L.; AZEVEDO, P. V.; COSTA, R. F.; METCALFE, D. B.; GONÇALVES, P. H. L.; BRAGA, A. P.; MALHI, Y. S.; ARAGÃO, L. E. O. E. C.; MEIR, P. Fluxos de CO₂ do solo na floresta nacional de Caxiuanã, Pará, durante o experimento ESECAFLOCCR/LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 85-94, 2013.

SILVEIRA, D. G.; PELACANI, C. R.; ANTUNES, C. G. C.; ROSA, S. S.; SOUZA, F. V. D.; SANTANA, J. R. F. Resposta germinativa de sementes de caroá [*Neoglaziovia variegata* (ARRUDA) MEZ]. **Ciência & Agrotecnologia**, v.35, n.5, p. 948-955, 2011.

SILVEIRA, T. A. **Dinâmica da Serrapilheira e atividades edáficas em áreas degradadas no Seridó Paraibano**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 161 f., 2017.

SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S.; GRISI, B. M.; HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. **Microorganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Embrapa Arroz e Feijão - Documentos (INFOTECA-E), 142 p., 1994.

SMITH, N. **Desenvolvimento Desigual**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1987.

SOBRINO, J.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 434-440, 2004.

SOIL SURVEY STUFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12th ed. USDA- Natural Resources Conservation Service, Washington, DC, 2014.

SOPER, F. M.; MCCAULEY, C. K.; SPARKS, K.; SPARKS, J. P. Soil carbon dioxide emissions from the Mojave desert: Isotopic evidence for a carbonate source. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 1, 2017.

SOTTA, E. D. **Fluxo de CO₂ entre solo e atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia Central**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Biologia Tropical e Recursos Naturais). Manaus - AM, p. 99, 1998.

SOTTA, E. D.; MEIER, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in central Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, p.601-617, 2004.

SOUZA, B. I. **Cariri Paraibano: Do silêncio do lugar à desertificação**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geografia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 198 f., 2008.

SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. Evolução da desertificação no Cariri paraibano a partir da análise das modificações na vegetação. Rio Claro (SP): **Geografia**, v. 36, n. 1, p. 193-205, 2011.

SOUZA, B. I.; ARTIGAS, R. C.; LIMA, E. R. V. Caatinga e Desertificação. **Mercator**, v. 14, n. 1, p. 131-150, 2015.

SOUZA, B. I.; QUEIROZ, R. T. & CARDOSO, E. C. Desertificação e riscos à desertificação no Alto Curso do rio Paraíba – PB/Brasil. **Revista da ANPEGE**, 2015, v. 11, n. 16, p. 201 – 222.

SOUZA, B. I.; SOUZA, R. S. Processos de ocupação dos Cariris Velhos – PB e efeitos na cobertura vegetal: contribuição à Biogeografia Cultural do Semiárido. **Cadernos da Geografia**, v. 26, numero especial 2, 2016.

SOUZA, B. I., ROSENDO, E. E. Q., BIZERRA, D. da S., COUTINHO DE MELO, H. D. A., MEDEIROS, J. R. de, ITOZAMIR, W. Intervenções governamentais recentes nos Cariris Velhos da Paraíba - Brasil: reflexos na agropecuária, na degradação das terras e na cidadania. **GEOgraphia**, 18(37), 154-177, 2016.

SOUZA, T. A. F. de; SANTOS, D. **Solos em Sistemas Agroecológicos**. 1ª edição. Areia, 176p. 2017.

SOUZA, B. V. de; SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S.; SALES, F. D. C. V., SOUZA JUNIOR, C. M. P. de. Carbon in Soil in Different Phisionomies of Caatinga in Paraíba, Brazil. **Floresta**, 49(2), 287-296, 2019.

SOUZA, C. M. J.; SHIMBO, J. Z.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L. G.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W. de; ROCHA, W.F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; NETO, L. C. F.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat

Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2735. 2020.
<https://doi.org/10.3390/rs12172735>

SOUTO, P. C.; BAKKE, I. A.; SOUTO, J. S.; OLIVEIRA, V. M. Cinética da respiração edáfica em dois ambientes distintos no semi-árido da Paraíba, Brasil. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3, p. 52-58, 2009.

SPIELHAGEN, R. F. Hotspots in the Arctic: Natural archives as an early warning system for global warming. **Geology**, v. 40, n. 11, p. 1055-1056, 2012.

STRAHLER, A. N. e STRAHLER, A. H. **Environmental Geoscience**. Santa Bárbara: Hamilton, 1973.

SUBKE, J.-A.; INGLIMA, I.; COTRUFO, M. F. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: A metaanalytical review. **Global Change Biology**, v. 12, p. 921-94, 2006.

SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste). Resolução nº 107, de 27 de julho de 2017. Brasília: DOU de 13/09/2017. Disponível em:

<<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=13/09/2017&jornal=1&pagina=48&totalArquivos=128>> Acesso em: 28 maio 2019.

SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste). Resolução nº 115, de 23 de novembro de 2017. Brasília: DOU de 05/12/2017. Disponível em:

<<http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=05/12/2017&jornal=515&pagina=32&totalArquivos=92>> Acesso em: 29 maio de 2019.

TEDESCO, M. J.; SELBACH, P. A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F. A. O. **Resíduos orgânicos no solo e os impactos no ambiente**. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo, ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Gênese, p.159-196, 1999.

TEDESCHI, V.; REY, A.; MANCA, G.; VALENTINI, R.; JARVIS, P. G., BORGUETTI, M. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. **Global Change Biology**, v. 12, p.110-121, 2006.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEM, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G., 2017. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa, Brasília.

TERRER, C.; PHILLIPS, R. P.; HUNGATE, B. A. ROSENDE, J.; PETT-RIDGE, J.; CRAIG, M. E.; VAN GROENIGEN, K. J.; KEENAN, T. F.; SULMAN, B. N.; STOCKER, B. D.; REICH, P. B.; PELLEGRINI, A. F. A.; PENDALL, E.; ZHANG, H.; EVANS, R. D.; CARRILLO, Y.; FISHER, J. B.; VAN SUNDERT, K.; VICCA, S.; JACKSON, R. B. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂. **Nature**. v. 591, p. 599-603, 2021.

THÉRY, H.; MELLO, N. A. de. Diversidades e mobilidades da agricultura brasileira. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 22, n.1, p. 21-36, 2005.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The Water Balance**. Laboratório de Climatologia. Publ. em Climatol, v. 8, p 1-104, 1955.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instruções e Tabelas para Computação da Evapotranspiração Potencial e do Balanço Hídrico**. Instituto de Tecnologia Drexel, Laboratório de Climatologia. Climatology, v. 10, p. 181-311, 1957.

TILIO NETO, P. D. **Ecopolítica das mudanças climáticas: o IPCC e o ecologismo dos pobres** [online]. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 2010.

TOWNSHEND, J. R. G., JUSTICE, C., LI, W.; GURNEY, C.; MACMANUS, J. Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. **Remote Sensing Environment**. v. 35, p.243-255, 1991.

USGS. **USGS Global Visualization Viewer**. Disponível em: < <http://glovis.usgs.gov/>>. Acesso em: 20 setembro 2016.

VALENTINI, C. M. A; ABREU, G.; FARIA, R. A. G. Respiração do solo como bioindicador em áreas degradadas. **Revista Internacional de Ciências**, v. 5, n.2, p. 127-43, 2015. <https://doi.org/10.12957/ric.2015.19581>

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.

VIEIRA, R. M. D. S. P.; CUNHA, A. P. M. do A.; BARBOSA, A. A.; RIBEIRO NETO, G. G.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. D. S.; SANTOS, F. C.; SANTANA, M. D. O. Análise das interações entre dados climáticos e o processo de desertificação no núcleo de desertificação de Cabrobó-PE, Brasil. **Sustentabilidade em Debate**, v.9, n.2, 72, 2018. doi: 10.18472/sustdeb.v9n2.2018.27559

VILLELA, A. A.; FREITAS, M. A. V.; ROSA, L. P. **Emissões de carbono na mudança de uso do solo**. Alberto Villela, Marcos Freitas, Luiz Pinguelli Rosa (orgs.) – Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 210p.: il.; 25 cm (Mudanças globais; v.2).

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 19, p. 1467-1476. 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

WANG, D.; HE, N.; WANG, Q.; LÜ, Y. WANG, Q.; XU, Z.; ZHU, J. Effects of Temperature and Moisture on Soil Organic Matter Decomposition Along Elevation Gradients on the Changbai Mountains, Northeast China. **Pedosphere**, v. 16, p. 399-407, 2016.

WIESMEIER, M.; URBANSKI, L.; HOBLEY, E.; et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, p. 149- 162, 2019.

WILHITE, D. A.; . SIVAKUMAR, M. V. K.; PULWARTY, R. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 4-13, 2014. doi:10.1016/J.WACE.2014.01.002.

XIAO, J.; CHEVALLIER, F.; GOMEZ, C.; GUANTER, L.; HICKE, J. A.; HUETE, A. R.; ICHII, K.; NI, W.; PANG, Y.; RAHMAN, A. F.; SUN, G.; YUAN, W.; ZHANG, L.; ZHANG, X. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years. **Remote Sensing of Environment**, vol. 233, 2019.

XIE, J.; LI, Y.; ZHAI, C.; LI, C.; LAN, Z. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle. **Environmental Geology**, v. 56, n. 5, p. 953-961, 2008.

ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; KRUIJT, B.; KESSELMEIER, J.; LUIZÃO, F. J.; MANZI, A. O.; DOLMAN, A. J. Soil CO₂ efflux in central Amazônia: environmental and methodological effects. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 2, p. 173-184, 2012.

ZHAO, P.; HAMMERLE, A.; ZEEMAN, M.; WOHLFAHRT, G. On the calculation of daytime CO₂ fluxes measured by automated closed transparente chambers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 263(15), p. 267-275, 2018.

ZILBERMAN, I. **Introdução a engenharia ambiental**. ULBRA, 103 p., 1997.

ZUCCA, C.; PERUTA, R. D.; SALVIA, R.; SOMMER, S.; CHERLET, M. Towards a World Desertification Atlas. Relating and selecting indicators and data sets to represent complex issues. **Ecological Indicators**, v. 15, n. 1, p.157–170, 2012.

Apêndice A. Valores médios, mínimos, máximos, Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variação (CV) de ECO_2 por pontos e meses de coletas de dados para o ano de 2017.

Ponto	ECO_2 médio	σ	Mínimo	Máximo	CV
Fevereiro					
P1	4.78	2.38	2.74	10.8	49.76
P2	1.75	0.21	1.23	1.93	11.87
P3	2.19	0.11	2.02	2.41	5.19
P4	-	-	-	-	-
D1	0.13	1.00	-1.04	1.83	754.30
D2	0.76	0.06	0.71	0.89	8.07
D3	0.52	0.03	0.5	0.58	5.40
D4	0.11	0.07	0	0.21	57.48
A1	0.22	0.43	-0.24	1.23	199.50
A2	0.13	0.03	0.08	0.17	21.41
Maio					
P1	8.92	2.02	6.78	13.54	22.60
P2	3.25	1.61	1.8	6.7	49.41
P3	3.56	1.84	1.89	6.98	51.76
P4	1.91	1.92	0.81	5.33	100.39
D1	0.85	1.45	-0.36	4.45	170.19
D2	1.96	2.06	0.79	6.83	105.36
D3	1.29	1.22	0.42	4.09	94.09
D4	0.76	0.69	0.13	2.23	90.43
A1	0.34	0.25	0.12	0.79	74.12
A2	0.49	0.53	0.13	1.8	106.59
Agosto					
P1	5.61	1.66	3.46	8.76	29.64
P2	4.61	1.40	1.72	6.29	30.26
P3	4.54	1.14	2.21	5.76	25.16
P4	2.53	0.86	0.51	3.28	33.76
D1	0.95	0.76	-0.39	2.33	80.64
D2	2.19	0.19	1.91	2.44	8.52
D3	2.15	0.43	1.75	2.73	20.19
D4	1.99	0.78	1.11	3.14	39.13
A1	0.88	0.46	0.4	1.71	52.64
A2	1.29	0.64	0.21	2.36	49.79
Novembro					
P1	4.80	1.19	3.23	7.25	24.87
P2	2.21	0.18	1.99	2.47	8.12
P3	2.51	0.33	2.17	3.33	13.02
P4	0.83	0.32	0.55	1.63	39.01
D1	-0.06	0.88	-1.42	1.44	-1464.16
D2	0.93	0.28	0.69	1.52	29.78
D3	0.56	0.11	0.33	0.71	19.74
D4	0.32	0.44	-0.39	1.22	134.89
A1	0.05	0.30	-0.6	0.49	637.66
A2	0.49	0.33	0.14	1.23	66.43

Apêndice B. Valores médios, mínimos, máximos, Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variação (CV) de ECO_2 por pontos e meses de coletas de dados para o ano de 2018.

Ponto	ECO_2 médio	σ	Mínimo	Máximo	CV
Fevereiro					
P1	8.81	2.65	6.9	15.28	30.10
P2	5.99	0.45	5.5	6.83	7.43
P3	4.59	1.13	4.07	7.58	24.66
P4	3.12	0.63	2.41	4.46	20.23
D1	2.00	1.34	0	4.4	67.02
D2	3.73	1.28	2.75	7.04	34.31
D3	3.13	0.70	2.53	4.84	22.23
D4	1.32	0.66	0.76	2.9	50.44
A1	1.01	0.37	0.41	1.54	37.02
A2	1.75	0.69	0.88	3.06	39.42
Maio					
P1	5.01	0.36	4.55	5.63	7.10
P2	7.87	1.21	5.66	9.48	15.36
P3	5.88	0.48	5.08	6.5	8.16
P4	3.19	0.29	2.64	3.6	9.21
D1	0.72	0.81	0.1	1.94	112.34
D2	3.00	0.48	2.17	3.53	15.85
D3	3.14	0.28	2.75	3.59	9.02
D4	1.97	0.44	1.49	2.72	22.31
A1	1.24	0.59	0.47	2.17	47.33
A2	0.74	0.67	0.03	2.17	90.26
Agosto					
P1	4.91	0.42	4.6	5.99	8.54
P2	3.15	0.17	2.87	3.42	5.33
P3	3.92	0.53	2.65	4.51	13.45
P4	0.91	0.30	0.53	1.42	33.19
D1	-0.28	0.67	-1.35	0.32	-237.62
D2	1.31	0.12	1.19	1.5	8.82
D3	0.54	0.14	0.25	0.72	27.00
D4	0.24	0.06	0.16	0.34	23.79
A1	0.26	0.09	0.19	0.46	34.19
A2	0.36	0.19	0.18	0.62	51.84
Novembro					
P1	4.48	0.36	3.48	6.03	18.67
P2	2.33	1.21	1.87	3.51	22.63
P3	2.22	0.48	1.82	2.95	18.48
P4	1.46	0.29	0.52	2.95	67.35
D1	0.75	0.81	0.2	2.41	95.61
D2	1.21	0.48	0.92	1.94	27.24
D3	0.74	0.28	0.43	1.44	50.00
D4	0.60	0.44	0	3.23	173.10
A1	0.55	0.59	0.21	1.02	47.98
A2	0.82	0.67	0.25	2.73	98.94

Apêndice C. Valores médios, mínimos, máximos, Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variação (CV) de ECO_2 por pontos e meses de coletas de dados para os anos de coleta (2017 e 2018).

2017					
Ponto	ECO_2 médio	σ	Mínimo	Máximo	CV
P1	6.03	0.51	2.74	13.54	8.39
P2	2.96	0.76	1.23	6.7	25.70
P3	3.20	0.79	1.89	6.98	24.77
P4	1.76	0.81	0.00	5.33	46.20
D1	0.47	0.30	-1.42	4.45	64.48
D2	1.46	0.95	0.69	6.83	64.93
D3	1.13	0.54	0.33	4.09	47.84
D4	0.80	0.32	-0.39	3.14	40.00
A1	0.37	0.10	-0.60	1.71	28.04
A2	0.60	0.27	0.08	2.36	44.69
2018					
P1	5.80	1.08	3.48	15.28	18.59
P2	4.84	0.44	1.87	9.48	9.14
P3	4.15	0.33	1.82	7.58	8.0.2
P4	2.17	0.33	0.52	4.46	15.03
D1	0.80	0.31	-1.35	4.4	38.99
D2	2.31	0.51	0.92	7.04	21.96
D3	1.89	0.23	0.25	4.84	12.42
D4	1.03	0.41	0.00	3.23	39.58
A1	0.77	0.21	0.19	2.17	27.37
A2	0.92	0.27	0.03	3.06	29.85