



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA**

CLARISSA TORRES SANTOS

**ALTERAÇÃO NA DINÂMICA DE CARBONO EM ROTAÇÃO
MILHO-FEIJÃO NO SEMIÁRIDO SERGIPANO DEVIDO ÀS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS**

SÃO CRISTÓVÃO - SE

2023/ 1

CLARISSA TORRES SANTOS

**ALTERAÇÃO NA DINÂMICA DE CARBONO EM ROTAÇÃO
MILHO-FEIJÃO NO SEMIÁRIDO SERGIPANO DEVIDO ÀS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS**

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Siqueira
Pinto

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado na Universidade Federal de Sergipe
(UFS) como requisito básico para a conclusão do
Curso em Ciências Biológicas.

SÃO CRISTÓVÃO - SE

2023/1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Interação entre Programas e Arquivos no Ambiente do Modelo Century.....	14
Figura 2. Precipitação (mm) projetadas para Canindé de São Francisco, Sergipe, até 2100 considerando os RCPs 2.6 e 8.5.....	15
Figura 3- Temperatura máxima (mm) projetadas para Canindé de São Francisco, Sergipe, até 2100 considerando os RCPs 2.6 e 8.5.....	16
Figura 4. Variação do estoque de carbono do solo em área de cultivo agrícola sob plantio convencional no município de Canindé de São Francisco, Sergipe, submetido a diferentes cenários de projeções climáticas.....	17

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. PROBLEMA.....	9
3. OBJETIVOS.....	9
4. JUSTIFICATIVA.....	9
5. REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
5.1. Mudanças climáticas e suas implicações para caatinga.....	10
5.2. Principais usos da terra e dinâmica de C na caatinga.....	11
5.3. Uso da terra: Cultivo de Milho e Feijão em Canindé de São Francisco.....	13
6. METODOLOGIA.....	15
6.1. Área do estudo.....	15
6.2. Modelo R Century.....	16
6.3. Modelagem da dinâmica de carbono.....	17
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
8. CONCLUSÃO.....	23
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23
Apêndice A.....	28

Resumo: O aquecimento global tem provocado um intenso debate sobre a necessidade urgente de mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). A Caatinga é um bioma ecologicamente vulnerável, com a perspectiva de agravamento desta situação devido às projeções climáticas, às quais preveem redução nas chuvas e aumento na temperatura. Nesse contexto, a agricultura e a pecuária estão entre as atividades que contribuem significativamente para a emissão de GEEs. Portanto, práticas agrícolas conservacionistas estão sendo utilizadas para reduzir a contribuição do setor agrícola nas mudanças climáticas. Como exemplo podemos citar o consórcio de milho e feijão, pois estudos vêm mostrando que este sistema promove aumento nos estoques de carbono (C) do solo. Porém, um questionamento importante precisa ser respondido: o sequestro de carbono observado em cultivos consorciados permanecerão com esta função diante as variações climáticas projetadas até o final do século? O modelo biogeoquímico Century foi utilizado para simular a dinâmica do carbono no solo e nos grãos dessas duas culturas e verificar os efeitos de projeções climáticas para o município de Canindé de São Francisco, Sergipe. As projeções climáticas estão prevendo aumento na temperatura máxima e redução de precipitação anual no cenário pessimista (intensa emissão de gases do efeito estufa - RCP 8,5), enquanto o cenário otimista (baixa emissão de GEE - RCP 2,6) indica mudanças em ambas as variáveis climáticas próximas à estabilidade. Ao compararmos as médias de estoque de C em solos sob cultivo consorciado de milho e feijão nos períodos 2091-2100 e 2024-2033 teremos uma redução de 5 Mg.C.ha⁻¹ no cenário RCP 2,6, enquanto no cenário RCP 8,5 terá uma redução de 6,5 Mg.C.ha⁻¹. Nos grãos, as reduções serão de 0,2 Mg.C.ha⁻¹ e 0,7 Mg.C.ha⁻¹, respectivamente. Portanto, pode-se esperar o aumento das perdas de C em solos sob manejo em rotação em Canindé do São Francisco, assim como redução na produtividade de grãos, com consequências ambientais, devido ao aumento das emissões de C pelo manejo, mas também sócio-econômicos, devido à redução na produtividade das culturas. Ressalta-se a importância de estratégias de adaptação no uso da terra frente às projeções climáticas na região de Canindé do São Francisco.

Palavras- chaves: Manejo alternativo, projeções climáticas, R Century 4.5

Dedico este trabalho à minha querida avó,
Maria dos Anjos Santos (*In memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha profunda gratidão a **Jeová**, que me guiou em cada passo desta jornada.

Aos meus amados pais, **Cláudio Cezar e Josefa Marcelino**, que sempre estiveram ao meu lado,

Minha querida irmã **Camila Torres** por todo apoio.

Ao meu namorado, **João Paulo**, cujo apoio emocional e motivação foram o alicerce desta para esta jornada.

Aos meus colegas de laboratório, **Vitor e Maiara**, que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor **Alexandre de Siqueira Pinto**, pelo seu suporte e vasto conhecimento, que foram fundamentais para a execução deste trabalho.

Quero agradecer também ao **laboratório de ecologia**.

Aos meus **professores** e, por fim, à **Universidade Federal de Sergipe**. Cada um de vocês fez parte deste caminho e contribuiu para a realização deste sonho. Obrigada por fazerem parte desta jornada tão especial.

1. INTRODUÇÃO

O aumento significativo das emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas últimas décadas tem gerado um intenso debate sobre a necessidade urgente de enfrentar essa situação. Nesse contexto, o Acordo de Paris, assinado em dezembro de 2015 por 195 países signatários da UNFCCC, destaca-se como um compromisso fundamental para a redução das emissões de GEEs em consonância com o desenvolvimento sustentável. Este acordo tem como meta conter o aumento da temperatura média global a um patamar expressamente inferior a 2°C acima dos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para limitar o aumento a 1,5°C até 2030 (Silva, 2016). No âmbito nacional foi elaborado um inventário brasileiro de emissões, onde a agricultura e a pecuária estavam entre as atividades que mais contribuem para a geração de GEEs (Brasil, 2018). Nesse contexto, o Brasil implementou o Plano ABC, oficialmente intitulado "Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura". Este plano é um dos setoriais estabelecidos em conformidade com a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), como parte da estratégia do Estado Brasileiro para reduzir as emissões de GEEs (Embrapa, s.d.).

As mudanças climáticas têm impacto direto na disponibilidade de água, tornando-a mais escassa em diversas regiões, o aumento das temperaturas globais intensifica os períodos de aridez em áreas já suscetíveis à escassez hídrica, aumentando o risco de déficits hídricos que prejudicam a agricultura e os ecossistemas (Nações Unidas, s.d.). Além disso, o aumento de temperatura afeta severamente todo o planeta, os organismos vivos de forma geral, incluindo os seres humanos. Entre os efeitos pode-se citar a extinção de espécies animais e vegetais, modificações na regularidade e intensidade das precipitações (com notáveis consequências na agricultura), elevação do nível do mar e a intensificação de eventos meteorológicos extremos, como tempestades severas, inundações, vendavais, ondas de calor e secas prolongadas. Esses fenômenos representam um desafio importante para a sustentabilidade ambiental e para a adaptação das comunidades humanas às mudanças climáticas (Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais, 2023).

Nacionalmente, o ecossistema da Caatinga é identificado como uma área ecologicamente frágil, caracterizada por longos períodos de seca, desmatamento, incêndios, desertificação e outros desafios (Almeida et al., 2020). Com base em projeções, espera-se para as regiões de Caatinga uma redução nas chuvas totais, um aumento na variabilidade das

chuvas e na temperatura do ar. Isso pode resultar em secas mais intensas e frequentes, inundações afetando negativamente a produção de alimentos (Relatório De Avaliação Nacional, 2020).

Contudo a diversidade ecológica desempenha um papel crucial na mitigação dos impactos das emissões de GEEs. A presença de uma variedade de organismos fotossintéticos em ecossistemas desempenha serviços ambientais fundamentais para a manutenção dos ciclos biogeoquímicos, incluindo o sequestro de carbono da atmosfera e seu armazenamento na biomassa e no solo (Torres et al., 2017). Entre esses processos, a rotação de culturas tem se mostrado eficiente. Essa prática agrícola consiste em alternar o cultivo de diferentes plantas em uma mesma área, durante diferentes períodos de tempo (Silva, 2023).

Ao incluir o feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) em rotações de culturas, uma série de benefícios é alcançada, como o armazenamento de carbono e nitrogênio no solo, o feijão contribuiu para a fixação biológica de nitrogênio. Ademais, a diversificação das culturas com a inclusão do feijão reduz a necessidade de agrotóxicos, promovendo um manejo mais sustentável do solo e um ambiente mais equilibrado para o desenvolvimento das plantas (Sánchez-Navarro, 2019). Além disso, um estudo conduzido pela Embrapa em 2020 investigou o sequestro de carbono decorrente da produção de diversas culturas agrícolas ao longo de seis anos. Os resultados revelaram que o milho (*Zea mays*), independentemente do sistema de cultivo empregado, demonstrou um alto potencial de sequestro de carbono, em grande parte devido à sua elevada produtividade. Isso resultou em um sequestro total de carbono que superou a soma das contribuições individuais de cada cultura, destacando a relevância do milho no contexto do sequestro de carbono na agricultura (Bogian, 2020).

O interesse crescente em preservar ou aumentar os estoques de matéria orgânica no solo e capturar carbono tem impulsionado a necessidade de ferramentas confiáveis para avaliar as mudanças no carbono orgânico total (Leite e Mendonça, 2005). Nesse contexto, modelos como o Century se destacam, pois são versáteis e podem ser aplicados em uma variedade de sistemas agrícolas com diferentes práticas, como rotação de culturas, preparo do solo, fertilização e irrigação. O sucesso demonstrado pelo modelo Century na simulação de mudanças na matéria orgânica em solos de regiões temperadas tem motivado pesquisadores a aplicá-lo em ecossistemas tropicais (Leite e Mendonça, 2005). Além disso, o modelo foi submetido a extensos testes por meio de análises de dados de longo prazo, o que o torna particularmente valioso para comparar diversas estratégias de uso da terra (Carter et al., 1993).Especificamente no âmbito da agricultura, o Brasil implementou o Plano ABC, oficialmente intitulado "Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas

para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura". Este plano é um dos setoriais estabelecidos em conformidade com a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), como parte da estratégia do Estado Brasileiro para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e combater o aquecimento global.

Dessa forma, a implementação de técnicas agrícolas que sejam sustentáveis e inovadoras, como o manejo adequado do solo, e a integração de diferentes sistemas de produção, têm a capacidade de diminuir consideravelmente as emissões de GEEs originadas da agricultura. Essas práticas auxiliam na redução dos impactos das mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que asseguram a produção de alimentos de maneira sustentável.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos gerais

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto das projeções climáticas até o ano 2100 na dinâmica de carbono no sistema rotacionado de milho-feijão no município de Canindé de São Francisco, semiárido sergipano.

2.1.1. Objetivos específicos

- Obter as projeções climáticas até 2100 para o município de Canindé de São Francisco de acordo com o quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR 5);
- Avaliar variação nos estoques de carbono (solo e grãos) em sistema de cultivo consorciados envolvendo milho e feijão submetido às variações climáticas prevista até o ano 2100 através de modelagem biogeoquímica
- Discutir as implicações das variações nos estoques de carbono simuladas até o final do século.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Mudanças climáticas e suas implicações para Caatinga

As mudanças climáticas afetam a distribuição das chuvas, temperaturas e outros fatores, impactando o ciclo das culturas e da vegetação, resultando em safras menores e

produtos de qualidade inferior. Além dos prejuízos à agricultura, isso ameaça a segurança alimentar e a subsistência dos agricultores. A adaptação requer políticas públicas abrangentes, focadas na agricultura sustentável com sistemas diversificados e uso responsável da biodiversidade e recursos hídricos. Isso envolve apoio à transição, organização da produção, geração de renda e pesquisa (Brasil, 2012).

Em termos de ciclos biogeoquímicos, as mudanças no uso da terra e na agricultura são responsáveis por mais de 25% das emissões globais de GEEs. Entre 1990 e 2007, as emissões brutas de CO₂ provenientes do desmatamento tropical corresponderam a 40% das emissões globais de combustíveis fósseis. Nos últimos anos, a agricultura tem contribuído com aproximadamente 14% do total de emissões globais de GEEs (Anderson-Teixeira et al., 2012).

Em 1985, foi realizada a Conferência Internacional sobre a avaliação das funções do dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa na Áustria, durante a qual especialistas políticos mundiais uniram esforços para o desenvolvimento de políticas que reduzissem a mudança climática ocasionada pelas atividades humanas (Teixeira; Molleta; Luedemann, 2016). Contextualizando no âmbito nacional, o governo brasileiro na 15ª Conferência das Partes (COP-15), anunciou um compromisso voluntário de reduzir as emissões de GEEs no país em até 38,9% até 2020. A meta estabelecida pretendia alcançar uma diminuição de aproximadamente um bilhão de toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂ eq) até o final daquele ano (Assad et al., 2019). Para atingir tal objetivo, foram propostas diversas iniciativas, incluindo: A implementação de práticas intensivas na agricultura, como a recuperação de pastagens degradadas, a promoção ativa da integração lavoura-pecuária (iLP) e da fixação biológica de nitrogênio (FBN); o aumento da eficiência energética; a utilização de biocombustíveis; a expansão da capacidade de hidrelétricas; a exploração de fontes alternativas de biomassa; a energia eólica, bem como o estímulo ao uso de pequenas centrais hidrelétricas; e a ampliação da utilização de carvão proveniente de florestas plantadas no setor de siderurgia. Essas medidas se mostraram como um compromisso multifacetado, visando não apenas à redução das emissões, mas também à promoção da sustentabilidade e à diversificação da matriz energética e produtiva do Brasil (Brasil, 2012).

A Caatinga é o bioma mais vulnerável do Brasil devido à exploração insustentável de seus solos e recursos naturais ao longo de séculos de ocupação. Esta região é frequentemente associada à imagem de um local pobre e árido, o que contribuiu consideravelmente para o grau de degradação do ecossistema (Drumond et al., 2012). O relatório número 6º realizado pelo Centro de Ciências de Sistemas indica projeções relacionadas às mudanças climáticas que essa área pode passar por transformações devido ao aumento da temperatura e ao aumento da evapotranspiração (Nobre et al., 2007). Diante do contexto do bioma Caatinga, que abriga uma população de 28,6 milhões de pessoas, as projeções suscitam preocupações de ordem socioeconômica. Isso implica que este bioma, já sujeito a diversas adversidades de origem humana, sentirá de forma ainda mais acentuada os impactos das mudanças climáticas até o final do século, ocasionando prejuízos de magnitude incalculável, afetando tanto os ecossistemas quanto os sistemas humanos e sociais (Almeida, 2020).

Segundo Nobre (2014), caso a emissão atual de gases de GEEs provenientes de atividades humanas continue, é altamente provável que ocorram mudanças climáticas notáveis em nível global nos próximos 100 anos. Dessas, as mais impactantes para o país englobam o aumento da temperatura, alterações nos padrões de chuvas e variações nos extremos climáticos, como secas, inundações, ondas de frio, geadas, tempestades severas, ventanias e granizo. Recentes evidências científicas indicam um aumento na variabilidade climática relacionada aos eventos El Niño/La Niña, atribuído ao aumento do efeito estufa. O aumento previsto do nível médio do mar também pode acarretar consequências para ecossistemas e populações humanas nas regiões costeiras e ribeirinhas influenciadas pelas marés. A dinâmica do clima, com foco na imprevisibilidade das chuvas ao longo do tempo, provoca mudanças na dinâmica das plantas e, como resultado, aumenta o perigo de desertificação (Vieira et al., 2022).

Por isso a necessidade de um manejo adequado da biosfera terrestre, em especial do solo, pois lá oferece diversas oportunidades para reduzir notavelmente o aumento dos GEEs (Machado, 2015).

3.2. Principais usos da terra e dinâmica de C na Caatinga

O solo contém carbono em duas formas predominantes: inorgânica e orgânica. Esta última representa a matéria orgânica presente nos solos, composta por resíduos de organismos vegetais e animais em diferentes estágios de decomposição (Filho et al., 2022). A entrada e saída de carbono no solo estão intimamente ligadas a processos biogeoquímicos complexos ligados à fotossíntese, o solo absorve carbono de maneira variável, dependendo das espécies e dos sistemas de cultivo adotados e a redução do carbono no solo tem origens diversas, como a queima e decomposição de biomassa devido ao desmatamento, exploração madeireira, uso de combustíveis fósseis, emissões provenientes de solos, atividades pecuárias, operação de hidrelétricas e queimadas em áreas de pastagem. Compreender esses detalhados processos é de extrema importância para a implementação eficaz de estratégias voltadas à conservação do carbono no solo, sendo um passo fundamental para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Giogo et al., 2011; Fearnside, 2005). É fundamental ressaltar que o carbono desempenha um papel vital no desenvolvimento das plantas, participando em diversos processos como matéria orgânica. Esta, por sua vez, é crucial para a preservação das funcionalidades do solo, influenciando sua estrutura, estabilidade, capacidade de retenção de água, biodiversidade e contribuição como fonte de nutrientes para as plantas. Além disso, a presença de matéria orgânica confere ao solo o papel de um significativo reservatório de carbono (Terraprima, s.d).

Dessa maneira, a capacidade dos ecossistemas de liberar dióxido de carbono ou de capturar carbono atmosférico é delineada por uma ampla gama de processos, tanto de natureza abiótica quanto biótica (Diniz, 2015).

A adoção de diversas práticas para o uso da terra e a produção surge como uma estratégia viável para enfrentar os efeitos adversos das mudanças climáticas e as incertezas econômicas. Aumentar a quantidade de matéria orgânica no solo cultivado não apenas aprimora o manejo do solo, mas também fortalece a capacidade da agricultura de enfrentar as flutuações climáticas, ao mesmo tempo em que reduz a emissão líquida de gases de efeito estufa. De forma notável, os sistemas agroflorestais integrados, que se caracterizam por paisagens diversificadas, otimizam tanto a produção por unidade de área quanto a qualidade do solo (Rathore, 2022).

Diversos estudos têm indicado que o preparo do solo e o sistema de cultura são as duas práticas agrícolas que mais influenciam os estoques de carbono no solo. A adoção de práticas agrícolas como ausência de revolvimento do solo ou uma mobilização mínima

durante o cultivo, tem demonstrado ser uma contribuição relevante para a estabilização do carbono no solo. Este efeito é evidenciado pelos menores valores da taxa de decomposição da matéria orgânica no solo (Bayer et al., 2011). Além disso, a manutenção da pastagem desempenha um papel crucial na preservação do carbono orgânico no solo, mesmo quando ocorre a conversão para cultivo convencional em áreas previamente ocupadas por pastagens (D'andréa et al., 2004).

Os estudos conduzidos por Sacramento et al. (2013) evidenciam que o sistema agrossilvipastoril demonstrou menores perdas de carbono e nitrogênio, apontando para sua potencialidade como estratégia eficaz no sequestro de carbono e nitrogênio em condições semiáridas do Brasil. Notavelmente, o sistema agrossilvipastoril, que integra árvores, pastagem e gado, revelou ter um impacto positivo na acumulação de C e N no solo ao longo do tempo. A presença das árvores enriquece a matéria orgânica e aprimora a qualidade do solo, resultando em maiores estoques de C e N. Ademais, a combinação entre árvores, pastagem e gado promove uma ciclagem de nutrientes eficiente, minimizando as perdas de C e N.

A adoção de práticas agrícolas mais eficientes, tem se mostrado eficaz na mitigação das emissões de GEEs, na fase agrícola da produção de biocombustíveis. Além disso, o uso de inoculantes para fixação biológica de nitrogênio, juntamente com o manejo adequado da palhada e a automação dos processos, contribuem não apenas para aprimorar o balanço final de carbono, mas também para maximizar a produtividade. Nesse contexto, a automação e integração de processos nos agroecossistemas desempenham um papel crucial. A aplicação precisa de corretivos e fertilizantes, visando reduzir as emissões e aumentar a produtividade, torna-se essencial. Essas medidas representam um passo significativo na transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis e eficientes (Madari et al., 2004).

Modelos como o Century identificam reservatórios de carbono, como resíduos metabólicos e biomassa microbiana, com taxas de decomposição variadas. Prever como os estoques de carbono no solo respondem a mudanças na cobertura da terra ou no clima exige compreender as taxas de reposição do carbono armazenado e sua estabilização ou desestabilização em diferentes condições ambientais (Trumbore, 2009).

3.3. Uso da terra: Cultivo de Milho e Feijão em Canindé de São Francisco

Canindé do São Francisco pertence ao estado de Sergipe e abrange completamente o bioma Caatinga em seu território (Infosanbas, 2020). A economia de Canindé está centrada principalmente em três setores: a agricultura, que engloba cultivos como milho, tomate, feijão

e algodão; a pecuária, que envolve a criação de bovinos, caprinos e ovinos; e a avicultura, voltada para a produção de aves (Sergipe, 2002). Como mencionado, o milho e o feijão são dois produtos que já fazem parte da realidade deste município, tendo um papel importante na economia e na alimentação dos moradores locais. Dados coletados pelo Emdagro mostram que o feijão e o milho estão entre as três principais culturas exploradas no município.

O feijão-caupi é uma cultura antiga e versátil pertencente à família das plantas com flores Fabaceae, inclui variedades cultivadas da subespécie *Vigna unguiculata unguiculata*, originário da África, foi introduzido no Brasil no século XVI pelos colonizadores portugueses, inicialmente na Bahia, e sua presença é atestada por evidências arqueológicas desde então. A cultura ganhou destaque devido ao intenso comércio entre a Bahia e a região do Oeste da África, expandindo-se para o Piauí, onde o cultivo foi registrado em 1697, evidenciando a expansão da cultura, principalmente no nordeste, e sua subsequente consolidação em todo o país (Filho, 2011; Osipitan, 2021).

Adaptado a climas quentes, o feijão-caupi é encontrado em regiões tropicais e temperadas úmidas, apresentando uma ampla faixa de tolerância de temperatura, de 18 °C a 37 °C (Angelott, 2020). Além de sua versatilidade, o feijão-caupi é uma fonte alimentar vital e estratégica para as regiões tropicais e subtropicais em todo o mundo. Demonstrando boa adaptação a diversos tipos de solo e condições climáticas, ele ainda estabelece uma associação benéfica com bactérias que facilitam a fixação biológica do nitrogênio, muitas vezes dispensando a necessidade de adubação com esse nutriente (Borges, 2011).

Por sua vez o milho, pertencente à família Poáceas, é uma planta anual de crescimento vertical e afilhamento limitado. Classificado como uma espécie monóica-monoclina, o milho destaca-se pela sua notável capacidade de adaptação a uma variedade de condições ambientais. Para expressar seu máximo potencial produtivo, a cultura requer temperaturas entre 24 e 30°C, alta exposição solar e disponibilidade adequada de água no solo (Nunes, 2020).

O cultivo do milho no Brasil remonta a um período anterior à chegada dos europeus. Os índios, principalmente os guaranis, já o consideravam como o componente fundamental de sua alimentação. Com a vinda dos portugueses, o consumo do cereal cresceu e novos produtos à base de milho foram introduzidos nos hábitos alimentares dos brasileiros (Fiesp, s.d).

Considerando tudo o que foi mencionado, é importante também destacar o valor nutricional que esses alimentos oferecem à população. Isso reforça a necessidade de continuar cultivando essas plantações, conforme indicam os levantamentos de dados realizados por Oliveira et al., (2021), o feijão-caupi apresenta características vantajosas, como alto teor de

proteínas, fibras, minerais antioxidantes e baixo teor de lipídios. A farinha desse feijão demonstrou versatilidade em várias preparações alimentares. De acordo com a Embrapa (2004), o milho possui uma extensa gama de mais de 200 aplicações que abrangem diversos setores, incluindo indústria química, têxtil, petrolífera, mineração, produtos farmacêuticos e alimentação tanto para seres humanos quanto para animais. Além disso, é reconhecido como um alimento altamente nutritivo para os seres humanos, contribuindo para enriquecer a dieta com proteínas, gorduras, carboidratos, vitaminas e minerais essenciais.

Alguns estudos realizados conjuntamente com a cultura de milho e feijão na Caatinga tiveram resultados interessantes, como o estudo realizado por Morgado et al., (s.d), constatou-se que ao aumentar a população de feijão no cultivo consorciado com milho teve um impacto positivo. Isso proporcionou maior disponibilidade de nitrogênio para as plantas de milho, resultando em maior absorção. Embora o milho cultivado isoladamente tenha apresentado um rendimento total de biomassa superior em comparação ao consórcio, notou-se que o milho consorciado com feijão e com aplicação de nitrogênio demonstrou um aumento marcante no rendimento. Vale ressaltar que o plantio associado do milho, especialmente com o feijão, é uma prática muito frequente no Brasil. Sendo um sistema utilizado principalmente pelos pequenos agricultores que visam, sobretudo, uma redução do risco, melhor aproveitamento da área e mão-de-obra (Ramalho, s.d.)

De acordo com Filho (1997), existem diversas vantagens da rotação entre milho e feijão que devem ser levadas em consideração. Abaixo estão listados alguns benefícios importantes :

- A. **Maior produtividade de grãos:** A Rotação milho-feijão geralmente resulta em uma produção de alimentos mais expressiva por unidade de área em comparação com monocultivos.
- B. **Maior estabilidade de rendimento:** Em caso de falha no desenvolvimento de uma das culturas devido a fatores como escassez de chuva ou ataques de pragas, a outra cultura pode compensar a perda.
- C. **Menor incidência de pragas, doenças e plantas daninhas:** As condições microclimáticas criadas pela rotação tornam menos propício o desenvolvimento de insetos e doenças. Além disso, a competição entre as culturas dificulta o crescimento de plantas daninhas.
- D. **Controle mais eficaz da erosão:** O sistema proporciona uma cobertura vegetativa mais completa ao solo, o que o protege do impacto das gotas de

chuva e reduz a velocidade das enxurradas. Isso resulta em uma melhor prevenção da erosão do solo.

4. METODOLOGIA

4.1. Área do estudo

A Caatinga, uma extensa área de aproximadamente 750.000 km² localizada no nordeste do Brasil, se estende entre as latitudes subequatoriais de 2° 45' a 17° 21' Sul. Abrange os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, parte de Minas Gerais e Bahia. Este bioma representa 54% da região nordeste e ocupa 11% do território brasileiro, sendo notório como o "Polígono das Secas" devido à sua característica de aridez e escassez de precipitação pluviométrica (Moraes et al., 2007). Sob o ponto de vista climático, a Caatinga se destaca por apresentar um déficit hídrico pronunciado, altos índices de insolação e evapotranspiração, em conjunto com uma precipitação limitada e variável de ano para ano. Além disso, a vegetação desempenha um papel preponderante na determinação dos traços distintivos deste ecossistema (Santana, 2011).

A abundante disponibilidade de radiação solar, associada à imprevisibilidade do padrão de chuvas, resulta em elevadas taxas de evaporação na faixa de 1000 a 2000 mm por ano. Em certas áreas do interior do nordeste, essas taxas podem atingir até 3000 mm anuais. Este fenômeno de alta evaporação é observado não apenas em superfícies sem água, como açudes e represas, mas também em toda a região do semiárido brasileiro (Beserra de Moura, 2021). O município de Canindé do São Francisco, situado no extremo noroeste de Sergipe e fazendo fronteira com Alagoas, Bahia e o município de Poço Redondo, engloba uma área total de 908,2 km². Essa localização geográfica o coloca em uma região de transição entre estados, com influências climáticas e socioeconômicas variadas. A área do município é relevante para considerar questões relacionadas ao uso da terra e à gestão dos recursos naturais (BOMFIM et al., 2002).

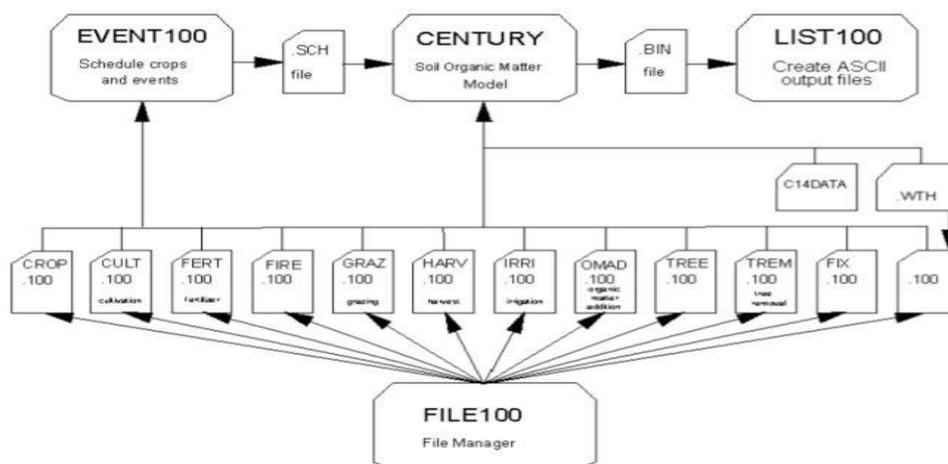
4.2. Modelo R Century

O modelo Century foi desenvolvido para simular a dinâmica da matéria orgânica em diversos tipos de solo, incluindo pastagens naturais, florestas e diferentes práticas agrícolas (Bortolon, 2012). Ele é capaz de representar de forma simplificada os principais processos

relacionados à assimilação e rotatividade de carbono, com base em modelos existentes (Parton et al., 1993). Esse modelo é constituído por submodelos que replicam o comportamento da matéria orgânica, a distribuição da água e o crescimento das plantas. Funciona em uma escala de um metro quadrado, considerando intervalos mensais. Para operar adequadamente, são necessárias informações como temperatura, quantidade de chuva, tipo de solo, composição de nitrogênio e lignina das plantas, aporte de nitrogênio proveniente da atmosfera e solo, bem como os níveis iniciais de carbono e nitrogênio no solo. Estes submodelos fornecem informações essenciais para entender as interações entre os elementos do ecossistema em questão (Leite e Mendonça, 2003).

A versão Century 4.5 é um sistema composto por diversos arquivos e programas interconectados. Os principais arquivos incluem o arquivo local (SITE.100), arquivo climático (.WTH) e os cenários de manejo (*.SCH). O arquivo local fornece informações iniciais sobre a localização geográfica, dados climáticos médios e detalhes do solo da área em estudo. O arquivo climático oferece a opção de utilizar dados climáticos reais ou futuros, desempenhando um papel fundamental nas simulações. O arquivo de cenário de manejo registra atividades realizadas na área, organizando-as qualitativamente, quantitativamente e temporalmente, permitindo a recriação do histórico de manejo da área em um único arquivo(Althoff, 2015).

Figura 1. Diagrama de Interação entre Programas e Arquivos no Ambiente do Modelo Century



4.3. Modelagem da dinâmica de carbono

Para a realização deste estudo sobre o plantio de milho em rotação com feijão na região da Caatinga, o modelo Century 4.5 foi empregado para simular a dinâmica do carbono do solo e da biomassa aérea. Os dados necessários foram coletados a partir de buscadores

confiáveis, incluindo o Google Acadêmico e a Scielo. A modelagem segue um processo dividido em quatro etapas: parametrização, calibração, validação e análise de sensibilidade. Na fase de calibração, busca-se criar concordância entre os dados observados e os simulados pelo modelo, ajustando seus parâmetros internos. A etapa inicial da pesquisa consistiu na parametrização e calibração do modelo para simular os estoques de carbono no solo da vegetação nativa da Caatinga, além de simular o clima. Diversas variáveis de entrada foram empregadas para iniciar o modelo, tais como dados anuais de precipitação e temperatura, textura do solo (proporções de areia, argila e silte), densidade do solo e pH. Essas informações foram integradas ao arquivo SITE.100, os parâmetros utilizados para criar o arquivo de agendamento foram: FIRE.100, CULT.100, CROP.100, PLTM.100, SENM.100, HARV.100, FRST.100, HARV.100, GRAZ.100, LAST.100. Durante a fase de calibração do modelo, foram efetuados ajustes nos seguintes parâmetros: PPDF (Temperatura ótima de produção) (1) e PRDX (1) (Produção mensal de biomassa acima do solo), com o propósito de aprimorar a representação do ecossistema da Caatinga. Adicionalmente, foi realizado um ajuste no parâmetro HIWESF (Fator de Estresse Hídrico para a Colheita) visando otimizar a modelagem do ciclo de cultivo de milho e feijão dentro do contexto da Caatinga. Para avaliar a eficácia do modelo Century na simulação dos estoques de carbono do solo na Caatinga, foram empregados os seguintes métodos de avaliação: a regressão linear, para examinar a correspondência entre os valores observados e simulados; e o cálculo do erro médio do modelo para validar os resultados, Parton et al. (1993) sugere que as variações sejam menores do que $\pm 25\%$. Após a parametrização e calibração, é crucial realizar a validação por meio da simulação dos modelos (Nascimento, 2008).

Neste estudo, foi adotado um sistema de rotação de culturas. Conforme Sacreti (2017) destaca, a implementação desse princípio, que é amplamente reconhecida como uma prática crucial para o êxito desse sistema. Essa estratégia se mostra especialmente benéfica para agricultores que lidam com uma safra de verão de maturação tardia. O sistema adotado consiste em três anos de cultivo de milho, seguidos por um ano de cultivo de feijão na região da Caatinga. O ciclo de cultivo foi planejado com precisão: em março, ocorreu o plantio do milho, seguido pelo seu crescimento em maio e a colheita em julho, totalizando cerca de 90 dias de ciclo. No quarto ano, substituiu-se o milho pelo feijão, as informações foram obtidas por meio do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico da Embrapa em 2018, servindo de inspiração para a condução deste estudo. Para as projeções climáticas até 2100, foi obtida a temperatura média de alguns municípios situados na região da Caatinga a partir do site Climatempo (<https://www.climatempo.com.br>). Esses dados foram utilizados para calcular

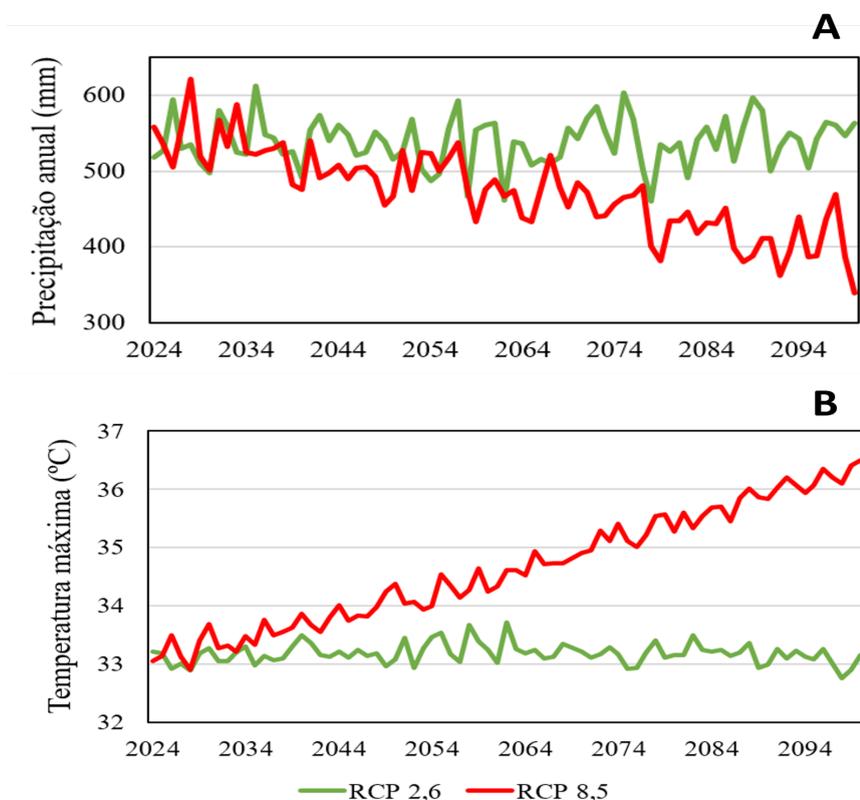
uma média geral da temperatura. Além disso, foi coletada a temperatura média de Canindé do São Francisco, posteriormente foram criados dois sítios com ambas as temperaturas médias.

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

As projeções climáticas para Canindé de São Francisco até o final do século indicam variações próximas à estabilidade para o cenário RCP 2,6 tanto para precipitação quanto para temperatura máxima. Porém, percebe-se uma redução na precipitação anual e um aumento consistente na temperatura máxima no cenário RCP 8,5 (Figura 2). Ao compararmos as médias de precipitação e temperatura no final (2091-2100) e no início da simulação (2024-2033) no cenário RCP 8,5, observamos, respectivamente, uma redução de 147 mm e um aumento de aproximadamente 3°C.

Figura 2. Projeções climáticas para Canindé de São Francisco, Sergipe, até 2100. As curvas trazem os cenários RCP 2,6 (linha verde) e RCP 8,5 (linha vermelha) para A) precipitação e B) temperatura máxima

Fonte: <https://gis.ucar.edu/gis-climatedata>.

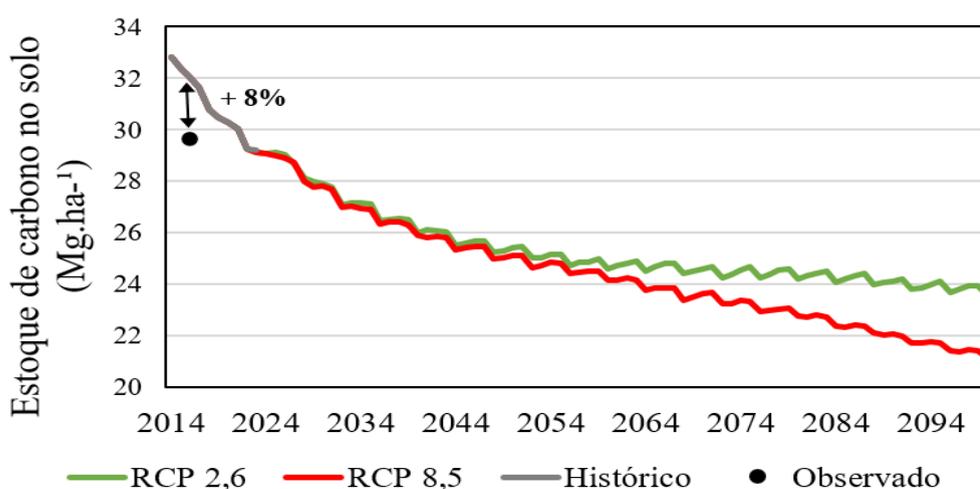


O efeito combinado de redução na precipitação e aumento da temperatura, por serem importantes reguladores da produção de biomassa na Caatinga, tem o potencial de exercer uma influência marcante sobre os estoques de carbono neste ecossistemas (Lima Junior et al.,

2014). As simulações da dinâmica de carbono em sistemas cultivados no semi-árido sergipano utilizando o modelo Century permitiram verificar esta afirmação. Os estoques de C em solos cultivados com milho e feijão em consórcio responderam às projeções climáticas até o final do século, principalmente no cenário RCP 8,5 (Figura 3). Os estoques em ambos os cenários climáticos iniciam-se em aproximadamente 29 MgCha-1, ao compararmos a média dos estoques na última década de simulação com a primeira década, percebe-se uma diminuição de 5 MgCha-1 no estoque de C do solo no cenário RCP 2.6, enquanto no cenário RCP 8.5, ocorre uma diminuição de 6,5 MgCha-1.

Sobre a dinâmica de C do solo ao longo do tempo, percebe-se que no cenário RCP 2.6, a partir de 2054, existe uma tendência à estabilização dos estoques de C, com pequena perda até 2100, resultando em um estoque final de 24 MgCha-1. Contudo, no cenário RCP 8.5, a perda de carbono se mantém constante após 2054, fazendo o estoque de C atingir 21 MgCha-1. Essa diminuição pode ser atribuída, em parte, aos efeitos do sistema de plantio convencional. Este tipo de manejo envolve o revolvimento do solo (aração) o qual, por sua vez, promove maior perda de carbono. Isso ocorre porque aumenta a disponibilidade de oxigênio para os organismos decompositores e fragmenta os agregados que protegem o carbono contra a decomposição microbiana (Ferreira, 2013).

Figura 3. Variação do estoque de carbono do solo em área de cultivo agrícola sob plantio convencional no município de Canindé de São Francisco, Sergipe, submetido a diferentes cenários de projeções climáticas: RCP 2,6 (linha verde) e RCP 8,5 (linha vermelha). O ponto representa o estoque de C do solo em coleta de campo a uma profundidade de 20cm, realizada em 2018 (Gouveia, 2018) e o valor em porcentagem representa a diferença proporcional entre os valores observado e simulado pelo modelo Century.



Outro fator importante determinando o padrão da dinâmica de C do solo encontrado é o efeito combinado entre aumento da temperatura e redução nas chuvas. Ao diminuir a precipitação espera-se redução na disponibilidade de água para as plantas, a qual é um recurso essencial para a fotossíntese, com conseqüente redução na produção primária bruta (Landau, 2021). Percebe-se que os estoques de C do solo ao final da simulação foram menores no cenário RCP 8,5. Alterações climáticas extremas, como o significativo aumento da temperatura média e períodos prolongados de seca, têm o potencial de desencadear uma série de impactos em todos os níveis da estrutura vegetal. Isto se deve à capacidade limitada de muitas espécies em se adaptarem a essas novas condições, resultando em um impacto direto nos serviços ecossistêmicos providos, com destaque para o estoque de carbono (Malfeton 2022).

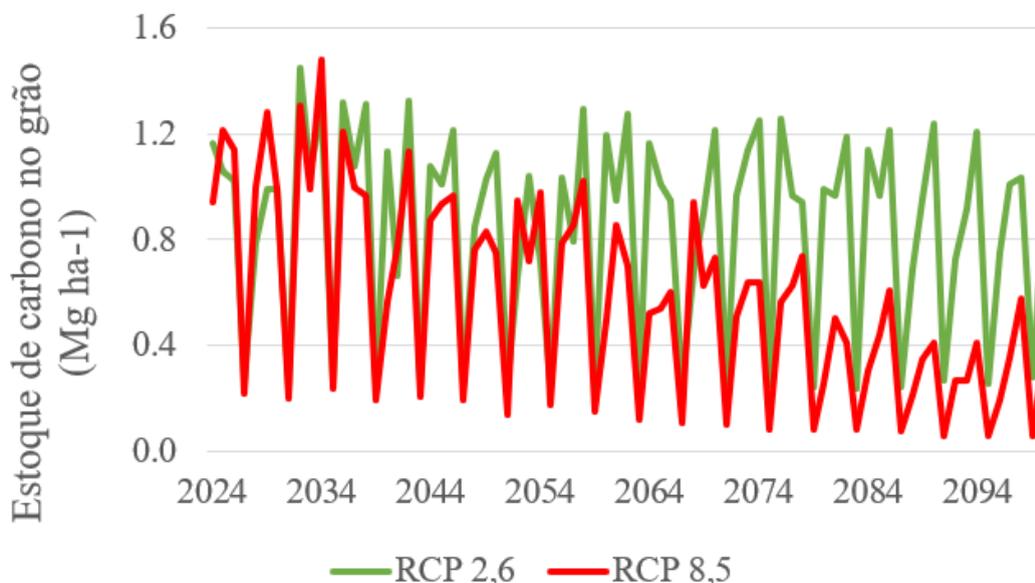
Em relação ao estoque de C nos grãos (Figura 4), a simulação partiu de valores de aproximadamente 1,2 MgCha-1, e as médias na primeira década de simulação eram de 0,9 MgCha-1 e 0,7 MgCha-1, respectivamente nos cenários RCP 2.6 e RCP 8.5. Enquanto no cenário RCP 2.6 houve manutenção da média de estoque de C na última década de simulação, no cenário RCP 8.5 houve redução para 0,3 MgCha-1.

Com relação ao cultivo de feijão, é importante destacar que uma concentração adequada de CO₂ na atmosfera beneficia a fotossíntese e a produtividade das plantas. No entanto, o aumento da temperatura devido aos aumento na concentração de gases do efeito estufa na atmosfera exerce um impacto importante, especialmente durante a fase reprodutiva das culturas, resultando na queda de flores e na falta de formação de vagens e grãos. Assim, um aumento de temperatura entre 1,23°C e 2,86°C provavelmente levará a uma diminuição na produtividade (Peixoto, 2023). Com referência ao milho, estudos apontam para uma redução tanto na área cultivada quanto na produção. Análises sobre os efeitos das mudanças climáticas na cultura do milho demonstram uma diminuição de 15% no rendimento de grãos, sendo esse declínio principalmente atribuído ao encurtamento do ciclo da cultura (Massignam, 2015).

Vale ressaltar que o carbono desempenha um papel crucial na fotossíntese, o processo que impulsiona o crescimento dos grãos (Chagas, 2016). Além disso, os grãos são fundamentais na alimentação global, servindo como rica fonte de nutrientes. Além dos carboidratos, fornecem proteínas, lipídios, vitaminas e minerais essenciais (Abia, 2022). A atividade agrícola, diretamente afetada por essas mudanças, repercute em diversos setores econômicos, aumentando os custos de produção agrícola e pecuária, bem como os insumos necessários para a produção de alimentos e o consumo familiar. Essa situação resulta em uma redução da atividade econômica em múltiplos setores, gerando um efeito em cascata no

sistema econômico como um todo. Algumas regiões podem se beneficiar com a introdução ou expansão de determinados cultivos, atraindo recursos e mão de obra, o que, por sua vez, pode deslocar a atividade econômica de outras áreas (Domingues, 2011).

Figura 4. Variação do estoque de carbono nos grãos em área de cultivo agrícola sob plantio convencional no município de Canindé de São Francisco, Sergipe, submetido a diferentes cenários de projeções climáticas.



6. CONCLUSÃO

O modelo Century, ao simular com precisão a temperatura e precipitação em Canindé de São Francisco, bem como ao estimar os níveis de carbono no solo e biomassa proveniente do cultivo consorciado de milho e feijão, demonstrou sua valiosa contribuição para a compreensão do ecossistema local. As projeções climáticas apontam para um aumento nas perdas de carbono e uma redução na produtividade de grãos em solos sob manejo consorciado na Caatinga, tornando evidente a relevância dos impactos ambientais e socioeconômicos associados a essas mudanças. Portanto, é crucial elaborar estratégias de adaptação no manejo do solo para enfrentar com eficácia os desafios apresentados por esse contexto climático na região, visando promover um futuro mais sustentável e resiliente para a comunidade local.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIA. Notícias - ABIA. Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. Disponível em: <https://www.abia.org.br/noticias/graos-sementes-e-oleaginosas-ingredientes-de-destaque-nas-plataformas-de-inovacao>; Acesso em: 29 Sep. 2023.

AGRITEMPO. **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico**. Disponível em: <https://www.agritempo.gov.br/zonamento/tabelas/SE/CANINDE_DE_SAO_FRANCISCO_G.HTML>.

ALMEIDA, Rafaela Gomes de; CAVALCANTE, Arnóbio de Mendonça Barreto; SILVA, Emerson Mariano da. Impactos das Mudanças Climáticas no Bioma Caatinga na Percepção dos Professores da Rede Pública Municipal de General Sampaio - Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 3, p. 397–405, 2020.

ANGELOTTI, Francislene; BARBOSA, Laise Guerra; BARROS, Juliane Rafaela Alves; et al. Cowpea development under different temperatures and carbon dioxide concentrations. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, 2020.

ANDERSON-TEIXEIRA; SNYDER; TWINE.; et al. Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the Americas. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 3, p. 177–181, 2012.

BAYER, Cimélio; CARNEIRO AMADO, Telmo Jorge; TORNQUIST, Carlos Gustavo; et al. Estabilização Do Carbono No Solo E Mitigação Das Emissões de Gases de Efeito Estufa Na Agricultura Conservacionista. Disponível em: <<https://projetoaquarius.agr.br/wp-content/uploads/2021/06/ESTABILIZACAO-DO-CARBO-NO-NO-SOLO.pdf>>. Acesso em: 10 May 2023.

BOGIANI, Julio Cesar; CUNHA DE BARCELLOS FERREIRA, Alexandre; DIAS COELHO BORIN, Ana Luiza; et al. **Sequestro de carbono em sistemas de produção de soja, milho e algodão em solo arenoso do Cerrado da Bahia**. [s.l.: s.n.], 2020.

BESERRA DE MOURA , Magna Soelma . **Precipitação e evaporação**. Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/clima/precipitacao-e-evaporacao>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

BOMFIM, Luiz Fernando Costa; COSTA, Ivanaldo Vieira Gomes da; BENVENUTI, Sara BORGES, Sibeli; VASCONCELOS, Steel Silva; RYOHEI KATO, Osvaldo. **Produção de grãos e aporte de carbono e nitrogênio de feijão-caupi em sistema de corte-e-trituração da vegetação secundária**. Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/899908/producao-de-graos-e-aporte-de-carbono-e-nitrogenio-de-feijao-caupi-em-sistema-de-corte-e-trituracao-da-vegetacao-s-ecundaria>>. Acesso em: 11 Sep. 2023.

BORTOLON, Elisandra Solange Oliveira; MIELNICZUK, João; TORNQUIST, Carlos Gustavo; et al. Potencial de uso do modelo century e sig para avaliar o impacto da agricultura sobre estoques regionais de carbono orgânico do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 831–850, 2012.

BRITO MORAIS, Ygor Cristiano; BEZERRA DE ARAÚJO, Maria do Socorro; DE MOURA, Magna Soelma Beserra; et al. Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 585–599, 2017.

CARTER, Mr; PARTON, Wj; ROWLAND, Ic; et al. Simulation of soil organic carbon and nitrogen changes in cereal and pasture systems of southern Australia. **Soil Research**, v. 31, n. 4, p. 481, 1993.

CHAGAS, José Henrique. **Research shows cultivating wheat absorbs more carbon dioxide than it releases**. Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/81064143/research-shows-cultivating-wheat-absorbs-more-carbon-dioxide-than-it-releases>>. Acesso em: 29 Sep. 2023.

DA SILVA SANTANA, José Augusto; SILVA SOUTO, Jacob. Produção de serapilheira na Caatinga da região semi-árida do Rio Grande do Norte, Brasil. **Idesia (Arica)**, v. 29, n. 2, p. 87–94, 2011.

DE ARAÚJO NETO, Renato Américo; MAIA, Stoécio Malta Ferreira; ALTHOFF, Tiago Diniz; et al. Simulation of soil carbon changes due to conventional systems in the semi-arid region of Brazil: adaptation and validation of the century model. **Carbon Management**, v. 12, n. 4, p. 399–410, 2021.

DRUMOND, Marcos Antonio; SCHISTEK, Haroldo ; SEIFFARTH:, João Arthur ; et al. Caatinga: um bioma exclusivamente brasileiro... e o mais frágil. 389. ed. [s.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <<https://www.ihuonline.unisinos.br/media/pdf/IHUOnlineEdicao389.pdf>>. Acesso em: 22 Sep. 2023.

FEARNSIDE, Philip M; INPA. **Destruição E Conservação Da Floresta Amazônica**. Manaus: CIP-Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Philip-Fearnside/publication/362824128_Destruicao_e_Conservacao_da_Floresta_Amazonica-Prova/links/63dbe48362d2a24f92ed267a/Destruicao-e-Conservacao-da-Floresta-Amazonica-Prova.pdf#page=21>.

FERREIRA, E. A. B. Dinâmica de longo prazo do carbono do solo em sistemas de manejo no cerrado. 2013. 235 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade de Brasília, Brasília-DF.

FIESP. **Milho e suas riquezas - História - Sindicato da Indústria do Milho, Soja e seus Derivados no Estado de São Paulo**. SINDMILHO & SOJASindicato da Indústria do Milho, Soja e seus Derivados no Estado de São Paulo – SINDMILHO & SOJA. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/sindimilho/sobre-o-sindmilho/curiosidades/milho-e-suas-riquezas-historia/>>. Acesso em: 11 Sep. 2023.

FILHO, Israel A. Pereira; RAMALHO, Magno A. Patto; CRUZ, José Carlos; et al. **Consórcio milho-feijão**. [s.l.: s.n.], 1997.

FREIRE FILHO, Francisco Rodrigo . **Feijão-Caupi no Brasil Produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/916831/1/feijaocaupi.pdf>>. Acesso em: 11 Sep. 2023.

GIONGO, Vanderlise; FERREIRA CUNHA, Tony Jarbas; MONTEIRO MENDES, Alessandra Salviano ; et al. **Carbono no sistema solo-planta no Semiárido brasileiro**. Portal Embrapa. Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/923066/carbono-no-sistema-solo-planta-no-semiarido-brasileiro>>. Acesso em: 27 Dec. 2011.

LANDAU , Elena Charlotte; GUIMARÃES, Daniel Pereira; MAGALHÃES, Paulo Cesar .

Relações com o clima. Portal Embrapa. Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/relacoes-com-o-clima>>. Acesso em: 28 Sep. 2023.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. de S. **Modelagem da dinâmica da matéria orgânica em ambiente tropical.** Disponível em:

<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/68503>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 2, p. 347–358, 2004.

LEITE, Luiz Fernando Carvalho; MENDONÇA, Eduardo de Sá. Modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo: equações e pressupostos. **Ciência Rural**, v. 33, n. 4, p. 679–686, 2003.

LIMA JÚNIOR, C. ; ACCIOLY, L. J. de O.; GIONGO, V.; et al. **Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação.** Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1096262>>.

MADARI, B. E. **Fracionamento de agregados: procedimento para uma estimativa compartimentada do seqüestro de carbono no solo.** Disponível em:

<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/965471>>. Acesso em: 19 Sep. 2023.

MALFETONI FERREIRA, Igor José. **Impacto Das Mudanças Climáticas Sobre a Biomassa Acima Do Solo Em Fragmentos de Mata Atlântica.** INPE, 2020. Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/03.25.14.25/doc/publicacao.pdf>> . Acesso em: 29 Sep. 2023.

MARIA PINOTTI. **Projeto cadastro da infra-estrutura hídrica do Nordeste. Estado de Sergipe. Diagnóstico do município de Canindé do São Francisco.** Disponível em:

<<https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/2480>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

MARTINELLI, Luiz Antonio; HENRY BALBAUD OMETTO, Jean Pierre; BIELEFELD NARDOTO, Gabriela; et al. **Ciclos Biogeoquímicos e Mudanças Climáticas, Capítulo 05.** Disponível em:

<http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos_publicos/GT1/GT1_volume_completo_cap5.pdf>.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura** . [s.l.: s.n., s.d.]. Disponível em:

<<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agricultura-de-baixa-emissao-de-carbono/publicacoes/download.pdf>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

MORGADO, Luiz Balbino; WILLEY, Robert William. Optimum plant population for maize-bean intercropping system in the Brazilian semi-arid region. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 5, p. 474–480, 2008.

NASCIMENTO, Alexandre Ferreira do. **Calibração e validação dos modelos CENTURY, APSIM e NDICEA de decomposição de materiais orgânicos e mineralização de N para a Mata Atlântica**. Disponível em: <<https://orgprints.org/id/eprint/21844/>>. Acesso em: 18 Sep. 2023.

NATIONS, United. **Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas**. United Nations. Disponível em: <<https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change/>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

NOBRE, Carlos A. **Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguasinteriores/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/impactos_ecossistemas_cnobre.pdf>. Acesso em: 14 May 2014.

NOBRE, Carlos A.; LAPOLA, David; SAMPAIO, Gilvan ; et al. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade**. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Relatorio_6.pdf>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

NOBRE, Carlos A., *et al.* **Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI**. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Relatorio_6.pdf>.

NUNES, José Luis da Silva. **Características do milho**. Portal Agrolink, 2020. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/culturas/milho/informacoes/caracteristicas_361401.html>. Acesso em: 11 Sep. 2023.

OLIVEIRA, Adolfo Marcito Campos de; MELO NETO, Bernardo; ROCHA, Maurisrael de Moura; et al. Produção de alimentos na base do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*): **importância nutricional e benefícios para a saúde**. Research, Society and Development, v. 10, n. 14, p. e56101416054, 2021.

OSIPITAN, O. Adewale; FIELDS, Jeneen S.; LO, Sassoum; et al. Production Systems and Prospects of Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in the United States. **Agronomy**, v. 11, n. 11, p. 2312, 2021.

PARTO RAMALHO, Magno Antônio; EMBRAPA. **III Consorciação Milho-feijão**. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/57157/1/Circ-4-Consorciao-milho.pdf>>. Acesso em: 20 Sep. 2023.

PARTON, W. J.; SCURLOCK, J. M. O.; OJIMA, D. S.; et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 7, n. 4, p. 785–809, 1993.

PORTAL EMBRAPA. Disponível em:
<<https://www.embrapa.br/tema-agricultura-de-baixo-carbono/sobre-o-tema>>;
Acesso em: 18 Oct. 2023.

PULROLNIK, Karina. **Transformações do carbono no solo**. 1o. Distrito Federal: [s.n., s.d.]. Disponível em:
<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/664366/1/doc264.pdf>>. Acesso em:
7 Sep. 2023.

RATHORE, Sanjay Singh; BABU, Subhash; EL-SAPPAH, Ahmed H.; et al. Integrated agroforestry systems improve soil carbon storage, water productivity, and economic returns in the marginal land of the semi-arid region. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 10, p. 103427, 2022.

RIBEIRO, Juliana Martins. **Dinâmica do carbono orgânico em cronossequências de uso do solo no cerrado mineiro: mudanças nos estoques e simulação com o modelo Century**. Acesso em: 7 Sep. 2023.

SÁNCHEZ-NAVARRO, Virginia; ZORNOZA, Raúl; FAZ, Ángel; et al. Does the use of cowpea in rotation with a vegetable crop improve soil quality and crop yield and quality? A field study in SE Spain. **European Journal of Agronomy**, v. 107, p. 10–17, 2019.

SACRAMENTO, José Augusto Amorim Silva do; ARAÚJO, Ana Caroline de Moraes; ESCOBAR, Maria Eugenia Ortiz; et al. Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 784–795, 2013.
Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/36838>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA, DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO E DA PESCA. **Série Básicas Municipais: CANINDÉ DE SÃO FRANCISCO**. Disponível em:
<https://www.emdagro.se.gov.br/wp-content/uploads/2021/11/Caninde-de-Sao-Francisco_compressed.pdf>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

SECRETI, Mateus. Disponível em:
<<https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/MESTRADO-DOCTORADO-AGRONOMIA/Matheus%20Luiz%20Secreti.pdf>>. Acesso em: 18 Sep. 2023.

SILVA, Melissa Freitas. Acordo de Paris. **MMA - Ministério do Meio Ambiente**, 2016.
Disponível em:
<<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>.
Acesso em: 29 Sep. 2023.

SILVA, Willians Bini. **Rotação de culturas e mudanças climáticas - INBS**. Instituto Brasileiro de Sustentabilidade. Disponível em:
<<https://inbs.com.br/rotacao-de-culturas-e-mitigacao-das-mudancas-climaticas/>>. Acesso em:
20 Sep. 2023.

TEIXEIRA, Breno Simonini; MOLLETA, Danielly Godiva Santana; LUEDEMANN, Gustavo. **Brasil : Esforços nacionais sobre as mudanças climáticas**. Disponível em:

<<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9289>>.

TRUMBORE, Susan; BARBOSA DE CAMARGO, Plínio. Soil carbon dynamics. In: **Amazonia and Global Change**. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2009, p. 451–462. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2008gm000741>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

VIEIRA GOIS, Douglas; PESSOA DE MELO, Felipe; MELO E SOUZA, Rosemeri. RISCO À DESERTIFICAÇÃO NOS MUNICÍPIOS DE CANINDÉ DE SÃO FRANCISCO E POÇO VERDE (SE). **Revista Ciência Geográfica**, v. 26, n. 01, p. 103–126, 2022.

Canindé de São Francisco - SE. Infosanbas. Disponível em:

<<https://infosanbas.org.br/municipio/caninde-de-sao-francisco-se/#Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-social,-territorial-e-econ%C3%B4mica>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

Projeções de Clima (CMIP5). Instituto de Estudos Climáticos. Disponível em:

<<https://impactoclima.ufes.br/conteudo/projecoes-de-clima-cmip5>>. Acesso em: 7 Sep. 2023.

WWF BRASIL. **Plantio direto**. Disponível em:

<https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/agricultura/agr_acoes_resultados/agr_solucoes_cases_plantio2/>. Acesso em: 24 Sep. 2023.

Apêndice A

Feijão		Milho Rendimento Baixo		Parâmetro
Original	Modificado	Original	Modificado	
27	28	0.8	0.7	PPDF(1) - Temperatura ótima de produção para parametrização de uma curva de Função Densidade de Poisson para simular o efeito da temperatura no crescimento. Faixa válida: 10,0 a 40,0
0.6	0.3	-	-	PRDX(1) - Produção mensal potencial acima do solo para culturas em gramas de biomassa por metro quadrado por mês.
0	1	0	1	HIWSF - Fator de estresse hídrico do índice de colheita: 0 = nenhum efeito do estresse hídrico 1 = sem rendimento de grãos com estresse hídrico máximo Valores válidos: 0 ou 1