

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Caracterização do acúmulo de carbono orgânico no solo em produção de soja
(*Glycine max* L.) irrigada no MATOPIBA

Lucas Camargo Antedomenico

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2023

Lucas Camargo Antedomenico
Engenheiro Agrônomo

Caracterização do acúmulo de carbono orgânico no solo em produção de soja (*Glycine max* L.) irrigada no MATOPIBA

Orientador:
Profa. Dra. **PATRÍCIA ANGELICA MARQUES ALVES.**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Piracicaba
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Antedomenico, Lucas Camargo

Caracterização do acúmulo de carbono orgânico no solo em produção de soja (*Glycine max* L.) irrigada no MATOPIBA / Lucas Camargo Antedomenico. - - Piracicaba, 2023.

104 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Carbono orgânico 2. Soja 3. *Glycine max* L. 4. Irrigação em grãos 5. Sustentabilidade I. Título

DEDICATÓRIA

À minha mãe e ao meu pai, que pela vontade de vencer, sempre me encorajaram a seguir o caminho do conhecimento. Graças a vocês, carrego o conforto da frase “nós não medimos esforços para os estudos”. Obrigado por me apoiarem e estarem comigo nas mudanças mais difíceis, nas decisões mais contraditórias, no apoio mais insustentável e por perceberem, na ausência da minha fala, que eu precisava de ajuda. Todo caminho até aqui não seria possível sem o amor e a infraestrutura que vocês me proporcionaram.

Ao meu irmão, que me mostrou a grandeza de ser livre ao expressar a própria felicidade. Aos meus avôs, avós, tios e tias que sempre se entregaram de bom grado. Aos demais familiares e amigos pela amizade. Aos meus colegas acadêmicos e orientador por me inserirem nos caminhos da busca pelo conhecimento.

AGRADECIMENTOS

À ESALQ, em especial ao Dept. de Engenharia de Biosistemas e ao Dpt. de Solos pela infraestrutura, ensino e apoio. Aos meus guias acadêmicos: Profa. Dra. Patrícia Angélica Alves Marques, Prof. Dr. Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Prof. Dr. Marcos Siqueira Neto, Prof. Dr. Tarcio Rocha Lopes, Profa. Dra. Sônia Maria Stefano Piedade e Prof. Dr. Gustavo Beruski.

Agradeço a Alita M. Antedomenico e Marrie Antedomenico, minhas companheiras de quatro patas que no aconchego, no olhar e nas lambidas fizeram da minha vida ainda mais preciosa. Obrigado por estarem comigo, de terem partes do meu coração e de caminharem ao meu lado em todo esse processo. Vocês são máquinas de destuição que conseguiram reconstruir uma vida inteira.

Agradeço a Ana Clara Marcondes Alves que esteve comigo nas fases mais agitadas da minha vida, na solidão, nas mudanças, nos anos de mestrado, no período da veterinária, nas viagens e nos momentos de tranquilidade. Sou grato ao amor que você expressou/expressa por mim e a paciência em repetir, incassavelmente, as palavras: “você vai conseguir”. Você me fez continuar no caminho dos sonhos e a grandeza que você me entregou eu talvez seja incapaz de retribuir com mesma maestria. Você é uma mulher forte e maravilhosa.

Obrigado também a Maria Luiza de Lima Raimundo, Bruna Nayara de Souza, Carolina Garcia de Figueredo Colín que sustentaram minha solidão quando parte do meu apoio me deixou. Obrigado a todas - sobretudo Maria Luiza - por terem me ouvido, por terem me apoiado, por terem me ensinado que a felicidade é poder expressar a paz na autossuficiência.

A vocês, Breno Canto Ferreira Ramalho, Gustavo Padovani Zanlorenzi Masukaze, Letícia Simões, Luís Eduardo Maciel e Luís Augusto Golinelly Muniz sou imensamente grato por estarem comigo desde a minha infância, por acompanharem o meu crescimento, remediarem as minhas atitudes e, muitas vezes, empurrarem a pedra na qual me impedia de prosseguir meu caminho. Obrigado pela companhia, por me mostrarem a graça de viver e por me entregarem tanto apoio.

Também quero expressar minha gratidão aos amigos que se fizeram presente no percurso da universidade, sobretudo ao Rudy Godoi, que se tornou um excelente educador e Matheus Addad Ramiro, que se tornou um excelente economista.

EPÍGRAFE

“[...] mas agora minha mente foi aberta para visões mais elevadas das coisas.”

Edward A. Abbott

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
ARTIGO 1 - PEGADA DE CARBONO DA PRODUÇÃO DE SOJA (<i>Glycine max</i> L.) NA FRONTEIRA AGRÍCOLA BRASILEIRA – MATOPIBA CERRADO.....	11
Resumo.....	11
Abstract.....	13
Lista de figuras.....	13
Lista de Tabelas.....	14
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	14
Lista de Símbolos.....	16
1. Introdução.....	17
2. Material e Métodos.....	21
2.1. Caracterização da área de estudo.....	21
2.2. Criação dos cenários de linha de base.....	21
2.3. Cálculo das emissões de GEE por cenário de linha de base.....	23
2.4. Análise estatística.....	28
3. Resultados.....	29
3.1. Criação dos cenários de linha de base.....	29
3.2. Emissão de GEE por cenário de linha de base.....	31
4. Discussão.....	34
5. Conclusão.....	34
Referências.....	39
ARTIGO 2 - AVALIAÇÃO DO ACÚMULO DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM PRODUÇÃO DE SOJA IRRIGADA USANDO UMA ABORDAGEM DE MODELOS – MATOPIBA CERRADO.....	43
Resumo.....	43
Abstract.....	44
Lista de Figuras.....	45
Lista de Tabelas.....	45
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	46
Lista de Símbolos.....	48
1. Introdução.....	49

2. Material e Métodos.....	53
2.1. Escolha do local de estudo.....	53
2.2. Definição do experimento	55
2.3. Cálculo do balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação	56
2.4. Uso do programa Decision Support System for Agrotechnology Transfer.....	56
2.5. Uso da metodologia Verra – VM0042	61
2.6. Análise estatística	67
3. Resultados.....	68
3.1. Resultados do balanço hídrico climatológico e de irrigação.....	68
3.2. Resultados de produtividade e aporte de carbono no solo.....	76
3.3. Resultados do balanço de carbono e carbono acumulado no solo.....	82
4. Discussão	90
5. Conclusão	99
Referências	100

RESUMO

Caracterização do acúmulo de carbono orgânico no solo em produção de soja (*Glycine max* L.) irrigada no MATOPIBA

Aproximadamente 79% das emissões globais de GEE vieram dos setores de energia, indústria, transporte, agricultura, silvicultura e outros usos do solo (AFOLU) em 2019. Mesmo assim, em decorrência da segurança alimentar, o setor primário sofre pressões para aumentar a eficiência na cadeia produtiva por meio de etapas sustentáveis, as quais incluem menor emissão de GEE e, quando possível, a remoção dos gases CO₂, CH₄ e N₂O da atmosfera. A irrigação é uma alternativa capaz de inserir carbono no solo através do aumento de produtividade, garantindo maior rentabilidade, melhora nos índices de químico-físicos do solo e diminuição da pegada de carbono. Todavia, experimentos para avaliação do carbono orgânico podem levar até 20 anos, inviabilizando o processo analítico. Isso promove o uso de modelos de simulação para estudar o comportamento passado e/ou futuro do estoque de carbono no solo. Desta forma, este trabalho objetivou simular a taxa de acúmulo de carbono no solo em diferentes lâminas de cultivo de soja irrigada no município de São Desidério-BA via modelo CROPGRO-SOYBEAN do Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). Foram selecionados dois pontos amostrais no município e cinco tratamentos de soja irrigada no período de 20 anos de cultivo (2000 até 2019) para avaliação, ano a ano, do balanço de carbono anual (BCS) e taxa anual de acúmulo de carbono no solo (TA). Os tratamentos foram (1) soja sequeiro, (2) soja irrigada com a aplicação de água de 45% da evapotranspiração de cultura, (3) soja irrigada com aplicação de 75% da evapotranspiração de cultura, (4) soja irrigada com aplicação de 100% da evapotranspiração de cultura e (5) soja irrigada com aplicação de 110% da evapotranspiração de cultura. Os experimentos foram simulados sob sistema de irrigação pivô central e submetidos as etapas: cálculo do balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para obtenção das lâminas, cálculo de produtividade (Y) no programa DSSAT, cálculo de BCS e TA pelo uso da metodologia Verra – VM0042. Os resultados foram comparados pelo teste ANOVA e Tukey, ambos a 5% de significância. Como resultado, observou-se que os tratamentos 1 e 2 (SI e 45%ETC) não diferiram em produtividade e taxa de acúmulo de carbono no solo entre si, demonstrando manutenção e queda de C no estoque inicial do solo para o CAR1 e CAR2, respectivamente. Os tratamentos 3 e 4 (75%ETC e 100%ETC) também não diferiram entre si e resultaram em acúmulo de C no solo para ambas as localidades. O tratamento 5 (110%ETC) diferiu de todos os demais, acusando a maior taxa de acúmulo de C para as duas coordenadas. Pode-se afirmar que o sistema de produção da soja realizado na maior parte da região do oeste baiano não garante a sustentabilidade da matéria orgânica, podendo contribuir com sua remoção e, conseqüentemente, com o aumento do efeito estufa, todavia análise entre tratamentos demonstrou o uso de irrigação é capaz de incrementar o C do solo se assegurado que as lâminas sejam aplicadas a partir de 75% da necessidade de água potencial da cultura (75%ETC).

Palavras-chave: Efeito estufa, Estoque de carbono no solo, Irrigação, *Glycine max* L., Produtividade, Modelagem

ABSTRACT

Evaluation of soil organic carbon accumulation in irrigated soybean production using a model approach – MATOPIBA Cerrado

Approximately 79% of global GHG emissions came from the energy, industry, transportation, agriculture, forestry, and other land use (AFOLU) sectors in 2019. Even so, as a result of food security, the primary sector is under pressure to increase efficiency in the production chain through sustainable steps, which include lower GHG emissions and, when possible, the removal of CO₂, CH₄ and N₂O gases from the atmosphere. Irrigation is an alternative capable of inserting carbon into the soil through increased productivity, ensuring greater profitability, improvement in soil chemistry and reduction of the carbon footprint. However, experiments to evaluate organic carbon can take up to 20 years, making the analytical process unfeasible. This promotes the use of simulation models to study the past and/or future behavior of soil carbon stocks. Thus, this work aimed to simulate the rate of carbon accumulation in the soil in different irrigated soybean crop depths in the municipality of São Desidério-BA using the CROPGRO-SOYBEAN model of the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). Two sampling points in the municipality and five treatments of irrigated soybean in the 20-year period of cultivation (2000 to 2019) were selected for evaluation, year by year, of the annual carbon balance (BCS) and annual rate of soil carbon accumulation (TA). The treatments were (1) rainfed soybean, (2) irrigated soybean with the application of water of 45% of the crop evapotranspiration, (3) irrigated soybean with application of 75% of the crop evapotranspiration, (4) irrigated soybean with application of 100% of the crop evapotranspiration and (5) irrigated soybean with the application of 110% of the crop evapotranspiration. The experiments were simulated under a center pivot irrigation system and submitted to the following steps: calculation of the sequential climatological and irrigation water balance to obtain the blades, calculation of productivity (Y) in the DSSAT program, calculation of BCS and TA using the Verra – VM0042 methodology. The results were compared using the ANOVA and Tukey tests, both at 5% significance. As a result, it was observed that treatments 1 and 2 (SI and 45%ETC) did not differ in yield and rate of soil carbon accumulation among themselves, demonstrating maintenance and decrease of C in the initial soil stock for CAR1 and CAR2, respectively. Treatments 3 and 4 (75%ETC and 100%ETC) also did not differ from each other and resulted in C accumulation in the soil for both locations. Treatment 5 (110%ETC) differed from all the others, with the highest rate of C accumulation for the two coordinates. It can be stated that the soybean production system carried out in most of the western region of Bahia does not guarantee the sustainability of organic matter, and may contribute to its removal and, consequently, to the increase of the greenhouse effect, however analysis between treatments showed that the use of irrigation is capable of increasing soil C if it is ensured that the depths are applied from 75% of the potential water requirement of the crop (75% ETC).

Keywords: Greenhouse effect, Soil organic carbon stock, Irrigation, *Glycine max* L., Soybean grain yield, Modelling

ARTIGO 1 - PEGADA DE CARBONO DA PRODUÇÃO DE SOJA (*Glycine max* L.) NA FRONTEIRA AGRÍCOLA BRASILEIRA – MATOPIBA CERRADO

Resumo

A agricultura contribui significativamente para o aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. As estimativas de emissões de GEE, bem como a pegada de carbono das commodities agrícolas ainda são incipientes nas fronteiras agrícolas brasileiras, especialmente na região do bioma Cerrado denominada MATOPIBA (ou seja, referente aos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). Nosso estudo objetiva quantificar as emissões de GEE e a pegada de carbono da produção de soja em um sistema de cultivo convencional usando a metodologia VCS Standard (verra.org/) para quantificar as emissões de GEE considerando diferentes cenários de produção da região oeste da Bahia no Brasil. Para isso, foram gerados cinco diferentes cenários de produção com as variáveis: produtividade da soja combinada com atributos físico-químicos dos principais tipos de solo encontrados na região. Nossos resultados mostraram que a emissão total de GEE não diferiu estatisticamente entre os cenários, resultando em uma média de 2,8 Mg CO₂eq ha⁻¹, sendo 47% como N₂O de N-fertilizante (direto e indireto) e fixação biológica, 29% de preparo do solo, 21% de cal e 3% de combustível fóssil. Além disso, foram encontradas correlações lineares entre as emissões de GEE e a produção de soja ($R^2=0,35$), em que cenários com maior produtividade apresentaram maiores emissões. Porém, no cenário C4 não seguiu esta tendência, devido às baixas taxas de aplicação de calcário e, portanto, quando desconsiderado da análise, o coeficiente de determinação aumentou 65% ($R^2=0,98$). A pegada de carbono apresentou diferença estatística entre o cenário C1 (menos produtivo) dos demais, enquanto os cenários C2 e C3 (produtividade mediana) diferiram do C4 e C5 (mais produtivos). Nesse sentido, a pegada de carbono foi inversamente proporcional à produtividade da soja, ou seja, a maior pegada de carbono foi relacionada à menor produtividade ($R^2=0,93$). Se, por um lado, as fontes de emissão (insumos) têm pouco impacto sobre o total de GEE emitido em diferentes cenários, por outro lado, a produtividade da soja atuou diretamente na redução da pegada de carbono da agricultura na região do oeste baiano. Os resultados deste estudo assumem maior importância considerando a preocupação e a urgência climática global (por exemplo, AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis de agosto de 2021), além de estarem alinhados com as políticas públicas brasileiras (por exemplo, Política RenovAgro, Floresta+ Agro, CPR-verde e a Regularização do Mercado Brasileiro de Carbono) na redução do impacto do agronegócio nas emissões de GEE e na mitigação das mudanças climáticas, aliada à segurança alimentar e à sustentabilidade.

Palavras-chave: 1. Pegada de carbono 2. Cenários de linha de base 3. lavoura convencional 4. *Glycine max* L.; 5. Mudanças climáticas; 6. Uso da terra.

ARTICLE 1 - CARBON FOOTPRINT OF SOYBEAN (*Glycine max* L.) PRODUCTION IN THE BRAZILIAN AGRICULTURE FRONTIER – MATOPIBA CERRADO

Abstract

Agriculture contributes significantly to the increase of greenhouse gases (GHG) to the atmosphere. Estimates GHG emissions, as well as the carbon footprint of agricultural commodities are still incipient in Brazilian agricultural frontiers, especially in the region of the Cerrado biome called MATOPIBA (i.e., referring to the states of Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia). Our study aim quantifies the GHG emissions and carbon footprint of soybean production in a conventional cultivation system using the VCS Standard methodology (verra.org/) for quantifying GHG emissions considering different production scenarios from the region of western Bahia in Brazil. To this, five different production scenarios were generated with the variables: soybean productivity combined with physical-chemical attributes of the main soil types found in the region. Our results showed that the total GHG emission did not differ statistically between the scenarios, resulting in an mean of 2.8 Mg CO₂e ha⁻¹, of which 47% as N₂O from N-fertilizer (direct and indirect) and biological fixation, 29% from soil tillage, 21% from lime and 3% from fossil fuel. In addition, linear correlations were found between GHG emissions and soybean production ($R^2=0.35$), in which scenarios with higher productivity presented highest emissions. However, in the scenario C4 did not follow this trend, due to the low lime application rates and, therefore, when disregarded from the analysis, the determination coefficient increased by 65% ($R^2=0.98$). The carbon footprint showed statistical difference between scenario C1 (less productive) from the others, while scenarios C2 and C3 (median productivity) differed from C4 and C5 (more productive). In this sense, carbon footprint was inversely proportional to soybean productivity, i.e., the highest carbon footprint was related to the lowest productivity ($R^2=0.93$). If, on the one hand, the emission sources (inputs) have little impact on the total GHG emitted from different scenarios, on the other hand, soybean yield acted directly on the carbon footprint reduction from the agriculture in the region of western Bahia. The results of this study take on greater importance considering the global climate concern and urgency (e.g., AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis of August 2021), as well as being aligned with Brazilian public policies (e.g., RenovAgro Policy, Floresta+Agro, CPR-verde and the Regularization of the Brazilian Carbon Market) in reducing the impact of agribusiness on GHG emissions and mitigating climate change, combined with food security and sustainability.

Keywords: 1. carbon footprint; 2. baseline scenarios; 3. conventional tillage; 4. *Glycine max* L.; 5. Climate change; 6. Land use.

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema da aplicação metodológica para cálculo de emissão dos gases e seus respectivos manejos considerados na agricultura convencional de soja do oeste baiano brasileiro..... 19

Figura 2. Áreas de unidade de conservação, áreas de terras indígenas e áreas de terras quilombolas no oeste..... 24

Figura 3. Municípios Produtores De Soja Do Oeste Baiano Utilizados Para O Agrupamento Em Zonas Homogêneas..... 25

Figura 4. Contribuição Das Emissões Nos Diferentes Estágios De Manejo Utilizados Para Cultura Da Soja No Oeste Baiano Brasileiro, Em Que: Cdef Representa A Emissão Da Queima Do Combustível Fóssil (S500), Cdesp Representa A Emissão Do Preparo Convencional De Solo, Cdel Representa A Emissão Do Calcário (Dolomítico), Noeff1 Representa A Emissão Do Nitrogênio Indireto; Noeff2 Representa A Emissão Da Fixação Biológica Da Soja E Noeff3 Representa A Emissão Do Fertilizante Sintético Aplicado (Ureia)..... 30

Figura 5. Relação Entre Produtividade Da Soja E Emissões Totais Dos Cenários De Linha De Base Na Totalidade Dos Cenários (C1 – C5) E Com A Exclusão Do Cenário C4..... 32

Lista de Tabelas

Tabela 1. Lista de informações utilizadas para definição dos cenários de linha de base do oeste baiano e suas respectivas fontes de dados. 19

Tabela 2. Fração de C_x e N_x nos componentes considerados e fatores de emissão padrões da literatura utilizados para cálculo de emissão no oeste baiano. 22

Tabela 3. Composição das zonas homogêneas de emissão do oeste baiano com os pontos médios amostrais que foram coletadas as informações edafoclimáticas na construção dos cenários..... 25

Tabela 4. Informações edafoclimáticas médias e produtividade média que geraram os cenários de linha de base do oeste baiano. 26

Tabela 5. Emissões totais e pegada de carbono nos cenários de linha base do oeste baiano brasileiro. 26

Tabela 6. Emissões parciais e totais dos municípios que compõem cada cenário de linha de base na região do oeste baiano brasileiro. 27

Lista de Abreviaturas e Siglas

GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FAO	Food and Agriculture Organization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
GWP	Global Warm Potential
VCU	Verified Carbon Unit
ET	Energy Transmission
REDD+	Redução das Emissões de Desmatamento e Degradação Florestal
ARR	Afforestation, Reforestation and Revegetation
BC	Blue Carbon
ALM	Agriculture and Land Managment
UC	Unidade de Conservação
TI	Terras Indígenas
TQ	Terras Quilombolas
ELB	Emissão de linha de base
PCS	Pegada de Carbono da Soja
CDEFF	Dióxido de carbono emitido pela queima do combustível fóssil
CDEL	Dióxido de carbono emitido pela aplicação de calcário
NOEFF	Óxido nitroso emitido pelo manejo de nitrogênio no sistema
NOEFF1	Óxido nitroso emitido pelo manejo de nitrogênio indireto
NOEFF2	Óxido nitroso emitido pelo manejo de nitrogênio fixação
NOEFF3	Óxido nitroso emitido pelo manejo de nitrogênio direto
CDESP	Emissão de dióxido de carbono pela aração e gradagem
Mg. ha ⁻¹	Megagrama por hectare
ha	Hectare
Mg CO _{2eq} .ha ⁻¹	Megagrama de equivalência em dióxido de carbono por hectare
Mg CO _{2eq} .L ⁻¹	Megagrama de equivalência em dióxido de carbono por litro
Mg CO _{2eq} .Mgs ⁻¹	Megagrama de equivalência em dióxido de carbono por megagrama de soja produzida
sc.ha ⁻¹	Sacas por hectare
cmol _c .dm ⁻³	centimol de carga por decímetro cúbico
g.cm ⁻³	grama por decímetro cúbico
g.kg ⁻¹	grama por quilograma
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
mm	Mililitros

L Litros

Lista de Símbolos

C	Elemento carbono
N	Elemento nitrogênio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido Nitroso
C _x	Fração de carbono em diferentes moléculas
N _x	Fração de nitrogênio em diferentes moléculas
N-N ₂ O	Nitrogênio se transformando em óxido nitroso
N-NH ₃ -N ₂ O	Nitrogênio se transformando em amônia e, em seguida, óxido nitroso
Y	Produtividade
V	Saturação por bases
SOC _{stock}	Estoque de carbono do solo
CC	Conteúdo de argila do solo
pH	Poder hidrogeniônico da solução do solo
CTC	Capacidade de Troca Catiônica do solo
BD	Densidade do solo
CT	Tipo de clima
EFF	Emissão total da queima de combustível para maquinário de motor a quatro tempos
A	Área
FFC	Quantidade de diesel consumida
EFF _{FF}	Fator de emissão para diesel S500
EL	Emissão total da aplicação de calcário
M _{dolomite}	Quantidade de calcário dolomítico aplicado
EF _{dolomite}	Fator de emissão do calcário dolomítico
N ₂ O _{fert}	Emissão de óxido nitroso decorrente do uso de fertilizantes nitrogenados
NOEFF _{direct}	Emissão direta de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes
NOEFF _{indirect}	Emissão indireta de óxido nitroso devido ao N total do sistema
FSN	Quantidade de N proveniente do fertilizante sintético aplicado (ureia)
EF _{Ndirect}	Fator de emissão a ureia

M	Quantidade de ureia aplicada
NC_{SF}	Fração de N na molécula de ureia
$N2O_{FERTvolat}$	Emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da volatilização e acúmulo atmosférico
$FRAC_{GASF}$	Fração de N sintético adicionado aos solos que volatiliza como NH_3 e NO_x
EF_{Nvolat}	Fator de emissão da volatilização da ureia
FCR	Quantidade de N em espécies fixadoras devolvidas aos solos
MB	Matéria seca anual aporta ao solo
$N_{content}$	Fração de N na matéria seca anual aportada

1. Introdução

Em 2018, o total mundial das emissões da agropecuária e das áreas relacionadas ao uso da terra atingiram 9,30 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente ($Gt CO_{2eq}$). As atividades agrícolas e pecuárias dentro do portão da fazenda geraram mais da metade deste total (5,30 $Gt CO_{2eq}$), com uso da terra e atividades de mudança de uso do solo responsáveis por quase 4,00 $Gt CO_{2eq}$. Em termos de total de emissão da agropecuária, o Brasil se destacou como maior emissor de gases do mundo, com aproximadamente 1,20 $Gt CO_{2eq}$ (FAO, 2021).

Uma das principais causas das elevadas emissões brasileiras foram as grandes extensões produtivas e a abertura de novas fronteiras agrícolas. Esta expansão ocorreu, principalmente, nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia e foi definida como MATOPIBA (SANTOS et al., 2021). Em sua quase totalidade, estas áreas são compostas por bioma Cerrado e se destacaram com 12% da produção de soja do país na safra 2019/2020 (CONAB, 2020), com emissão de, aproximadamente, $5,82 \cdot 10^{-11} Gt CO_{2eq}$ (BRASIL, 2021). A Bahia se destacou como maior emissor do MATOPIBA com $2,16 \cdot 10^{-11} Gt CO_{2eq}$ (BRASIL, 2021).

Em vista de cenários globais de aumento populacional e mudanças climáticas (FAO, 2017), as áreas do MATOPIBA sofreram pressões diretas pelo aumento de produção de alimentos. O manejo agrícola desenfreado, bem como abertura de novas áreas, causou conflitos entre a segurança alimentar e a agricultura sustentável (RAMANKUTTY et al., 2018). A gestão dos solos do Cerrado, dos insumos aplicados e dos resíduos culturais foram expostos ao aumento de emissão de gases de efeito estufa (GEE). Estes diminuiriam diretamente a capacidade do solo como fonte de sumidouro de CO_2 , reduzindo sua quantidade de matéria orgânica (MOS), aumentando seu nível de degradação e, em casos mais severos, promovendo o efluxo dos gases CO_2 , N_2O e CH_4 para atmosfera (ALONSO, 2007).

Contudo, uma forma de mitigar este efeito surgiu da participação de programas mundiais de ações climáticas e desenvolvimento sustentável, em que se destacam, para agropecuária, os projetos de geração de crédito de carbono. Este pode ser definido como uma iniciativa de redução ou remoção de GEE com uso de novas tecnologias, intensificação dos sistemas produtivos, reflorestamento ou conservação de florestas para garantir sistemas agropecuários regenerativos e a obtenção do crédito de carbono como ativo (PAIVA et al., 2015).

Segundo a organização não governamental Verra (verra.org/) pode-se definir uma unidade de crédito de carbono como uma representação da redução/remoção de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente que um sistema sustentável deixou de emitir. Desde que ele seja produzido nos projetos de intensificação de sistema, verificado por monitoramentos periódicos, emitidos e transacionados no mercado voluntário ou regulado de carbono, é tido como um ativo financeiro e transferível. Cada unidade gerada, quando adquirida, possui a função de neutralizar as emissões dos diferentes setores anualmente, em que podem ser comercializadas para qualquer empresa que almeje alcançar mecanismos de desenvolvimento limpo.

Por ser classificado como “ativo não-tangível”, inibir incertezas quanto à existência do crédito se tornou obrigatório dentro do mercado. Pesquisas e metodologias de metrificação para carbono se tornaram indispensáveis em todas as etapas do sistema produtivo que está inserido. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), organização científica criada em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), se evidencia neste aspecto, em que seu principal objetivo é avaliar, gerar conhecimento e indicar possíveis estratégias de mitigação de mudanças climáticas.

Como contribuição significativa para geração de GEE, a publicação “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse gas inventories” (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>) entregou, desde 2006, procedimentos metodológicos e fatores de emissão genéricos para quantificar as emissões totais de diferentes áreas de atuação. O documento foi abastecido com cinco volumes, sendo um guia e quatro procedimentos de metrificação, os quais forneceram mecanismos para avaliar: (1) emissão gerada pelo uso de energia elétrica, (2) emissão gerada pelo processo industrial e uso de produtos, (3) emissões geradas pela agricultura, silvicultura e outros usos da terra e (4) emissões geradas pelo desperdício. Este guia está inserido em diversos programas de inventário de GEE, como por exemplo o Programa Brasileiro GHG Protocol (<https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>), desenvolvido pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (FGVces) e World Resource Institute

(WRI) em parceria com o Ministério do Meio Ambiente e outras 27 empresas para contabilizar as emissões anuais brasileiras nos diferentes setores.

Mesmo com o IPCC garantindo subsídio científico para geração de crédito, seu principal foco não está no abastecimento do mercado com créditos. Isto assegurou espaço para outros programas, os quais desfrutaram diretamente ou indiretamente dos valores fornecido pela instituição de pesquisa. Os programas de maior relevância são liderados pela organização não-governamental Verra (verra.org/) criada em 2007 por líderes ambientais e empresariais. Seu papel é de definir e guiar os principais padrões mundiais para ações climáticas com a redução e/ou remoção de gases GEE da atmosfera. Além disso, através do documento *Methodology Requirements* de 2022 (https://verra.org/wp-content/uploads/2023/04/VCS-Methodology-Requirements_v4.1.pdf) da própria ONG, o Verra também garante espaço ativo e com critérios rígidos na criação de metodologias atualizadas e novas tecnologias de amostragem de carbono por parte dos desenvolvedores. A possibilidade de escolha de diferentes abordagens de cálculo para inventário de GEE, em que cada metodologia aprovada permite o uso de fatores referência (tal qual IPCC), garantiu com que a instituição se tornasse o maior gerador de crédito de carbono no mercado voluntário.

Dentre os seus programas, destaca-se a iniciativa *Verified Carbon Standard (VCS)* que permite aos proponentes atuarem nos setores de energia renovável, conservação e restauração de florestas e mangues e melhorias na eficiência agropecuária. Comumente são conhecidos como, respectivamente: *Energy Transition (ET)*, *Reducing Emission from Deforestation (REDD+)*, *Afforestation, Reforestation and Revegetation (ARR)*, *Blue Carbon (BC; manguês)* e *Agriculture Land Management (ALM)*. Desde o lançamento do VCS em 2006, o programa se tornou o maior do mundo em permanência, com mais de 2050 projetos vigentes e expedição total de 1,50 bilhões de unidades de carbono verificados (*verified carbon unit – VCU*) em diferentes países.

Mesmo assim, os projetos VCS para agropecuária (ALM) ainda são incipientes. Até julho de 2023, a plataforma registrou um total de 82 projetos com o uso da metodologia focada em melhoria de manejo (VM0042). Um dos fatores da baixa adesão são os rigorosos critérios metodológicos prescritos pelo programa, em que existe a necessidade de as áreas passarem por critérios de elegibilidade, determinação de um contexto regional único para atividades (cenário de linha de base), proposta de melhoria de manejo (plano de ação), quantificação dos gases de efeito estufa antes e depois das implementações de campo (emissões ex-ante e ex-post), aferição estatística de dados e monitoramentos recorrentes. Para formalização destas etapas, os processos requerem um corpo técnico especializado, reduzindo diretamente a difusão e adesão do programa VCS para o setor.

No Brasil, apenas um projeto VCS foi registrado na plataforma Verra até a junho de 2023. Seu principal objetivo foi de intensificar a agropecuária convencional brasileira para sistemas de rotação de culturas, plantio direto, integração de lavoura-pecuária-floresta, pousio do solo, proteção de áreas impróprias, reflorestamento das unidades de conservação e estabilização de voçorocas. As regiões de atuação descritas foram Sul, Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste, com foco nas culturas da soja, café, milho, arroz, feijão, algodão e sistema de criação de pecuárias de corte, dando início no município de Cassiolândia (MS). Como resultado de remoção de gases GEE em 30 anos, o projeto espera remover 1,61 Mg de CO_{2eq}.ha⁻¹ via solo em 414 milhões de hectares de extensão.

Apesar da proposta de projeto demonstrar elevado empenho e ampla gama de sistemas produtivos, a manutenção da escalabilidade está diretamente atrelada ao consenso e engajamento dos proprietários da terra via contrato. Isto requer processos bem definidos de salvaguardas, em que os direitos legais e a atuação colaborativa talvez não sejam atendidas de forma padronizada para extensão territorial de um país. Existem dificuldades de manter apenas um mecanismo de trabalho colaborativo para regiões com muitas diferenças culturais, uma vez que o projeto submetido é uma projeção dos 30 anos que requer adesão de novas instâncias a cada ano subsequente e monitoramento de 5 em 5 anos para comprovação da efetividade de ganhos ambientais. Desta forma, tal qual a publicação do jornal internacional *The Guardian*, na matéria escrita por Patrick Greenfield de 18 de janeiro de 2023 (<https://www.theguardian.com/environment/2023/jan/18/revealed-forest-carbon-offsets-biggest-provider-worthless-verra-aoe>), muito se questiona sobre a coerência de projetos desta magnitude, colocando em pauta a veracidade da adesão de parceiros e estremecendo o mercado econômico ao redor do crédito de carbono.

No contexto brasileiro, as organizações EMBRAPA, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Conab, Agência Nacional de Águas e MAPBiomás, quando fundidos com metodologias de cálculo de emissão de GEE, já são capazes de fornecer informações necessárias para determinação de cenários emissivos em diferentes sistemas produtivos. Embora incipientes, as novas fronteiras agrícolas brasileiras, como o caso do MATOPIBA, já possuem caracterização nas principais bases de pesquisa brasileiras, como mapeamento da atividade agropecuária local, a determinação das zonas produtivas, das condições edafoclimáticas e a extensão territorial. Estudos que demonstraram as características dos solos do bioma Cerrado naturalmente ácidos pela constituição do material de origem e do elevado processo de intemperismo (FAGERIA e GHEYI, 1999; SILVEIRA et al., 2000), que as lavouras são amplamente dependentes da quantidade da matéria orgânica para constituir sua carga negativa de 75 a 85% da capacidade de troca de cátions (CTC) (OORTS et al., 2003; SILVA e RESCK, 1997), que o estoque de carbono (SOC_{stock}) é

associado ao sistema de manejo adotado (SIQUEIRA-NETO et al., 2022) e que a pegada de carbono da atividade está diretamente atrelada a eficiência do sistema (ESCOBAR et al., 2020) também são uma realidade pouco explorada para estabelecer zonas homogêneas. Na atual conjuntura, trabalhos que definem os cenários de linha de base das atividades agrícolas e quantificam suas emissões se tornam relevantes para dar subsídio técnico aos futuros projetos com enfoque na redução de emissão de carbono, sobretudo nas fronteiras agrícolas emergentes do país.

Se faz necessário agrupar características produtivas, edáficas e climáticas do MATOPIBA, em nível de semelhança, para geração dos diferentes cenários produtivos e obtenção dos valores mais apurados dos potenciais poluentes. Desta forma, a fim de dar subsídio para agricultura regenerativa, a hipótese do presente estudo é que os diferentes cenários comuns de produção convencional de soja da região do MATOPIBA, especificamente localizados no oeste baiano, possuem total de emissões e pegada de carbono diferente entre si. Este estudo teve como objetivo quantificar e comparar, entre cenários, ambas as variáveis com uso da metodologia Verra – Verified Carbon Standard (VCS) VM0042.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A região de estudo está localizada no oeste baiano, o qual faz parte do Planalto Ocidental da depressão são franciscana e é uma das componentes da fronteira agrícola Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA). O oeste baiano localiza-se entre as latitudes 9° 24' S–12° 43' S, com altitude média superior a 850 m, área territorial de 116,80 mil km², bioma local unicamente Cerrado e tipo de solo predominante de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (IBGE, 2023). Sua característica é de clima tropical de savana (Aw) em todo território, com estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é de, aproximadamente, 850 mm anuais (INMET, 2023).

2.2 Criação dos cenários de linha de base

Anteriormente ao processo de geração de cenários de linha de bases foram geradas zonas homogêneas de produção de soja no oeste baiano. Para isto, foi realizado um pré-tratamento geoespacial na região que consistiu na remoção das áreas não agrícolas de: unidade de conservação (UC), terras indígenas (TI) e terras quilombolas (TQ) nos municípios Produtores de soja com uso

do software QGis versão 3.22. Foram feitas intersecções com dados poligonais (formato raster) de produção de soja com os dados poligonais de UC, TI e TQ através da ferramenta de geoprocessamento “intersect” do próprio programa para mantença apenas de municípios produtores de soja que não conflitavam com áreas de preservação. Todos os arquivos estavam georreferenciados no sistema de coordenada SIRGAS 2000 (EPSG:4674). Ao todo, foram selecionados 17 municípios com área total de produção de 1,60 milhões de hectares. Os arquivos poligonais de produtividade foram obtidos da média de 2017 - 2019 do Research Group on Atmosphere-Biosphere Interaction (Tabela 1) e os arquivos polígonos de UC, TI e TQ foram obtidos do acervo digital de uso e cobertura do solo do MAPbiomas (2023) para o ano de 2019 nas unidades $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e hectare (ha), respectivamente.

Após a retirada das áreas não agrícolas dos municípios, foram criadas zonas homogêneas de produtividade de soja. O agrupamento dos municípios foi realizado com a classificação da produtividade média da cultura (Y) em 6 níveis categóricos: muito baixo (menor ou igual a $0,75 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), baixo (entre $0,75$ e $1,50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), médio baixo (entre $1,50$ e $2,25 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), médio alto (entre $1,50$ e $3,00 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), alto (entre $3,00$ e $3,75 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e muito alto (acima de $3,75 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) utilizando o software QGis versão 3.22.

Por zona homogênea foram incluídas características edafoclimáticas de: saturação por base (V; %), capacidade de troca catiônica (CTC, $\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$), pH (adimensional), teor de argila (CC, %), estoque de carbono orgânico do solo ($\text{SOC}_{\text{stock}}$, $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$), densidade do solo (BD, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) e tipo de clima (CT). Quando houve a união das zonas homogêneas de produção de soja com as características edafoclimáticas, as categorias passaram a ser nomeadas como cenários de linha de base. As variáveis químicas e físicas de solo foram adquiridas à 0,30 m de profundidade com a média dos pontos amostrais encontrados no Banco de Dados de Informações Ambientais do IBGE (2023) de cada município produtor de soja (tabela 1).

Tabela 1 – Lista de informações utilizadas para definição dos cenários de linha de base do oeste baiano e suas respectivas fontes de dados.

Variável	Grandeza	Referência
Y	Mg.ha ⁻¹	* http://obahia.dea.ufv.br/documents/393/metadata_detail
Tipo de solo	-	
pH (H ₂ O)	adimensional	** https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia
V	%	
CTC	cmol _c .dm ⁻³	
SOC _{stock} (0,30m)	Mg.ha ⁻¹	*** https://soilgrids.org/
BD	g.cm ⁻³	
CC (0,30 m)	%	**** http://geoinfo.cnps.embrapa.br/maps/3290
Tipo de clima	-	ALVARES et al., (2013)

As siglas representam as variáveis: produtividade (Y), saturação por bases (V), capacidade de troca catiônica (CTC), estoque de carbono no solo (SOC_{stock}), densidade do solo (BD) e conteúdo de argila (CC). *Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Agrícola; **Banco de dados de Informações Ambientais – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);***ISRIC World Soil Information - Soilgrids; ****Plataforma GeoInfo – EMBRAPA Solos.

Adotou-se que as médias das variáveis produtividade (Y), pH, tipo de clima (CT), V, CTC, SOC_{stock}, BD e CC agrupadas foram os possíveis cenários de linha de base, totalizando até 6 diferentes cenários. Estes foram submetidos a metodologia Verra – VM0042 para cálculo de emissão de linha de bases e, posteriormente, obtenção da média de emissão total de carbono equivalente (ELB; Mg CO_{2eq}.ha⁻¹) e a pegada de carbono da soja na região (PCS; Mg CO_{2eq}.Mg de soja⁻¹)

2.3 Cálculo das emissões de GEE por cenário de linha de base

Para obtenção das emissões por cenário de linha de base foi utilizada a metodologia Verra - VM0042 (verra.org/) com aplicação de valores padrões para cálculo de emissão de gases de efeito estufa no sistema de soja convencional (abordagem de cálculo número 3) (figura 1).

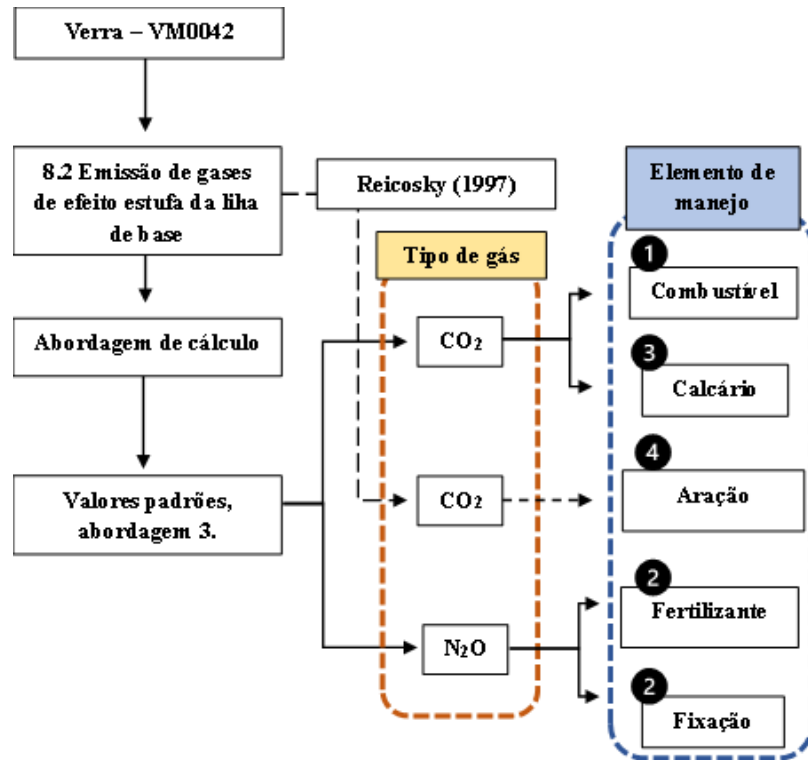


Figura 1 - Esquema da aplicação metodológica para cálculo de emissão dos gases e seus respectivos manejos considerados na agricultura convencional de soja do oeste baiano brasileiro.

Foram selecionados, com uso da própria metodologia, os manejos de relevância para emissão de gases na produção de soja. As equações para emissão dos gases CO_2 e N_2O foram aplicados individualmente para cada um dos 17 municípios. Os tipos de manejo considerados foram (1) emissão de dióxido de carbono provenientes da combustão de combustíveis fósseis (CDEFF), (2) emissão de dióxido de carbono proveniente da calagem (CDEL) e (3) emissão de dióxido nitroso proveniente de fertilizantes nitrogenados e espécies fixadoras (NOEFF), conforme as equações abaixo:

1. Dióxido de carbono emitido da queima do combustível fóssil (CDEFF):

$$CDEFF_{bsl,i,j} = \frac{\sum_{j=1}^j EFF_{bsl,i,j}}{A}$$

Equação 1

Em que: $CDEFF_{bsl,i,j}$ é a emissão de dióxido de carbono total da queima do combustível fóssil no ano ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$); $EFF_{bsl,i,j}$ é a emissão de dióxido de carbono da queima do combustível fóssil em maquinário de motor a combustão quatro tempos ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$); A é a área de utilização do maquinário (ha); j é o tipo de combustível (diesel) e i unidade amostral (ha).

$$EFF_{bsl,i,j} = FFC_{bsl,j,t} * EF_{FF_{bsl}}$$

Equação 2

Em que: $EFF_{bsl,i,j}$ é a emissão de dióxido de carbono da queima do combustível fóssil em maquinário de motor a combustão quatro tempos ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}.ano^{-1}$); $FFC_{bsl,j,i,t}$ é o diesel consumido ($L.ha^{-1}$); $EF_{FF_{bsl}}$ é o fator de emissão de diesel ($Mg\ CO_{2eq}.L^{-1}$); j é o tipo de combustível e t o período (ano).

2. Dióxido de carbono emitido do uso de calcário (CDEL):

$$CDEL = \frac{EL_{bsl,i,t}}{A}$$

Equação 3

Em que: CDEL é a quantidade de dióxido de carbono emitido pela aplicação do calcário ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$) em área total; $EL_{bsl,i,j}$ é a quantidade de dióxido de carbono emitido da aplicação do calcário ($Mg\ CO_{2eq}$); A é a área (ha); j é o tipo de calcário; i é a unidade amostral (ha) e t o período (ano).

$$EL_{bsl,i,t} = (M_{dolomite,bsl,i} * EF_{dolomite,bsl}) * \frac{44}{12}$$

Equação 4

Em que: $EL_{bsl,i,t}$ é a quantidade de dióxido de carbono emitido da aplicação do calcário ($Mg\ CO_{2eq}$); $M_{dolomite,bsl,i}$ é a quantidade de calcário dolomítico aplicado ($Mg.ha^{-1}$) e $EF_{dolomite,bsl}$ é o fator de emissão de dióxido de carbono do carbonato contido no calcário dolomítico (%).

3. Dióxido de carbono emitido da aplicação de fertilizantes e plantas fixadoras de N (NOEFF):

$$NOEFF = N2O_{fertbsl,i,t} + N2O_{Nfixbsl,i,t}$$

Equação 5

Em que: NOEFF é a emissão de óxido nitroso decorrente das entradas de nitrogênio no solo no ano ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); $N2O_{fertbsl,i,t}$ é a emissão de óxido nitroso decorrente do uso de fertilizantes nitrogenados ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); $N2O_{Nfixbsl,i,t}$ é a emissão de óxido nitroso decorrente

do uso de espécie de plantas fixadoras de nitrogênio ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$); i unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

$$N2O_{fertbsl,i,t} = NOEFF_{direct,i,t} + NOEFF_{indirect,i,t}$$

Equação 6

Em que: $N2O_{fertbsl,i,t}$ é a emissão de óxido nitroso decorrente do uso de fertilizantes nitrogenados ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$); $NOEFF_{direct,i,t}$ é a emissões diretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes na linha de base ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$); $NOEFF_{indirect,i,t}$ é a emissão indireta de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes na linha de base ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$); i é a unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

$$NOEFF_{direct,i,t} = \frac{[(FSN_{bsl,i,t}) * EF_{Ndirect,bsl} * \frac{44}{28} * GWP_{N2O}]}{A}$$

Equação 7

Em que: $NOEFF_{direct,i,t}$ é a emissão total de óxido nitroso decorrente do uso de fertilizantes nitrogenados ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$); $FSN_{bsl,i,t}$ é quantidade aplicada de N do fertilizante nitrogenado sintético na agricultura no ano (Mg de N); $EF_{Ndirect,bsl}$ é o fator de emissão do fertilizante nitrogenado (%); GWP_{N2O} é fator de conversão para carbono equivalente (273); A é a área; i é a unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

$$FSN_{bsl,i,t} = \sum_{SF} M_{bsl,i,t} * NC_{SF}$$

Equação 8

Em que: $FSN_{bsl,i,t}$ é aplicação de fertilizante nitrogenado na agricultura no ano (t); $M_{bsl,SF,i,t}$ é a quantidade de fertilizante sintético (Mg); NC_{SF} teor de N do fertilizante sintético (%); i é a unidade amostral (ha) e t é o tempo (ano).

$$NOEFF_{indirect,i,t} = \frac{N2O_{fertbsl,volat,i,t}}{A}$$

Equação 9

Em que: $NOEFF_{indirect,i,t}$ são as emissões indiretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes sintético ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$); $N2O_{fertbsl,volat,i,t}$ são as emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da volatilização e acúmulo atmosférico ($\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$); A é a área de aplicação (ha); i é a unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

$$N2O_{fertbsl, volat, i, t} = \left[(FSN_{bsl, i, t} * FRAC_{GASF, bsl}) * EF_{Nvolat} * \frac{44}{28} * GWP_{N2O} \right]$$

Equação 10

Em que: $N2O_{fertbsl, volat, i, t}$ emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da volatilização e acúmulo atmosférico ($Mg CO_{2eq} \cdot ha^{-1}$); $FSN_{bsl, i, t}$ é aplicação de fertilizante nitrogenado (Mg); $FRAC_{GASF, bsl}$ é a fração de N sintético adicionado aos solos que volatiliza como NH_3 e NO_x (adimensional); EF_{Nvolat} é o fator de emissão para óxido nitroso em solos e superfícies de água (%); GWP_{N2O} potencial de aquecimento global para N_2O (273); i unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

$$NOEFF_{fix, i, t} = \frac{FCR_{bsl, i, t} * EF_{Ndirect} * \frac{44}{28} * GWP_{N2O}}{A}$$

Equação 11

Em que: $NOEFF_{fix, bsl, i, t}$ é a emissões de óxido nitroso devido ao uso de espécies fixadoras de N ($Mg CO_{2eq} \cdot ha^{-1}$); $FCR_{bsl, i, t}$ quantidade de N em espécies fixadoras devolvidas aos solos ($Mg N$); $EF_{Ndirect}$ fator de emissão de óxido nitroso para aplicação de fertilizante sintéticos (%); GWP_{N2O} é o potencial de aquecimento global para N_2O ; A é a área; i é a unidade amostral (ha); t é o período (ano).

$$FCR_{bsl, i, t} = \sum_{g=1}^G MB_{g, bsl, i, t} * N_{content, bsl}$$

Equação 12

Em que: $FCR_{bsl, i, t}$ quantidade de N em espécies fixadoras devolvidas aos solos ($t N$); $MB_{g, bsl, i, t}$ é a matéria seca anual, incluindo acima e abaixo do solo, de espécies fixadoras (t); $N_{content, bsl}$ é a fração de N na matéria seca da planta fixadora (%); g é o tipo de espécie fixadora de N; i é a unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

Dado que o sistema de manejo aplicado foi o cultivo convencional de soja, também foi inserido a emissão decorrente da aração e gradagem de solo (4; CDESP) de Reicosky (1997) no valor fixado de $0,81 Mg CO_{2eq} \cdot ha^{-1}$. Para cada tipo de manejo foi utilizado a fração de C_x e N_x por insumo e os fatores de emissão padrões encontrados na literatura (tabela 2). As siglas CDEFF, CDEL, NOEFF e CDESP, representaram o valor da emissão de cada manejo por cenário. Apenas NOEFF foi subdividida em NOEFF1, NOEFF2 e NOEFF3 para representar a emissão do N_2O indireto (após volatilização do N total), emissão da fixação biológica e emissão do fertilizante direto aplicado, respectivamente.

Tabela 2 - Fração de C_x e N_x nos componentes considerados e fatores de emissão padrões da literatura utilizados para cálculo de emissão no oeste baiano.

Frações de C_x e N_x	Valor	Grandeza	Equações	Fonte
NC_{SF}	45	%	Eq. 8 – NOEFF	IAC (2014)
$FRAC_{GASF,bsl}$	50	%	Eq. 10 – NOEFF	Tasca et al., (2011)
$N_{content,bsl}$	15	%	Eq. 12 - NOEFF	Hungria et al., (2001)

Fator de emissão	Valor	Grandeza	Equações	Fonte
$EF_{FF,bsl}$	0,00267	Mg $CO_{2eq}\cdot L^{-1}$	Eq. 2 – CDEFF	IPCC (2006)
$EF_{Dolomite,bsl}$	13	%	Eq. 4 – CDEL	IPCC (2006)
$EF_{Ndirect,bsl}$	1	%	Eq. 7 – NOEFF	IPCC (2006)
EF_{Nvolat}	10	%	Eq. 10 - NOEFF	IPCC (2006)

NC_{SF} é a fração de N na ureia; $FRAC_{GASF,bsl}$ é a fração de N-NH₃ perdida por volatilização; $N_{content,bsl}$ é a fração de N na matéria seca da soja; $EF_{FF,bsl}$ é o fator de emissão da queima de combustível fóssil; $EF_{Dolomite,bsl}$ é o fator de emissão do carbonato contido no calcário dolomítico; $EF_{Ndirect,bsl}$ é o fator de emissão direto do N₂O-N; $EF_{Nvolat,bsl}$ é o fator de emissão do N₂O-N do total volatilizado.

As quantidades de insumos utilizados foram padronizadas em função de um hectare, em que cada cenário recebeu um valor de: combustível fóssil consumido (FFC_{bsl}), aplicação de calcário ($M_{dolomite,bsl}$) e aplicação de fertilizante nitrogenado (FSN_{bsl}). A quantidade de combustível consumida (FFC_{bsl}) na produção foi fixada para todos os cenários no valor de 40 L.ha⁻¹ de diesel S500 (EMBRAPA, 2021). O mesmo foi feito para quantidade de fertilizante, em que foi utilizado apenas a fonte sintética (FSN_{bsl}) de 0,05 Mg.ha⁻¹ de ureia. Para quantidade de calcário ($M_{dolomite,bsl}$) foi utilizada apenas a fonte calcário dolomítico e foi calculada segundo a metodologia de elevação de da saturação de bases (ALONSO, 1969) para cada município. Em todos os insumos assumiu-se que não houve perda por lixiviação e a fração da ureia volatilizada foi ajustada para 50% em função da temperatura média da região (TASCA et al., 2011).

Após a aplicação das equações, os resultados de emissão por tipo de manejo foram convertidos para Mg $CO_{2eq}\cdot ha^{-1}$ com o GWP 2021 (IPCC, 2021). Realizou-se o somatório de emissão dos tipos de manejo e obteve-se a emissão de linha de base total dos cenários (ELB; Mg $CO_{2eq}\cdot ha^{-1}$). O valor de emissão encontrado, por cenário, foi dividido pela sua produtividade média e obteve-se a pegada de emissão da soja (PCS; Mg $CO_{2eq}\cdot Mg$ de soja⁻¹).

2.4 Análise Estatística

Os resultados de emissões de linha de base total (ELB) e a pegada de carbono total (PCS) foram submetidas a análise de variância (ANOVA; $p=0,05$) entre cenários. Em seguida, as variáveis

com diferença estatística foram comparadas pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Todas as análises foram executadas usando o software RStudio versão R 3.3.0+.

3. RESULTADOS

3.1 Criação dos cenários de linha de base

Como resultado do pré-tratamento observou-se que o somatório de áreas não elegíveis para produção de soja nos 17 municípios foi de 1,72 milhões de hectares, com 97,00% destinada a unidades de conservação, 0,22% para terras indígenas 2,78% para terras quilombolas. As cidades de Cocos, Formosa do Rio Preto, Santa Rida de Cássia, Barreiras, Luís Eduardo Magalhães e Jaborandi se destacaram com a totalidade de áreas de unidades de conservação, com valor de 1,67 milhões de ha. Os municípios de Cariranha, Sítio do Mato e Muquém de São Francisco possuíram a totalidade de áreas destinadas para terras quilombolas, com valor aproximado de 51,74 mil ha. O total de áreas de terras indígenas ocorreu nos municípios de Muquém de São Francisco e Serra do Ramalho, com área aproximada de 3,90 mil ha (figura 2).

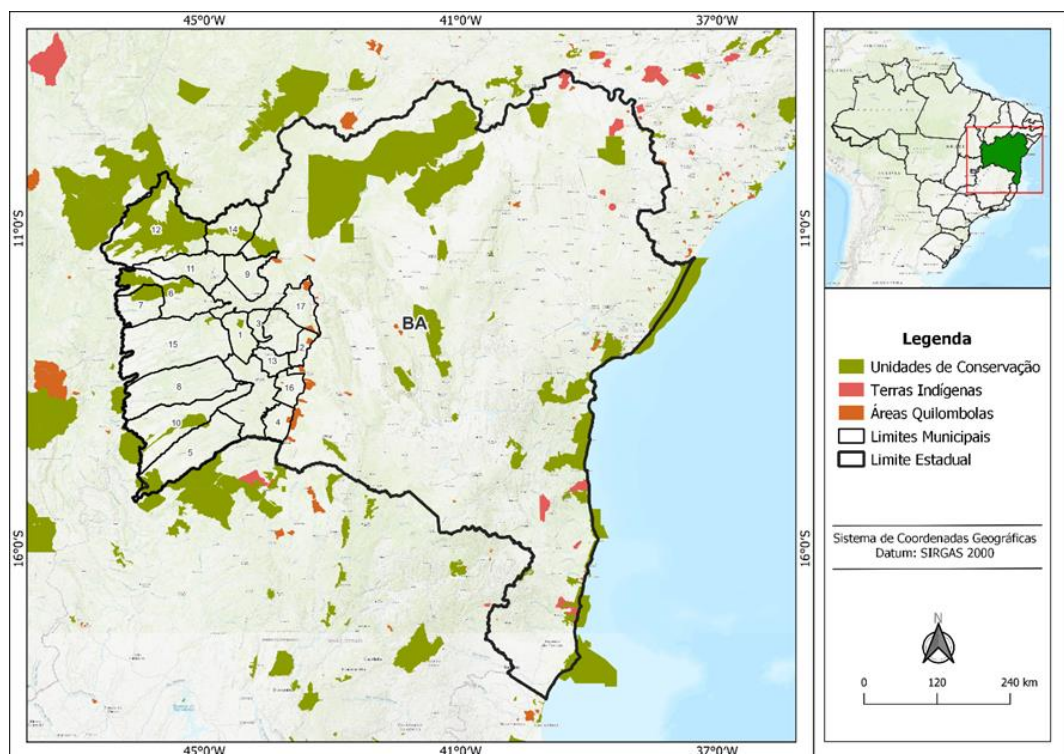


Figura 2 – Áreas de unidade de conservação, áreas de terras indígenas e áreas de terras quilombolas no oeste da Bahia.

Dentro da classificação dos municípios em zonas, apenas 5 níveis categóricos foram encontrados nos 17 municípios, sendo: muito baixo com 1 município, médio baixo com 1

município, médio alto com 2 municípios, alto com 9 municípios e muito alto com 4 municípios (Figura 3). Desta forma, totalizaram-se 5 zonas homogêneas de produção (Tabela 3).

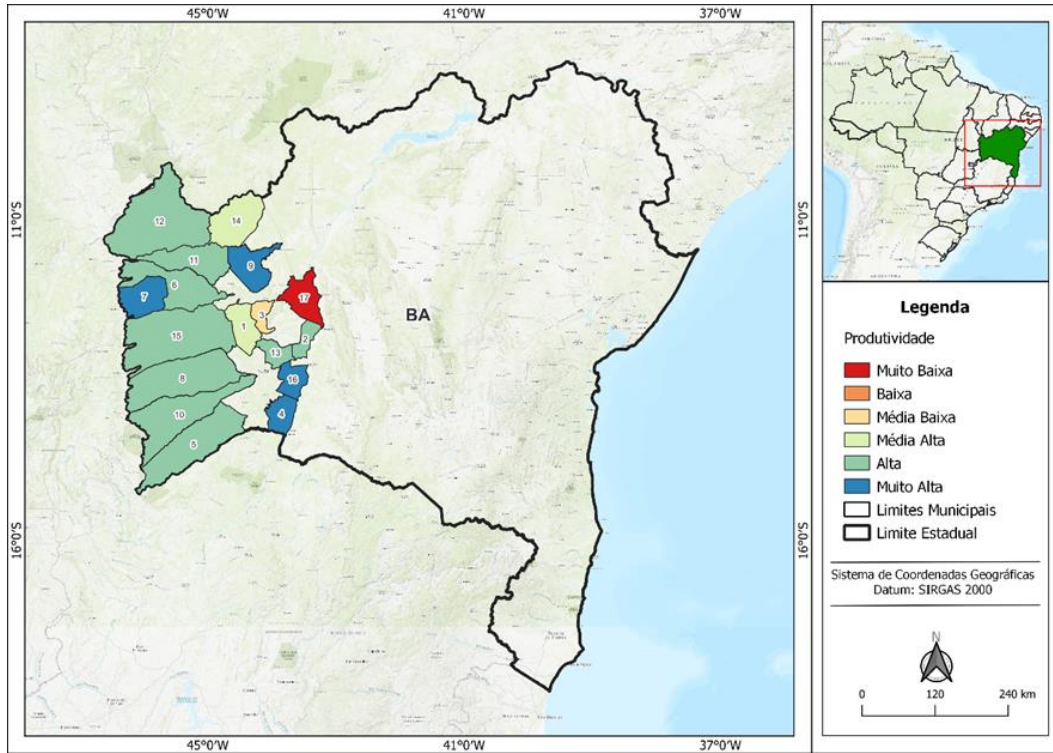


Figura 3 - Municípios produtores de soja do oeste baiano utilizados para o agrupamento em zonas homogêneas.

Com a caracterização edafoclimática das zonas, obteve-se 5 diferentes cenários de linha de base (Tabela 4). Notou-se que o teor de argila de todos foi classificado como “médio-argilosa” no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, com valor médio de, aproximadamente, 280 g.kg^{-1} . A variável CC apresentou desvio padrão (dp_{CC}) de $15,81 \text{ g.kg}^{-1}$ e coeficiente de variação (cv_{CC}) de 5,64%, não acusando elevada variabilidade. Os elementos pH, V, CTC apresentaram médias de 5,10, 28,25% e $6,32 \text{ cmol.c.dm}^{-3}$, respectivamente entre cenários, em que houve baixa dispersão dos dados com: $dp_{pH}=0,12$ ($cv_{pH}=2,52\%$), $dp_V=5,41\%$ ($cv_V=19,17\%$) e $dp_{CTC}=1,51 \text{ cmol.c.dm}^{-3}$ (23,84%). O carbono estocado no solo (SOC_{stock}) exibiu média de, aproximadamente, $37,44 \text{ Mg C.ha}^{-1}$ com $cv_{SOC_{stock}}=10,01\%$. A densidade do solo (BD) foi a que apresentou menor variabilidade entre cenários, com média de $1,39 \text{ g.cm}^{-3}$, $dp_{BD}=0,01 \text{ g.cm}^{-3}$ e $cv_{BD}=0,71\%$.

Tabela 3 – Composição das zonas homogêneas de emissão do oeste baiano com os pontos médios amostrais que foram coletadas as informações edafoclimáticas na construção dos cenários.

Zonas	Nível categórico de produção	Municípios
Zona 1	Muito baixa	Muquém de São Francisco
Zona 2	Médio baixa	Tabocas do Brejo Velho
Zona 3	Médio alta	Baianópolis, Santa Rita de Cássia
Zona 4	Alta	Sítio do Mato, Cocos, Barreiras, Correntina, Jaborandi, Riachão das Neves, Formosa do Rio Preto, Santana, São Desidério
Zona 5	Muito alta	Caririnha, Luís Eduardo Magalhães, Cotegipe

Zona 1, 2, 3, 4 e 5 representam as zonas homogêneas, as quais foram separadas pelo nível de produtividade. As zonas estão representadas por ordem decrescente de produtividade, sendo a menor Zona 1 e maior Zona 5.

Tabela 4 - Informações edafoclimáticas médias e produtividade média que geraram os cenários de linha de base do oeste baiano.

Cenário	Y	pH	CT	V	CTC	SOC _{stock}	BD	CC
	Mg.ha ⁻¹	H ₂ O	-	%	cmol _c .dm ⁻³	Mg.ha ⁻¹	g.cm ⁻³	g.kg ⁻¹
C1	0,45	4,90	Aw	35	8,82	40,00	1,40	300
C2	1,79	5,13	Aw	28,60	5,66	33,00	1,38	260
C3	2,69	5,10	Aw	23,80	5,60	34,00	1,40	270
C4	3,34	5,10	Aw	31,84	4,97	38,70	1,38	280
C5	3,94	5,26	Aw	22,01	6,53	41,50	1,39	290
Média	2,44	5,10	Aw	28,25	6,32	37,44	1,39	280

Valores das análises físico-químicas de solo obtidos até a profundidade de 0,30m. Y representa a produtividade; CT o tipo de clima, V a saturação por bases, CTC a capacidade de troca catiônica do solo, SOC_{stock} a quantidade de carbono estocado no solo; BD a densidade do solo e CC o teor de argila.

A variável produtividade (Y) exibiu média de 2,44 Mg.ha⁻¹ no cultivo convencional de soja da região, com desvio padrão menor do que a média ($dp_Y=1,36$ Mg.ha⁻¹). Entretanto, observou-se que a dispersão de Y foi a maior entre as variáveis ($cv_Y=55,90\%$), o que impactou diretamente na classificação das zonas homogêneas. Notou-se que os municípios classificados com “muito baixa” ou “baixa” (Muquém de São Francisco e Tabocas do Brejo Velho, respectivamente) reduziram a média de produtividade dos dados em 26,28% e justificou a divisão de cinco diferentes cenários.

3.2 Emissão de GEE por cenário de linha de base

As maiores emissões de GHG foram encontrados em C5 (3,21 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹), seguido de C3 (3,01 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹), C2 (2,75 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹), C1 (2,55 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹) e C4 (2,54 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹), com média de emissão entre cenários de 2,81 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ (Tabela 5). Não houve diferença estatística entre as emissões dos cenários nos intervalos de confiança p-valor=0,10, p-valor=0,05 e p-valor=0,01 (tabela 5).

Tabela 5 – Emissões totais e pegada de carbono nos cenários de linha base do oeste baiano brasileiro.

Cenário	ELB*	PCS
	Mg CO _{2eq} .ha ⁻¹	Mg CO _{2eq} .Mg soja ⁻¹
C1	2,55	5,66 a
C2	2,75	1,53 b
C3	3,01	1,13 b
C4	2,54	0,76 c
C5	3,21	0,82 c
C1	2,55	5,66 a
p-valor	0,24 ^{ns}	0,00
CV (%)	18,49	103

ELB* representa a emissão de linha de base nos cenários, em que não houve diferença estatística pela análise de variância (p-valor>0,10; p-valor>0,05; p-valor>0,01) e PCS representa a pegada de carbono para a cultura da soja no oeste da Bahia, em que houve diferença estatística pelo teste de Tukey (p-valor<0,05).

Em termos percentuais, NOEFF apresentou a maior parte das emissões com média de 47,18%, apontando que, aproximadamente, metade das emissões do manejo convencional de soja da região ocorreram na forma final do gás N-N₂O. Deste valor, as maiores perdas de N do sistema foram pela emissão indireta dos gases N-NH₃ e N-NO_x (NOEFF1=38,14%), fixação biológica N-N₂O (NOEFF2= 5,61%) e emissão direta dos fertilizantes N-N₂O (NOEFF3= 3,43%). Os outros 52,82% de emissões ocorreram na forma direta de CO₂, em que foram representados pelos componentes CDESP (28,91%), CDEL (20,50%) e CDEFF (3,42%).

Os municípios que apresentaram a maior e menor emissão total (tabel 6) foram Serra do Ramalho e Sítio do Mato com 4,30 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ e 2,01 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ com diferença de 46,70% entre eles, respectivamente. Os valores de V das análises de solo de Sítio do Mato (V=87%) e Correntina (V=83%) não justificaram o uso de calcário para correção do pH nos municípios, o que influenciou diretamente a média de emissões em C4. Quando retirando ambos os municípios do cenário, a média de emissões foi acrescida em 2,31% (de 2,54 para 2,60 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹), substituindo C4 por C1 no cenário de menor emissão.

Tabela 6 – Emissões parciais e totais dos municípios que compõem cada cenário de linha de base na região do oeste baiano brasileiro.

Municípios	Cenários	CDESP	CDEL	CDEFF	NOEFF _{direct}	NOEFF _{indirect}	NOEFF _{Fix}	NOEFF _{total}	ELB
Muquém de S. Francisco	C1	0,81	0,72	0,09	0,10	1,07	0,03	1,2	2,55
Tabocas do Brejo Velho	C2	0,81	0,82	0,09	0,10	1,07	0,12	1,29	2,75
Baianópolis	C3	0,81	0,82	0,09	0,10	1,07	0,19	1,36	3,09
St. Rita de Cássia	C3	0,81	0,97	0,09	0,10	1,07	0,16	1,33	2,94
Sítio do Mato	C4	0,81	0,00	0,09	0,10	1,07	0,20	1,37	2,01
Cocos	C4	0,81	0,49	0,09	0,10	1,07	0,21	1,38	2,51
Barreiras	C4	0,81	0,35	0,09	0,10	1,07	0,24	1,41	2,40
Correntina	C4	0,81	0,00	0,09	0,10	1,07	0,21	1,38	2,02
Jaborandi	C4	0,81	0,55	0,09	0,10	1,07	0,19	1,36	2,56
Riachão das Neves	C4	0,81	0,82	0,09	0,10	1,07	0,21	1,38	2,84
Formosa do Rio Preto	C4	0,81	1,05	0,09	0,10	1,07	0,23	1,40	3,08
Santana	C4	0,81	0,94	0,09	0,10	1,07	0,20	1,37	2,95
São Desidério	C4	0,81	0,40	0,09	0,10	1,07	0,23	1,40	2,44
Cariranha	C5	0,81	0,82	0,09	0,10	1,07	0,26	1,43	2,89
Luíś Eduardo Magalhães	C5	0,81	0,82	0,09	0,10	1,07	0,24	1,41	2,88

Cotegipe	C5	0,81	0,71	0,09	0,10	1,07	0,26	1,43	2,78
Serra do Ramalho	C5	0,81	2,25	0,09	0,10	1,07	0,25	1,42	4,30

C1, C2, C3, C4 e C5 representam os cenários de linha de base; CDESP representa a emissão do preparo convencional de solo; CDEL representa a emissão da aplicação de calcário dolomítico; CDEFF representa a emissão da queima do combustível S500; NOEFFdirect representa a emissão direta da ureia aplicada; NOEFFindirect representa a emissão indireta do N total aplicado; NOEFFfix representa a emissão da fixação biológica da soja; NOEFF representa o total de emissão de N₂O e ELb representa a emissão total da linha de base por município

A média de emissão do cenário C3 foi menor em 6,23% do que em C5 devido a quantidade de calcário dolomítico aplicado de 23,01% maior e produtividade menor em 31,20%. Desta forma, os valores de emissão total foram impactados em 0,20 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.

Observou-se que os cenários com elevada produtividade apresentaram a menor pegada de carbono. A análise de variância e o teste de Tukey acusaram diferença estatística entre os cenários, ambos os testes realizados a intervalo de confiança de 5% (p-valor=0,05; tabela 5). A maior pegada de carbono ocorreu em C1, o qual mostrou diferença significativa entre os demais. O valor de PCS de C1 foi maior em, aproximadamente, média de 7,20 vezes o valor de C4 e C5 e 4,7 vezes maior se comparada aos valores C2 e C3.

4. Discussão

Os teores de pH e V apontaram baixos valores para os cinco cenários avaliados (camada 0,30 m). Os autores Siqueira-Neto et al. (2009), Carneiro et al. (2016) e Fontana et al. (2016) apontaram semelhanças nos baixos índices de fertilidade de agricultura convencional de soja em latossolos do Cerrado, sobretudo para os elementos pH, V e CTC. Respectivamente para os autores, o município Rio Verde (GO) apresentou pH_{H₂O} maior em 3,53% (pH_{H₂O}=5,28), o município de Gilbués (PI) apresentou pH_{H₂O} menor em 13,92% (pH_{H₂O}=4,39) e o município de Luís Eduardo Magalhães (BA) apresentou pH_{H₂O} menor em 5,88% (pH_{H₂O}=4,80) se comparado ao atual trabalho (pH_{H₂O}=5,10). Identificou-se semelhança no valor de V médio entre os cenários do atual trabalho (tabela 4) com os apresentados pelos mesmos autores, em que Rio Verde demonstrou V=20,00%, Gilbués V=23,85% e Luís Eduardo Magalhães V=12,76%. Para o elemento CTC, a média entre os cenários do atual trabalho de 6,32 cmol_c.dm⁻³ foi semelhante ao encontrado por Carneiro et al. (2016) e Fontana et al. (2016) (5,47 cmol_c.dm⁻³ e 7,05 cmol_c.dm⁻³, respectivamente). Todavia, o valor foi abaixo em 85,70% do que o observado por Siqueira-Neto et al. (2009) (CTC=42,90 cmol_c.dm⁻³). Mesmo assim, todas as características químicas de solo apresentadas se demonstraram adequadas a média do tipo de solo da região, sendo o comum

valores menores que 50% do ideal apontado para a maioria das culturas (RIBEIRO, et al., 1999). Isso ocorre em função do material de origem e seu alto grau de intemperismo (REATTO et al., 1998).

Houve semelhança na média de teor de carbono estocado entre cenários (tabela 4) com os valores da EMBRAPA (www.embrapa.br/pronasolos) ($34,15 \text{ Mg C.ha}^{-1}$), MAPBIOMAS (2023) ($39,00 \text{ Mg C.ha}^{-1}$) e Bernoux et al. (2002) ($36,40 \text{ Mg C.ha}^{-1}$), até 0,30 m de profundidade na região de estudo. Se comparado este valor com a média dos trabalhos para outros biomas brasileiros, o $\text{SOC}_{\text{stock}}$ do Cerrado foi superior apenas ao da Caatinga ($\text{SOC}_{\text{stock}}=31 \text{ Mg.ha}^{-1}$) e, inferior aos valores da Mata Atlântica ($\text{SOC}_{\text{stock}}= 56 \text{ Mg.ha}^{-1}$), Pampa ($\text{SOC}_{\text{stock}}= 51 \text{ Mg.ha}^{-1}$), Amazônia ($\text{SOC}_{\text{stock}}= 50 \text{ Mg.ha}^{-1}$) e Pantanal ($\text{SOC}_{\text{stock}}= 44 \text{ Mg.ha}^{-1}$). Esta variação pode ter sido reflexo da menor densidade de pontos amostrais utilizadas nos trabalhos de mapeamento do carbono no solo do Cerrado, sobretudo nas novas fronteiras agrícolas. Para os biomas Pantanal, Cerrado e Pampa, o MAPBIOMAS (2023) apontou densidade amostral inferiores a 1 amostras.mil km^{-2} , enquanto para os demais biomas os valores foram maiores ou igual 1. No entanto, quando comparado o estoque de carbono ao sistema de manejo agrícola da área, Siqueira-Neto et al. (2012) apontaram que as quantidades de carbono no solo do Cerrado nativo (23 g.kg^{-1}) foram superiores ao plantio direto (20 g.kg^{-1}), pastagem (15 g.kg^{-1}) e plantio convencional (15 g.kg^{-1}) (camada 0,00 - 0,40m), em que a vegetação natural se destacou devido ao aporte constante de resíduos vegetais e não-perturbação do sistema.

O plantio convencional tende a diminuir a quantidade de carbono estocada no solo em $0,81 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}}.\text{ha}^{-1}$ devido ao preparo de aração e gradagem, os quais expõem a matéria orgânica e aumentam sua decomposição (REICOSKY, 1997). Isso indica que sistemas mais agressivos ao solo podem gerar efeitos negativos na saúde do solo. Uma medida mitigativa é com a intensificação do sistema produtivos, os quais são capazes de aumentar a adição de resíduos vegetais de $3,50 \text{ Mg.ha}^{-1}$ em plantio convencional para $7,40 \text{ Mg.ha}^{-1}$ em plantio direto no Cerrado baiano (BOGIANI et al., 2020). Em estudo realizado em Latossolo Vermelho-Amarelo de Luís Eduardo Magalhães, Ferreira et al. (2022) demonstraram que o estoque de carbono no solo a 0,40 m de profundidade, após 5 anos de monocultivo convencional de soja com uso de subsolador (0,35m), foi de $25,36 \text{ Mg.ha}^{-1}$, enquanto o sistema de plantio direto com a mesma idade foi maior em 20,18% ($31,71 \text{ Mg.ha}^{-1}$). Estas variações ocorrem, pois, sistemas mais produtivos garantem maior aporte de resíduos, favorecem a agregação dos colóides que protegem a mineralização e, conseqüentemente, aumentam a matéria orgânica do solo (SÁ et al., 2001).

As emissões do cultivo convencional de soja variaram entre 2,54 e $3,21 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}}.\text{ha}^{-1}$ (figura 4), com destaque para os gases oriundos do nitrogênio (47,18%). O impacto do NOEFF1

de média de 38,14% foi o maior observado para todos os cenários. Isto se deve em razão das temperaturas médias de 31°C entre novembro – fevereiro (safra), somadas aos prolongados períodos sem precipitação (veranicos) (SILVA et al., 2020), causarem uma elevada volatilização do N aplicado ($\geq 50\%$) na região. Tasca et al. (2011) em trabalhos desenvolvidos em Lages (SC) obtiveram a ureia aplicada foi reduzida pela volatilização, na forma de N-NH₃, em 50% do valor inicial. A aplicação fixa de ureia (0,05 Mg.ha⁻¹) impactou na emissão de NOEFF1 e NOEFF3 nos cenários com o mesmo valor.

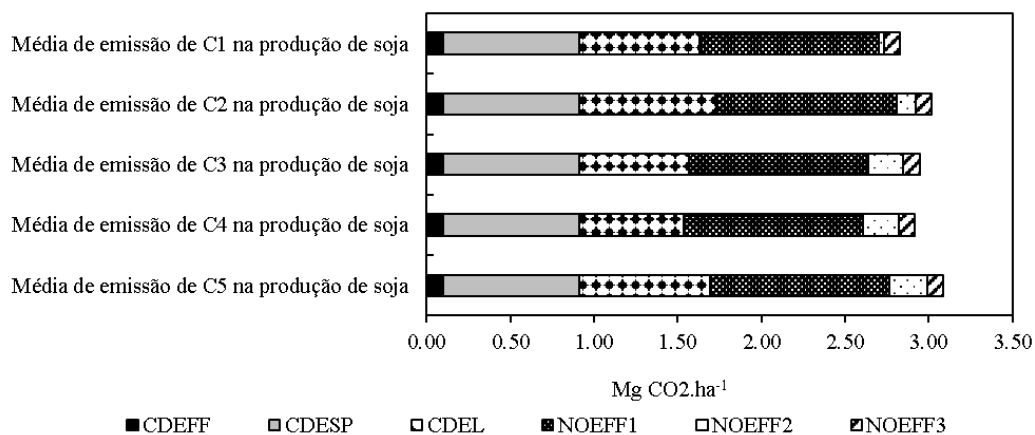


Figura 4 - Contribuição das emissões nos diferentes estágios de manejo utilizados para cultura da soja no oeste baiano brasileiro, em que: CDEFF representa a emissão da queima do combustível fóssil (S500), CDESP representa a emissão do preparo convencional de solo, CDEL representa a emissão do calcário (dolomítico), NOEFF1 representa a emissão do nitrogênio indireto; NOEFF2 representa a emissão da fixação biológica da soja e NOEFF3 representa a emissão do fertilizante sintético aplicado (ureia).

A fixação biológica de N em *Fabaceae* sp., sobretudo na cultura da soja, refletiu na baixa necessidade de uso de fertilizantes nitrogenados exógenos, contudo o elemento NOEFF2 (emissão da fixação biológica) variou em função da produtividade de soja, em que sua emissão atingiu valor máximo no cenário mais produtivo (C5) e mínimo no cenário com menor produtividade (C1). A representação média desta emissão foi baixa (7,31%) entre os cenários em razão do conteúdo de 15% de N (HUNGRIA et al., 2001) na biomassa residual da cultura. Desta forma, os 5 níveis de NOEFF2 em função dos 5 níveis categóricos de produtividade não garantiram diferenças estatísticas (tabela 5) entre as emissões dos cenários de linha de base.

Semelhante ao que ocorreu com NOEFF2, o CDEL variou em função das necessidades de elevação de pH e saturação por bases dos solos ácidos da região. Embora CDEL tenha representado 20,50% das emissões, todas as características químicas de C1 até C5 foram classificadas como inferiores ao adequado para desenvolvimento da maioria das culturas (RIBEIRO et al., 1999) e garantiram altas taxa de aplicação de calcário dolomítico para todos os cenários. Em consequência, as emissões provenientes da correção do pH e V do solo não foram

suficientes para impactar, quando transformados para emissões equivalentes, nas diferenças significativas entre emissões dos cenários de linha de base (p -valor=0,10; p -valor=0,05 e p -valor=0,01).

Para todos os cenários foi considerada a emissão de CDESP fixa em vista do mesmo manejo de solo apresentado para a região (plantio convencional). Sua alta representação percentual (28,91%) ocorreu devido ao ataque microbiano das partículas de matéria orgânica após a exposição das camadas superficiais do solo (BUYANOVSKY e WAGNER, 1983). Isso atua diretamente na difusão do gás oxigênio na solução do solo e aumenta o fluxo de gases devido a decomposição aeróbia das cadeias orgânicas (BLEVINS, et al., 1984).

A semelhança entre emissões de C1 – C5 demonstraram que a média de 2,81 Mg CO₂eq.ha⁻¹ foi representativa para todos os cenários do oeste baiano brasileiro, em que as diferenças espaciais são sutis para as características edafoclimáticas padrões da extensão territorial. Contudo, as EBL apresentaram tendências lineares com a produtividade de soja (figura 5; $R^2=0,3445$), em que cenários com maior produtividade apresentaram os maiores valores de emissão, com exceção de C4. O cenário C4 não acompanhou esta tendência em vista das baixas aplicações de calcário dos municípios que o compunha e, quando desconsiderado da análise de tendência, o coeficiente de determinação subiu em 64,88% (figura 6; $R^2=0,9811$).

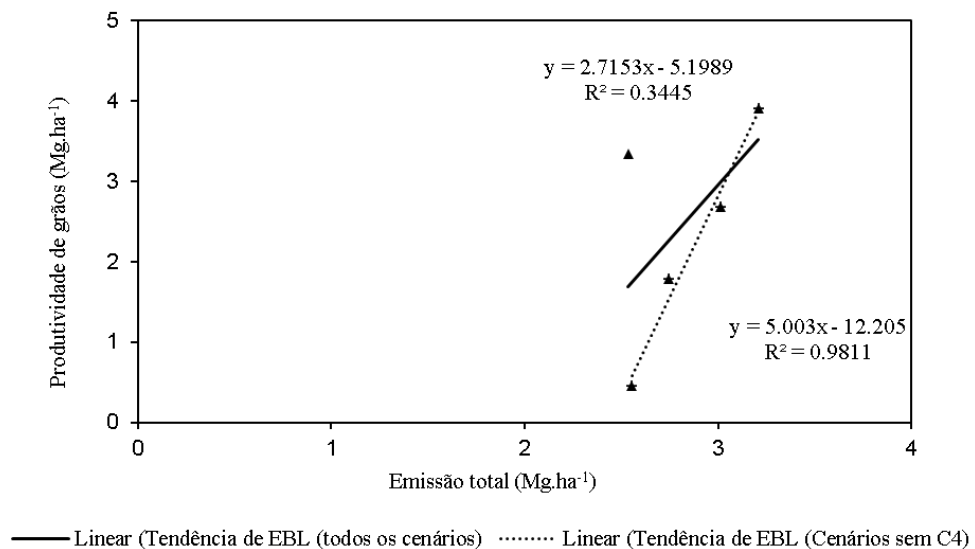


Figura 5 - Relação entre Produtividade da Soja e Emissões Totais dos cenários de linha de base na totalidade dos cenários (C1 – C5) e com a exclusão do cenário C4.

Por outro lado, a produtividade de soja impactou diretamente na pegada de carbono entre cenários. C5 e C1, os quais apresentaram as maiores e menores médias de produtividade entre os municípios que os compunha (3,91 Mg.ha⁻¹ e 0,45 Mg.ha⁻¹, respectivamente), apontaram que a

eficiência da produção é a principal responsável pela significância da comparação (tabela 5). Escobar et al. (2020) em estudos realizados para determinação de pegada de carbono nas sub-regiões produtoras de soja brasileira apontaram que a variabilidade de emissão está associada, dentre outros fatores, aos níveis de produtividade da região. Os autores apontaram que os biomas Cerrado e Amazônia possuem maior variabilidade entre PCS, com valor médio de 1,00 e 0,85 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹, respectivamente, no ano de 2015. Nas áreas produtivas da Bahia, os autores demonstraram que o valor de PCS aproximado de 1,70 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹ foi inferior ao encontrado em outros estados produtoras de soja, com destaque para: Piauí - 4,08 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹, Tocantins - 1,96 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹, Maranhão - 1,78 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹ e Pará - 1,75 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹. Se comparado estes valores a produtividade média nacional do Piauí de 1,97 Mg.ha⁻¹, Tocantins de 2,38 Mg.ha⁻¹, Maranhão de 2,45 Mg.ha⁻¹ e Pará de 2,93 Mg.ha⁻¹, no mesmo ano (2015), tem-se que existe uma correlação inversamente proporcional entre produtividade e PCS. O mesmo ocorreu entre os diferentes cenários do oeste baiano a nível de significância de 5%, em que a correlação entre produtividade e PCS foi expressa pela função exponencial $y = 2,7525x^{1,043}$ e coeficiente de determinação (R²) de 0,9257 (figura 6).

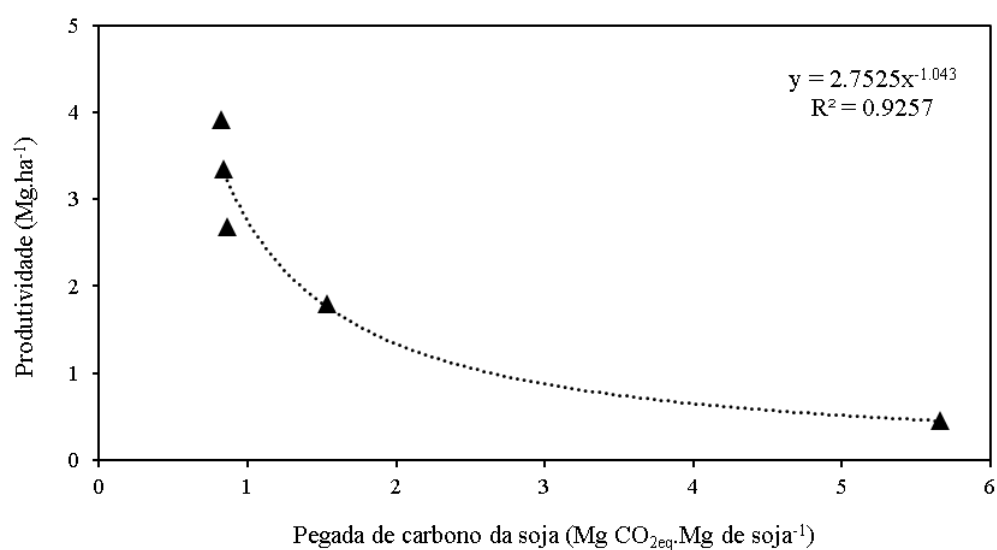


Figura 6 – Relação exponencial entre Produtividade da Soja e Pegada de Carbono para os cinco cenários produtivos do oeste baiano brasileiro.

A PCS dos cenários C5 e C4, por representarem as zonas de alta produtividade no oeste baiano, foram semelhantes ao encontrado por Escobar et al. (2020) nos estados de Mato Grosso (0,75 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹) e GO (0,71 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹). C5 e C4 também apresentaram valores de PCS semelhantes ao encontrado em outros países com elevada produtividade de soja, como: China (0,71 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹) e Estados Unidos da América (0,40 Mg CO_{2eq}.Mg soja⁻¹) (ESCOBAR et al., 2020; ADOM et al., 2012). O inverso foi observado para C3, C2 e C1, em

que seus respectivos valores de PCS (tabela 5) são comparáveis com os estados do Piauí, Tocantins e Maranhão do trabalho de Escobar et al. (2020).

5. Conclusão

Este trabalho demonstrou que as emissões de linha de base são pouco sensíveis as características edafoclimáticas e produtivas do oeste baiano, pois os componentes de manejo (plantio convencional de soja), as características químicas do solo (baixa fertilidade), o tipo de solo (latossolo), o tipo de clima (Aw) e a aplicação de insumo são semelhantes entre cenários. Ademais, a diferença de produtividade entre as zonas homogêneas não acusou impacto significativo (intervalos de confiança 1%, 5% e 10%) nas emissões totais.

O mesmo não foi observado para a pegada de carbono da soja, em que a produtividade refletiu diretamente nas diferenças entre cenários (p -valor=0,05). Os cenários com maior produtividade, e, portanto, maiores intensificações do sistema produtivo, possuíram menor pegada de carbono (destaque para C5) para cultura da soja.

Este trabalho sugere que a intensificação do sistema de produção de soja, principalmente aqueles que aumentem o aporte de material orgânico em superfície, são soluções eficazes para redução da pegada de carbono. Aumentar a produtividade de grãos possui alinhamento com as intervenções e mitigações de risco climático.

Referências

- ADOM, F. et al. Regional carbon footprint analysis of dairy feeds for milk production in the USA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, n. 5, p. 520–534, 2012.
- ALONSO, O. Avaliação da exigência de calcário do solo 1. 1969.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALMEIDA, S. P. et al. Cerrado: ecologia e flora. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008.
- BERNOUX, M. et al. Brazil's Soil Carbon Stocks. *Soil Science Society of America Journal*, v. 66, n. 3, p. 888, 2002.
- BOGIANI, J. C. et al. Sequestro de carbono em sistemas de produção de soja, milho e algodão em solo arenoso do Cerrado da Bahia. p. 2–31, 2020.
- BUYANOVSKY, G. A.; WAGNER, G. H. Annual cycles of carbon dioxide level in soil air. *Soil Science Society of America Journal*, v. 47, n. 6, p. 1139-1145, 1983.

- BLEVINS, R. et al. Changes in soil properties under no-tillage. No-tillage agriculture: principles and practices, p. 190-230, 1984.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Resultados do Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Unidade Federativa. Governo Federal, p. 51, 2021.
- CARNEIRO, J. S. et al. Diagnosis and management of spatial variability of soil fertility in the Cerrado. *Scientia Agraria*, v. 17, n. 3, p. 38–49, 2016.
- CARVALHO, A. M.; BUSTAMANTE, M. M. Emissões de NO, N₂O e CO₂ em agroecossistemas do Cerrado. In: *Série Documentos (CPAC)*. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2007.
- CONAB (2023). Série histórica de cultivos. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/>. Acessado 15 Junho de 2023.
- EMBRAPA (2023). EMBRAPA NEW's: Mecanização e Automação. Brasil. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/59834897/artigo-o-impacto-do-oleo-diesel-no-custo-de-producao-do-milho-safrinha-em-mato-grosso-do-sul#:~:text=Considerando%2Dse%20que%20o%20somat%C3%B3rio,de%20%C3%B3leo%20diesel%20por%20hectare;acesso:Junho%20de%202023>.
- ESCOBAR, N. et al. Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports. *Global Environmental Change*, v. 62, n. February, p. 102067, 2020.
- FAO (2021). Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018. FAOSTAT Analytical Brief Series No 18. Rome Cover. No.18, v. 7, n. 1, p. 87–98, 2021.
- FAO (2017). *The Future of Food and Agriculture - Trends and Challenges*. Rome. 2017.
- FERREIRA, A. et al. Organic carbon stock changes and crop yield in a tropical sandy soil under rainfed grains-cotton farming systems in Bahia, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 52, 2022
- FONTANA, A. et al. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1457–1465, 2016
- HUNGRIA, M. et al. Fixação Biológica Do Nitrogênio Na Cultura Da Soja. *Embrapa Soja. Circular Técnica*, 35, p. 48, 2001.
- IAC (2014). Boletim 200. Boletim 200: Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas, v. 200, n. 7, p. 452, 2014.
- IBGE (2023). Portal Cidades e Estados. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/panorama>; acesso: Junho de 2023.
- INMET (2023). Banco de Dados Meteorológicos do Brasil. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>; acesso: Junho de 2023.

- IPCC (2019). 2006 IPCC GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES. Kanagawa: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006a. Relatório Técnico.
- MAPBIOMAS (2023) – Plataforma Interativa MAPBIOMAS v.7.1. Brasília: MAPBIOMAS. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>; acesso: Junho de 2023.
- OORTS, K. et al. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 100, n. 2–3, p. 161–171, 2003.
- PAIVA, D. S. et al. Mercado Voluntário de Carbono: Análises de Cobenefícios de Projetos Brasileiros. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 19, n. 1, p. 45–64, 2015.
- RAMANKUTTY, N. et al. Trends in Global Agricultural Land Use: Implications for Environmental Health and Food Security. *Annual Review of Plant Biology*, v. 69, p. 789–815, 2018.
- REICOSKY, D. C. Tillage-induced CO₂ emission from soil Tillage-induced CO₂ emission from soil. n. July 1997, p. 273–285, 2014.
- RIBEIRO, A. C. et al. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação*, p. 359, 1999.
- SANTOS, R. S. et al. Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. *Geoderma*, v. 400, n. December 2020, p. 115149, 2021
- SÁ, J. C. et al. Chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Water*, v. 65, n. October, p. 1486–1499, 2001.
- SILVA, R. A. et al. Quantificação Da Pegada Hídrica Da Soja Na Região Do Matopiba: Cenário Atual E Mudanças Climáticas. *Revista de Geografia*, v. 37, n. 3, p. 26, 2020.
- SILVEIRA, P. M. et al. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 10, p. 2057–2064, 2000.
- SIQUEIRA-NETO, M. et al. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no cerrado. *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 31, n. 4, p. 709–717, 2009.
- SIQUEIRA-NETO, M. et al. Soybean expansion impacts on soil organic matter in the eastern region of the Maranhão state (Northeastern Brazil). *Soil Use and Management*, n. January 2021, p. 1–14, 2022.
- TASCA, F. A. et al. Volatilização De Amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 35, n. 2, p. 493–509, 2011.

ARTIGO 2 - AVALIAÇÃO DO ACÚMULO DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM PRODUÇÃO DE SOJA IRRIGADA USANDO UMA ABORDAGEM DE MODELOS – MATOPIBA CERRADO

Resumo

Aproximadamente 79% das emissões globais de GEE vieram dos setores de energia, indústria, transporte, agricultura, silvicultura e outros usos do solo (AFOLU) em 2019. Mesmo assim, em decorrência da segurança alimentar, o setor primário sofre pressões para aumentar a eficiência na cadeia produtiva por meio de etapas sustentáveis, as quais incluem menor emissão de GEE e, quando possível, a remoção dos gases CO₂, CH₄ e N₂O da atmosfera. A irrigação é uma alternativa capaz de inserir carbono no solo através do aumento de produtividade, garantindo maior rentabilidade, melhora nos índices de químico-físicos do solo e diminuição da pegada de carbono. Todavia, experimentos para avaliação do carbono orgânico podem levar até 20 anos, inviabilizando o processo analítico. Isso promove o uso de modelos de simulação para estudar o comportamento passado e/ou futuro do estoque de carbono no solo. Desta forma, este trabalho objetivou simular a taxa de acúmulo de carbono no solo em diferentes lâminas de cultivo de soja irrigada no município de São Desidério-BA via modelo CROPGRO-SOYBEAN do Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). Foram selecionados dois pontos amostrais no município e cinco tratamentos de soja irrigada no período de 20 anos de cultivo (2000 até 2019) para avaliação, ano a ano, do balanço de carbono anual (BCS) e taxa anual de acúmulo de carbono no solo (TA). Os tratamentos foram (1) soja sequeiro, (2) soja irrigada com a aplicação de água de 45% da evapotranspiração de cultura, (3) soja irrigada com aplicação de 75% da evapotranspiração de cultura, (4) soja irrigada com aplicação de 100% da evapotranspiração de cultura e (5) soja irrigada com aplicação de 110% da evapotranspiração de cultura. Os experimentos foram simulados sob sistema de irrigação pivô central e submetidos as etapas: cálculo do balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para obtenção das lâminas, cálculo de produtividade (Y) no programa DSSAT, cálculo de BCS e TA pelo uso da metodologia Verra – VM0042. Os resultados foram comparados pelo teste ANOVA e Tukey, ambos a 5% de significância. Como resultado, observou-se que os tratamentos 1 e 2 (SI e 45%ETC) não diferiram em produtividade e taxa de acúmulo de carbono no solo entre si, demonstrando manutenção e queda de C no estoque inicial do solo para o CAR1 e CAR2, respectivamente. Os tratamentos 3 e 4 (75%ETC e 100%ETC) também não diferiram entre si e resultaram em acúmulo de C no solo para ambas as localidades. O tratamento 5 (110%ETC) diferiu de todos os demais, acusando a maior taxa de acúmulo de C para as duas coordenadas. Pode-se afirmar que o sistema de produção da soja realizado na maior parte da região do oeste baiano não garante a sustentabilidade da matéria orgânica, podendo contribuir com sua remoção e, conseqüentemente, com o aumento do efeito estufa, todavia análise entre tratamentos demonstrou o uso de irrigação é capaz de incrementar o C do solo se assegurado que as lâminas sejam aplicadas a partir de 75% da necessidade de água potencial da cultura (75%ETC).

Palavras-chave: 1. Efeito estufa 2. Estoque de carbono no solo 3. Irrigação 4. *Glycine max* L.; 5. Produtividade; 6. Modelagem.

ARTICLE 2 - EVALUATION OF SOIL ORGANIC CARBON ACCUMULATION IN IRRIGATED SOYBEAN PRODUCTION USING A MODEL APPROACH – MATOPIBA CERRADO

Abstract

Approximately 79% of global GHG emissions came from the energy, industry, transportation, agriculture, forestry, and other land use (AFOLU) sectors in 2019. Even so, as a result of food security, the primary sector is under pressure to increase efficiency in the production chain through sustainable steps, which include lower GHG emissions and, when possible, the removal of CO₂, CH₄ and N₂O gases from the atmosphere. Irrigation is an alternative capable of inserting carbon into the soil through increased productivity, ensuring greater profitability, improvement in soil chemistry and reduction of the carbon footprint. However, experiments to evaluate organic carbon can take up to 20 years, making the analytical process unfeasible. This promotes the use of simulation models to study the past and/or future behavior of soil carbon stocks. Thus, this work aimed to simulate the rate of carbon accumulation in the soil in different irrigated soybean crop depths in the municipality of São Desidério-BA using the CROPGRO-SOYBEAN model of the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). Two sampling points in the municipality and five treatments of irrigated soybean in the 20-year period of cultivation (2000 to 2019) were selected for evaluation, year by year, of the annual carbon balance (BCS) and annual rate of soil carbon accumulation (TA). The treatments were (1) rainfed soybean, (2) irrigated soybean with the application of water of 45% of the crop evapotranspiration, (3) irrigated soybean with application of 75% of the crop evapotranspiration, (4) irrigated soybean with application of 100% of the crop evapotranspiration and (5) irrigated soybean with the application of 110% of the crop evapotranspiration. The experiments were simulated under a center pivot irrigation system and submitted to the following steps: calculation of the sequential climatological and irrigation water balance to obtain the blades, calculation of productivity (Y) in the DSSAT program, calculation of BCS and TA using the Verra – VM0042 methodology. The results were compared using the ANOVA and Tukey tests, both at 5% significance. As a result, it was observed that treatments 1 and 2 (SI and 45%ETC) did not differ in yield and rate of soil carbon accumulation among themselves, demonstrating maintenance and decrease of C in the initial soil stock for CAR1 and CAR2, respectively. Treatments 3 and 4 (75%ETC and 100%ETC) also did not differ from each other and resulted in C accumulation in the soil for both locations. Treatment 5 (110%ETC) differed from all the others, with the highest rate of C accumulation for the two coordinates. It can be stated that the soybean production system carried out in most of the western region of Bahia does not guarantee the sustainability of organic matter, and may contribute to its removal and, consequently, to the increase of the greenhouse effect, however analysis between treatments showed that the use of irrigation is capable of increasing soil C if it is ensured that the depths are applied from 75% of the potential water requirement of the crop (75% ETC).

Keywords: 1. Greenhouse effect; 2. Soil organic carbon stock; 3. Irrigation; 4. *Glycine max* L.; 5. Soybean grain yield; 6. Modelling.

Lista de Figuras

Figura 1. Condições meteorológicas médias anuais do município de São Desidério ao longo do ciclo de produção de soja. Regime térmico e regime hídrico (a) e evapotranspiração de cultura (b). As linhas verticais marcam as mudanças de fase fenológica da cultura.	81
Figura 2. Eficiência no uso da água para os manejos de irrigação dos tratamentos 2, 3, 4 e 5 nas localidades denominadas CAR1 (a) e CAR2 (b) de São Desidério – BA.....	84
Figura 3. Tendências das taxas de acúmulo de carbono no solo para a localidade CAR1 no período de 2000 – 2019.....	87
Figura 4. Tendências das taxas de acúmulo de carbono no solo para a localidade CAR2 no período de 2000 – 2019.....	88

Lista de Tabelas

Tabela 1. Cadastro ambiental rural da propriedade (CAR), coordenada geográfica, ponto amostral de solo, tipo de solo e área da fazenda obtidos pelo cruzamento das bases SICAR e BDiA.	49
Tabela 2. Parâmetros médios (2000 – 2019) utilizados para o ajuste edafoclimático inicial do Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) na propriedade BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).....	51
Tabela 3. Parâmetros médios (2000 – 2021) utilizados para o ajuste edafoclimático inicial do Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) na propriedade BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FD0A0CDA7B9F39 (CAR 2).....	52
Tabela 4. Parâmetros e valores de calibração da soja para cultivar M7739 IPRO inseridos no arquivo SBGRO047.CUL no programa DSSAT, segundo Sampaio et al., (2021).....	54
Tabela 5. Fração de Cx e Nx nos componentes considerados e fatores de emissão padrões da literatura utilizados para cálculo de emissão de São Desidério.....	58
Tabela 6. Resultados obtidos pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para o ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).....	61
Tabela 7. Resultados obtidos pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para o ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FD0A0CDA7B9F39 (CAR 2).....	63
Tabela 8. Resultados médios anuais obtidos pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para o ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1)....	66
Tabela 9. Resultados médios anuais obtidos pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para o ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FD0A0CDA7B9F39 (CAR 2). ..	67
Tabela 10. Resultados anuais de produtividade e aporte de carbono no solo para o ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).. ..	68

Tabela 11. Resultados anuais de produtividade e aporte de carbono no solo para o ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).....	70
Tabela 12. Comparação estatística da produtividade média anual entre os tratamentos nas localidades CAR1 e CAR2.	73
Tabela 13. Resultados do balanço de carbono do solo para as localidades CAR1 e CAR2 de São Desidério-BA nos anos de 2000 – 2019.	74
Tabela 14. Emissão média anual total e participação média anual das emissões nos tratamentos 1 ao 5 para o ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).	77
Tabela 15. Emissão média anual total e participação média anual das emissões nos tratamentos 1 ao 5 para o ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).	78
Tabela 16. Resultados do estoque de carbono inicial e final dos tratamentos 1 ao 5 no ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).	78
Tabela 17. Resultados do estoque de carbono inicial e final dos tratamentos 1 ao 5 no ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).....	79
Tabela 18. Comparação estatística da taxa de acúmulo média anual de C entre os tratamentos nas localidades CAR1 e CAR2.	79
Tabela 19. Variabilidade dos dados climáticos entre as localidades CAR1 e CAR2 de São Desidério – BA; média dos 20 anos.....	81

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANA	Agência Nacional de Águas
AIBA	Associação de Irrigantes da Bahia
BDiA	Banco de Dados de Informações Ambientais
CAR	Cadastro Ambiental
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FAO	Food and Agriculture Organization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
GWP	Global Warm Potential
CDEFF	Dióxido de carbono emitido pela queima do combustível fóssil
CDEL	Dióxido de carbono emitido pela aplicação de calcário

NOEFF	Óxido nitroso emitido pelo manejo de nitrogênio no sistema
SICAR	Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural
EAG	Emissão de dióxido de carbono pela aração e gradagem
ETC	Evapotranspiração de cultura
ETR	Evapotranspiração real
CAD	Capacidade de armazenamento de água do solo
AFD	Água facilmente disponível
TA	Taxa de acúmulo
BCS	Balanco de carbono do solo
APt	Aporte de carbono total
Et	Emissão total
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
MO	Matéria Orgânica
LAT	Lâmina Aplicada Total
NDI	Número de dias irrigados
AMS	Armazenamento de água médio do solo
DHA	Déficit Hídrico Acumulado
EHA	Excedente Hídrico Acumulado
CAPS	Carbono aportado no solo
MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	Mega joule por metro quadrado e dia
m.s ⁻¹	Velocidade
Mg. ha ⁻¹	Megagrama por hectare
ha	Hectare
Mg CO _{2eq} .ha ⁻¹	Megagrama de equivalência em dióxido de carbono por hectare
Mg CO _{2eq} .L ⁻¹	Megagrama de equivalência em dióxido de carbono por litro
Gt	Gigatoneladas
Gt CO _{2eq} .ha ⁻¹	Gigatoneladas de equivalência em dióxido de carbono por hectare
sc.ha ⁻¹	Sacas por hectare
cmol _c .dm ⁻³	centimol de carga por decímetro cúbico
g.cm ⁻³	grama por decímetro cúbico
g.kg ⁻¹	grama por quilograma
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
mm	Mililitros

$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	centímetro cúbico por centímetro cúbico
$\text{sc}.\text{mm}^{-1}$	saca por milímetro

Lista de Símbolos

C	Elemento carbono
N	Elemento nitrogênio
CO_2	Dióxido de Carbono
CH_4	Metano
N_2O	Óxido Nitroso
C_x	Fração de carbono em diferentes moléculas
N_x	Fração de nitrogênio em diferentes moléculas
$\text{N-N}_2\text{O}$	Nitrogênio se transformando em óxido nitroso
$\text{N-NH}_3\text{-N}_2\text{O}$	Nitrogênio se transformando em amônia e, em seguida, óxido nitroso
Y	Produtividade
V	Saturação por bases
$\text{SOC}_{\text{stock}}$	Estoque de carbono do solo
$\text{SOC}_{\text{stocki}}$	Estoque de carbono inicial do solo
$\text{SOC}_{\text{stockf}}$	Estoque de carbono final do solo
CC	Conteúdo de argila do solo
pH	Poder hidrogeniônico da solução do solo
CTC	Capacidade de Troca Catiônica do solo
BD	Densidade do solo
CT	Tipo de clima
Q_g	Radiação global na superfície terrestre
$T_{\text{máx}}$	Temperatura máxima
$T_{\text{mín}}$	Temperatura mínima
WS	Velocidade do vento
RU	Umidade Relativa
C_{org}	Carbono orgânico
EFF	Emissão total da queima de combustível para maquinário de motor a quatro tempos
A	Área
FFC	Quantidade de diesel consumida
EFF_{FF}	Fator de emissão para diesel S500

EL	Emissão total da aplicação de calcário
M_{dolomite}	Quantidade de calcário dolomítico aplicado
EF_{dolomite}	Fator de emissão do calcário dolomítico
N_2O_{fert}	Emissão de óxido nitroso decorrente do uso de fertilizantes nitrogenados
$NOEFF_{\text{direct}}$	Emissão direta de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes
$NOEFF_{\text{indirect}}$	Emissão indireta de óxido nitroso devido ao N total do sistema
FSN	Quantidade de N proveniente do fertilizante sintético aplicado (ureia)
$EF_{N_{\text{direct}}}$	Fator de emissão a ureia
M	Quantidade de ureia aplicada
NC_{SF}	Fração de N na molécula de ureia
$N_2O_{\text{FERTvolat}}$	Emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da volatilização e acúmulo atmosférico
$FRAC_{\text{GASF}}$	Fração de N sintético adicionado aos solos que volatiliza como NH_3 e NO_x
$EF_{N_{\text{volat}}}$	Fator de emissão da volatilização da ureia
FCR	Quantidade de N em espécies fixadoras devolvidas aos solos
MB	Matéria seca anual aporta ao solo
N_{content}	Fração de N na matéria seca anual aportada
CS_{content}	Representação da soma de silte e argila do solo
SOCC	Representação da concentração de carbono orgânico no solo
T	Profundidade do solo
Θ_{SAT}	Umidade do solo em base volumétrica com solo saturado
Θ_{CC}	Umidade do solo em base volumétrica com solo em capacidade de campo
Θ_{PMP}	Umidade do solo em base volumétrica com solo em ponto de murcha permanente
a	Coefficiente de Angström ($a=0,25$)
b	Coefficiente de Angström ($a=0,50$)

1 Introdução

A elevação da concentração dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, incluindo dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), resultantes das atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis e alterações no uso da terra, tem desempenhado um papel significativo no aquecimento global. A partir do início da Revolução Industrial em 1850, a concentração de CO_2 atmosférico evoluiu de 280 ppm para 420 ppm em 2023, em que atingiu seu valor máximo de 425 ppm no mês de maio. Este crescimento excedeu as

taxas dos últimos 800 mil anos (180 a 300 ppm), em que apenas no período de 1958 até 2023 o aumento foi de, aproximadamente, 95 ppm (LÜTHI et al., 2008; IPCC, 2023; NOAA, 2023).

Segundo o sexto relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change – AR6, as emissões antropogênicas globais líquidas de GEE foram estimadas em $59 \pm 6,6$ Gt CO_{2eq} no ano de 2019, cerca de 12% superior em 2010 e 54% superior as emissões de 1990. Aproximadamente 79% das emissões globais de GEE vieram dos setores de energia, indústria, transporte, agricultura, silvicultura e outros usos do solo (AFOLU), os quais sofreram (e sofrem) pressões pelo aumento populacional e crescente demanda por alimentos. Estima-se que até 2050 o crescimento demográfico deverá ser de 2 bilhões de pessoas, requerendo uma produção agrícola de até 50% maior no mundo. A vulnerabilidade socioeconômica, ambiental e agrícola evidenciou os conceitos de produção de GEE e as mudanças climáticas, os quais trouxeram riscos diretos na mudança de panorama na agropecuária e no uso de recursos naturais (FAO, 2017; IPCC, 2023).

O impacto da elevada concentração de gases de efeito estufa na atmosfera (GEE) se mostrou, prioritariamente, na temperatura média terrestre, em que a temperatura global da superfície foi maior cerca de 1,09°C no período de 2011-2020 do que 1850-1990, com aumentos mais expressivos nos continentes (1,59°C) do que nos oceanos (0,88°C). Observam-se também outras transformações decorrentes da intensificação do efeito estufa, como mudanças nos padrões de distribuição e intensidade de chuvas, ventos e circulação dos oceanos. Fenômenos de interação oceano-atmosfera associados diretamente aos padrões normais da temperatura das superfícies do mar, tal qual o El Niño e La Nina Oscilação Sul (ENOS), estão sofrendo cada vez mais mudanças em suas intensidades (GRIMM, et al., 2000; TANGANG et al., 2017; SUN et al., 2023) e impactando ainda mais nos ciclos agrícolas (MAUGET et al., 1999).

Em decorrência dos impactos negativos e das inseguranças das mudanças climáticas (FAO, 2023a), os oceanos, os solos e a biomassa terrestre ganharam destaque como grandes bancos, e possíveis sumidouros, de carbono atmosférico (COSTA et al. 2008). No ciclo do carbono, estes se destacam como agentes diretos na transferência e fixação do material orgânico, garantindo com que o elemento seja armazenado na forma de corais, matéria orgânica do solo ou na biomassa. Neste contexto, para o setor agropecuário, a matéria orgânica dos solos recebe a maior importância pois potencializa as funções vitais de suporte a vida vegetal, armazenamento de água (MINASNY e MCBRATNEY, 2018), estruturação de agregados (RABOT et al., 2018), fertilidade do solo (FONTE et al., 2009) e aumento da capacidade de troca catiônica (OORTS, 2003).

Desta forma, sua gestão adequada, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, a preservação de áreas florestais e a restauração de ecossistemas degradados são técnicas obrigatórias

para quem está diretamente envolvido no setor. A implementação de medidas integradas e ou regenerativas são práticas fundamentais para aumentar o estoque de carbono nos solos agricultáveis (SIQUEIRA-NETO, 2009), bem como promover ações que reduzam as emissões de GEE das etapas operacionais dos sistemas produtivos (Climate-Smart Agriculture Plan; FAO, 2023b).

Este é um dos principais desafios a qual a produção de alimentos deverá passar nos próximos anos, sobretudo os locais inseridos em novas fronteiras agrícolas. Em áreas de bioma Cerrado (Centro-Oeste brasileiro), por exemplo, existem dificuldades na adoção das práticas regenerativas uma vez que a variabilidade e os extremos climáticos estão cada vez mais presentes (SAUCEDA et al., 2022). Dentre as variáveis meteorológicas, a precipitação é entendida como a principal causa das perdas de rendimento da cultura de grãos. Isso se deve, principalmente, as precipitações apresentarem grande variabilidade no tempo e no espaço (ASSAD, E.D., 1994; ANDRADE e LIMA, 2013; SAUCEDA et al., 2022), bem como a ocorrência de veranicos que coincidem com as fases produtivas da cultura (FARIAS et al., 2001).

No Brasil, as condições extremas se tornaram uma forte preocupação nacional pois os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (fronteira MATOPIBA) produziram na safra 21/22, aproximadamente, 11% da produção nacional de grãos (32 milhões de toneladas) (CONAB, 2023). O mesmo censo também apontou que 53% desta produção proveio, na mesma época, de grãos de soja e, se considerado as perdas somente da precipitação irregular, os valores podem atingir até 40% de redução da produtividade (BERGAMASCHI et al., 2004; MANAVALAN et al., 2009; CARVALHO et al. 2013).

Uma estratégia para mitigar o risco climático que foi amplamente difundida desde os anos 2000 foi o uso da irrigação, a qual possui o papel fundamental na regulação do microclima da área cultivada e ganhos de rendimento de cultura (KINGRA e KAUR, 2017; BARBOSA et al., 2021). A Agência Nacional de Águas (ANA, 2021) apontou que o cenário brasileiro da irrigação é de 8,20 milhões de hectares, com 1,45 milhões de hectares destinados para pivô central em culturas anuais (sobretudo soja, sorgo, milho, feijão e trigo). Os estados que compõem a fronteira agrícola MATOPIBA apresentaram metade da área total em grãos irrigados, sendo: 495,20 mil hectares irrigados para Bahia, 155,40 mil hectares para o Tocantins, 69,90 mil hectares para o Maranhão e 50,93 mil hectares para o Piauí. Nesta região, as áreas de pivô central abastecem a cultura da soja majoritariamente, garantindo um incremento de produtividade de $3,80 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (CONAB, 2023) para, aproximadamente, $6,50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (AIBA, 2023). Ademais, a Agência demonstrou que ainda existe um potencial efetivo de expansão de 13,70 milhões de hectares até 2030 para área irrigada, sendo os estados com maior potencial de Bahia, Tocantins, Piauí e Maranhão, respectivamente.

Embora existam comprovações técnicas e ambientais para o uso do manejo de irrigação, pouco se conhece sobre a influência dessa tecnologia nos estoques de carbono orgânico do solo e na qualidade do solo, especialmente em regiões tropicais. Existe dualidade entre pesquisadores quanto ao uso da irrigação como aumento de índices de propriedades orgânicas, pois ainda que haja aumento de biomassa, a presença de maior umidade do solo aumenta a atividade microbiana e acelera a decomposição da matéria orgânica. Isto ocasiona maiores emissões de CO₂ (JABRO et al. 2008; KOCHSIEK et al., 2009; LIU et al., 2008) e pode levar a menores teores de carbono orgânico no solo (DERSCH e BÖHM, 2001). Por outro lado, pesquisadores apontaram que a tecnologia contribui com maior aporte de sedimentos associados ao carbono (KING et al., 2009), aumento da resiliência do solo pelo favorecimento de diversas espécies microbiológicas (ENTRY et al., 2008) e mitigação do impacto das perdas do estoque de carbono do revolvimento por maquinário (BONA et al., 2006).

Mesmo que o consenso entre pesquisadores não seja atingido, a técnica pode ser utilizada como justificativa para acesso de crédito financeiro em programas de agricultura sustentável, como o Programa de Adaptação à Mudanças do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC+) em território nacional. O programa internacional Verified Carbon Standard, com sua metodologia melhoria de manejo para acúmulo de carbono no solo (VM0042), também permite e propõe a técnica como uma das iniciativas do desenvolvimento sustentável. A rigor, as instituições veem a irrigação como uma justificativa plausível para captação de recurso econômico e geração de créditos de carbono.

A maior dificuldade da comprovação da técnica como efeito positivo está no tempo de estabilização do carbono em áreas manejadas. Segundo Moraes et al. (2013), o carbono da matéria orgânica no solo atinge seu estágio coloidal no período de 13 a 20 anos para ambientes tropicais. Isto demonstra que estudos de longa data são ideais para determinação do comportamento do carbono orgânico em qualquer sistema que requer avaliação de campo. Todavia, existem dificuldade técnicas e operacionais na manutenção de experimentos prolongados pois exigem procedimentos replicáveis, onerosos e mão-de-obra especializada. Uma alternativa para reduzir o tempo de estudo são os modelos de simulação, em que, segundo Corrêa et al. (2013), podem ser definidos como “ferramenta científica baseada na representação simplificada de um sistema” que, na maioria dos casos, é composta por um conjunto de símbolos e relações matemáticas logicamente ordenadas. Apesar dos autores deixarem claro que a calibração é baseada em experimentação de campo, os parâmetros podem ser revisitados com uma frequência maior do que a anual, garantindo diferentes projeções (temporais e de manejo) que auxiliam na tomada de decisão. Estas ferramentas podem ser baseadas em diferentes aspectos da produção, como por exemplo: manejo de água

(AquaCrop; VANUYTRECHT et al., 2014), determinação de carbono no solo e mudança do uso da terra (RothC; Century; DN-DC - PARTON et al., 2020) e/ou baseado em parâmetros atmosféricos (DSSAT – HOOGENBOOM et al., 2019).

Com o uso de modelos de simulação, surgiu a oportunidade de testar diferentes cenários de lâminas aplicadas, geração de biomassa e geração de material orgânico aportado no cultivo da soja na fronteira agrícola MATOPIBA, em especial no município de São Desidério/BA. Este trabalho teve como objetivo simular a taxa de acúmulo de carbono no solo em diferentes lâminas de cultivo de soja irrigada no município de São Desidério-BA via modelo CROPGRO-SOYBEAN do Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT).

2 Material e Métodos

Foram simulados cinco tratamentos de soja irrigada no período de 20 anos de cultivo (2000 até 2019) para avaliação, ano a ano, do balanço de carbono anual e taxa anual de acúmulo de carbono no solo por tratamento. Estes consistiram no cultivo de soja no município de São Desidério – BA nos níveis: (1) soja sequeiro (SI), (2) soja irrigada com a aplicação de água de 45% da evapotranspiração de cultura, (3) soja irrigada com aplicação de 75% da evapotranspiração de cultura, (4) soja irrigada com aplicação de 100% da evapotranspiração de cultura e (5) soja irrigada com aplicação de 110% da evapotranspiração de cultura. Os tratamentos foram simulados sob sistema de irrigação pivô central. O processo de criação dos experimentos ocorreu conforme as 5 etapas indicadas pelos tópicos 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5, os quais foram descritos detalhadamente com os dados de entrada (“inputs”) e saída (“outputs”) necessários para obtenção dos resultados. Os tópicos foram nomeados de: (2.1) Escolha do local, (2.2) Definição do experimento, (2.3) Cálculo do balanço hídrico sequencial climatológico, (2.4) Uso do programa Decision Support System for Agrotechnology Transfer, (2.5) Uso da metodologia Verra – VM0042 e (2.6) Análise estatística.

2.1 Escolha do local de estudo

Esta etapa consistiu na escolha dos pontos amostrais de forma representativa, em que São Desidério foi selecionado devido a sua expressiva produção irrigada da cultura da soja no Brasil. Segundo os dados abertos de área irrigada da Agência Nacional de Águas (DOURADO et al., 2021), disponíveis na plataforma digital interativa <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/>, o município apresentou, em 2023, 316 sistemas irrigantes por pivô central e totalidade de 33,4 mil hectares em área irrigada. Ademais, segundo o levantamento da última safra (2021-2022), realizado

pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), São Desidério ocupou a terceira posição em produção de soja brasileira com uma média de 67,80 sc.ha⁻¹.

Para seleção das áreas que receberam os tratamentos de irrigação simulados foi realizado o cruzamento entre duas diferentes bases de informações (ambas abertas e de amplo acesso), sendo: Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR; <https://www.car.gov.br/publico/imoveis/index>) e o Banco de Dados de Informações Ambientais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (BDiA; <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>). Dessa forma, foram selecionadas propriedades que obtivessem o conjunto de informações disponíveis: presença de análise de solo (física e química) e regularidade no cadastro ambiental rural (CAR) em pelo menos um ponto dentro do município de São Desidério – BA.

Na intersecção do SICAR e BDIA, obteve-se apenas duas propriedades rurais (tabela 1) que permitissem uma modelagem mecanística. Por serem áreas com informações de solo completas e regularidade legislativa na produção agrícola, os pontos foram selecionados para receber os tratamentos. Nestas duas propriedades foram projetados dois pivôs centrais, cada área com um deles, com os tratamentos presentes.

Tabela 1 - Cadastro ambiental rural da propriedade (CAR), coordenada geográfica, ponto amostral de solo, tipo de solo e área da fazenda obtidos pelo cruzamento das bases SICAR e BDIA.

CAR (SICAR)	Coordenadas	Ponto amostral (BDiA)	Tipo de solo	Área da fazenda (ha)
BA-2928901- 667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1)	-13,24; -46,03	SD23VD/P.8	Latossolo	223,70
			Amarelo	
			Distrófico	
			Típico	
BA-2928901- 1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2)	-12,94; -46,00	SD23VB/P.57	Gleissolo	2881,10
			Háplico	
			Alumínico	
			Típico	

O CAR representa o Cadastro Ambiental Rural e os códigos apresentados na primeira coluna são os encontrados na base governamental brasileira; as coordenadas na segunda coluna representam os pontos cardeais no território brasileiro; os ponto amostrais na terceira coluna são os códigos da amostra no banco de informações do BDIA; o tipo de solo na quarta coluna representa a classificação até o quarto nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBCS); a área da fazenda na quinta coluna representa a área útil encontrada na propriedade.

2.2 Definição do experimento

O experimento simulado foi constituído de uma estratégia de produção de soja não irrigada e quatro estratégias de irrigação, distribuídas em um sistema de irrigação por pivô central dimensionado para 100ha. O mesmo experimento foi repetido para o período de 2000 – 2019 anualmente.

Os tratamentos foram definidos como: sequeiro (SI; tratamento 1) que recebeu somente a precipitação ocorrida anualmente durante o período de cultivo da soja; 45% da ETC (45%ETC; tratamento 2) que recebeu 45% da evapotranspiração de cultura; 75% da ETC (75%ETC; tratamento 3) que recebeu 75% da evapotranspiração de cultura; 100% da ETC (100%ETC; tratamento 4) que recebeu 100% da evapotranspiração de cultura e 110% da ETC (110%ETC; tratamento 5) que recebeu 110% da evapotranspiração de cultura. Para cálculo da evapotranspiração de cultura foi utilizado o método proposto por Allen et al. (1998) ajustado pelos coeficientes de crescimento (K_c) $K_{c_{inicial}} = 0,6$, $K_{c_{máximo}} = 1,2$ e $K_{c_{final}} = 0,5$ do “FAO Irrigation and Drainage Paper - Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Foram utilizadas as informações atmosféricas do NASA-POWER (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) de 2000 até 2019, sendo: (1) radiação global ($Q_g - MJ.m^{-2}.dia^{-1}$), temperatura máxima, mínima e média ($^{\circ}C$), velocidade do vento ($m.s^{-1}$), umidade relativa (%) e precipitação (P) como entrada. Os valores de precipitação (P) foram adquiridos da plataforma HIDROWEB (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>) para os pontos individualizados conforme as propriedades selecionadas previamente, em que buscou-se utilizar os valores de maior proximidade das coordenadas das propriedades (CAR1 e CAR2). As estações meteorológicas escolhidas foram de código 1245015 e 1245058, respectivamente. Os coeficientes de Angström $a=0,25$ e $b=0,50$, o coeficiente de reflexão (albedo) de 0,23 e a constante psicométrica de 0,063 foram utilizadas conforme a própria metodologia de Allen et al. (1998).

Para determinação da intensidade do sistema de irrigação foi considerado um pivô central de 100ha, com jornada de trabalho máxima de 21 horas, recuo do primeiro aspersor de 50 metros e velocidade máxima de giro (para uma volta completa) de 300m/h, conforme a otimização de dimensionamento indicado por Hoffman et al. (2007) e Toledo et al. (2019). Desta forma, obteve-se a lâmina máxima aplicada por dia de 5,81 mm, a qual foi inserida na lâmina diária dos tratamentos pelo balanço hídrico climatológico sequencial de forma que nenhuma aplicação excedesse a capacidade máxima do sistema adotado.

2.3 Cálculo do balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação

Para determinação das datas de irrigação, do número de dias irrigados, do déficit hídrico total e o excedente hídrico total foi gerado um Balanço Hídrico Sequencial Climatológico e de Irrigação conforme Thornthwaite e Mather (1955), em que considera como entrada de água no sistema as precipitações e as lâminas de irrigação e, como saída de água do sistema, a evapotranspiração de cultura, todos em escala diária.

As informações de solo utilizadas para ajuste do balanço hídrico foram: capacidade de armazenamento do solo (CAD), água facilmente disponível (AFD) e densidade do solo (BD). A CAD foi fixada em 100mm para todas as propriedades (e seus tipos de solo), bem como valor de 50mm foi padronizado para AFD conforme Doorenbos e Kassam (1994) para soja. Foi considerada a profundidade do solo até 1 m e o balanço foi iniciado um ano anterior ao período avaliado para garantir que o armazenamento estivesse com a CAD completa no início da simulação. A BD foi obtida da plataforma Soilgrid (<https://soilgrids.org/>) na profundidade até 1 m. A condição que foi atendida para o pivô aplicar água na lavoura foi quando $CAD \leq AFD$ para garantir que a soja não tivesse dificuldade na captação do recurso. Para anos em que não houve $CAD \leq AFD$ (sem necessidade de aplicação de água), assumiu-se que o resultado do balanço hídrico foram iguais.

Portanto, em cada propriedade, cada um dos tratamentos e cada um dos 20 anos de cultivo, foram obtidos as evapotranspirações de cultura, as evapotranspirações reais, a quantidade de água aplicada (mm), as datas de irrigação, o número de dias irrigados, o déficit hídrico total e o excedente hídrico total.

2.4 Uso do programa *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)*

A ferramenta Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT Version 4.7.5.0) foi utilizada para determinação das produtividades de soja nos diferentes tratamentos simulados (HOOGENBOOM et al., 2019). Foram geradas um total de 200 valores de produtividade simulada, as quais combinaram 20 anos de cultivo (2000 – 2019), 2 pontos amostrais (propriedades da tabela 1) e 5 tratamentos (SI, 45%ETC, 75%ETC, 100%ETC e 110%ETC) no modelo CROPGRO-SOYBEAN existente no programa. Para isso foram necessárias as etapas: (2.4.1) Ajustes edafoclimáticas das localidades escolhidas no software DSSAT, (2.4.2) Montagem do experimento nas localidades escolhidas no software DSSAT, (2.4.3) Calibração da cultura da soja no software DSSAT e (2.4.4) Obtenção das produtividades dos tratamentos no software DSAAT descritas detalhadamente nos tópicos abaixo.

2.4.1 Ajustes edafoclimáticos das localidades no DSSAT

Para indicar ao modelo CROPGRO-SOYBEAM qual o padrão de clima e solo dos pontos, utilizou-se os dados climáticos diários de 01 de janeiro de 2000 a 31 de dezembro de 2020 individualizados dos pontos, os quais foram obtidos do NASA-POWER em escala diária. Para as informações de solo, os dados foram adquiridos individualizados pela plataforma BDIA. Estão especificados nas tabelas 2 e 3 os parâmetros e suas respectivas médias do período que foram utilizadas para ajustes iniciais do programa.

Tabela 2 - Parâmetros médios (2000 – 2019) utilizados para o ajuste edafoclimático inicial do Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) na propriedade BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).

Parâmetro	Valor	Unidade de medida	Local de obtenção
Radiação global (Qg)	25,02	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	NASA-POWER
Temperatura máxima (T _{máx})	30,02	°C	NASA-POWER
Temperatura mínima (T _{mín})	19,14	°C	NASA-POWER
Velocidade do vento (WS)	4,10	m.s ⁻¹	NASA-POWER
Precipitação (P)	1222,90	mm	HIDROWEB-ANA
Umidade relativa (RU)	62,54	%	NASA-POWER
Matéria orgânica (0,30m; MO)	5,57	g.kg ⁻¹	BDiA
Carbono orgânico (0,30m; C _{org})	3,23	g.kg ⁻¹	BDiA
Densidade do solo (0,30m; BD)	1,10	g.cm ⁻³	Soilgrid
Teor de argila (0,30m)	15	%	BDiA
Teor de areia (0,30m)	83	%	BDiA
Teor de silte (0,30m)	2	%	BDiA
Tipo de solo	Latossolo Amarelo Distrófico Típico	-	BDiA

Tabela 3 - Parâmetros médios (2000 – 2021) utilizados para o ajuste edafoclimático inicial do Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) na propriedade BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).

Parâmetro	Valor	Unidade de medida	Local de obtenção
Radiação global (Qg)	25,30	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	NASA-POWER
Temperatura máxima (T _{máx})	30,02	°C	NASA-POWER
Temperatura mínima (T _{mín})	19,14	°C	NASA-POWER
Velocidade do vento (WS)	4,10	m.s ⁻¹	NASA-POWER
Precipitação (P)	1198,90	mm	HIDROWEB-ANA
Umidade relativa (RU)	62,54	%	NASA-POWER
Matéria orgânica (0,30m; MO)	172,06	g.kg ⁻¹	BDiA
Carbono orgânico (0,30m; C _{org})	61,28	g.kg ⁻¹	BDiA
Densidade do solo (0,30m; BD)	1,31	g.cm ⁻³	Soilgrid
Teor de argila (0,30m)	37	%	BDiA
Teor de areia (0,30m)	34	%	BDiA
Teor de silte (0,30m)	29	%	BDiA
Tipo de solo	Gleissolo Háptico Aluminico Típico	-	BDiA

A inserção dos arquivos no DSSAT ocorreu em formato de texto pelas ferramentas “WEATHER – DAILY” e “SOIL” do próprio software.

2.4.2 Montagem do experimento nas localidades dentro do DSSAT

A montagem do experimento foi realizada com a ferramenta “Crop Management Data – XBuild” do próprio software. Um experimento para cada coordenada foi criado, os quais foram inseridos os 5 tratamentos descritos anteriormente. Nesta etapa foram colocados os manejos “Cultivar” (cultivar escolhida), “Planting” (data de semeadura), “Irrigation” (irrigação) e “Fertilizer” (adubação), que serviram de premissas para a rodagem do modelo CROPGRO - Soybean.

Para a genética de “Cultivar” foi utilizado apenas a cultivar M7739 IPRO (nome comercial INTACTA) originada pela empresa Bayer. Segundo o catálogo CIASEEDS (<https://www.ciaseeds.com/cultivares-de-soja/m7739-ipro>) a cultivar apresentou perfil genético de: grupo de maturação 7.6, hábito de crescimento semi-determinado, crescimento semiereto, cor da flor roxa e engalhamento bom.

Em “Planting”, a semeadura inserida foi feita com distância entrelinhas de 0,5m e densidade de plantio de 40 plantas.m⁻² (SAMPAIO et al., 2020). A data de semeadura foi selecionada a partir do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) do MAPA, disponível apenas na versão

online pelo site <https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Zarc/Zarc.html>. Optou-se pela data de semeadura de 31 de outubro para todos os anos e tratamentos, pois a partir no segundo decêndio de outubro o risco de atividade climática atípica apontada pelo ZARC foi menor do que 20% para o município. Foi respeitada o ciclo médio de dias da cultivar e a colheita ocorreu, aproximadamente, em 110 dias (até segunda semana de fevereiro) para todas as simulações.

No arquivo “Irrigation”, a irrigação inserida foi de aspersão por pivô central, com eficiência de aplicação de água de 80% (OLIVEIRA et al., 2004). O próprio programa simulou a curva de retenção em base volumétrica (cm.cm^{-3}), em que foram gerados os valores de $\Theta_{\text{PMP}}=0,13$, $\Theta_{\text{CC}}=0,18$ e $\Theta_{\text{SAT}}=0,63$ para o Latossolo Amarelo Distrófico Típico e $\Theta_{\text{PMP}}=0,48$, $\Theta_{\text{CC}}=0,64$ e $\Theta_{\text{SAT}}=0,84$ para o Gleissolo Háptico Alumínico Típico. Estes valores serviram de referência para garantir que a umidade do solo estivesse compatível com os parâmetros do balanço hídrico realizado na etapa 2.3 descrita anteriormente, sobretudo para o conteúdo de água no solo não descer mais do que o valor da AFD (50 mm). Ademais, ajustou-se a lâmina máxima aplicada no experimento em 5,81mm, a mesma encontrada no dimensionamento do sistema descrito na etapa 2.2.

O manejo de adubação inserido no software foi igual ao recomendado pelo Boletim 200 para soja para produtividade esperada de 4,00 Mg.ha^{-1} (IAC, 2014), em que os valores foram de 80 kg.ha^{-1} de P_2O_5 , 80 kg.ha^{-1} de K_2O e 50 kg.ha^{-1} de N. Após todo este processo, ajustou-se o programa para entregar dados de saída em escala diária e formato de texto.

2.4.3 Inserção de dados de Referência e Calibração da cultura da soja no DSSAT

Para que o sistema tivesse uma referência da produtividade e referência do comportamento fisiológico que a cultura possui nas condições do Cerrado brasileiro, foi necessário alimentá-lo com dados observados e calibrá-lo com os parâmetros genéticos da cultivar M7739 IPRO. Dado que o atual trabalho não possui experimentos físicos, a produtividade referência foi obtida do trabalho de Alves et al. (2021a) para região do Cerrado, em que o valor usado no tratamento 1 (SI) foi de 3,80 Mg.ha^{-1} , no tratamento 2 (45%ETC) foi de 3,90 Mg.ha^{-1} , no tratamento 3 (75%ETC) foi de 4,80 Mg.ha^{-1} , no tratamento 4 (100%ETC) foi de 5,00 Mg.ha^{-1} e no tratamento 5 (110%ETC) foi de 5,20 Mg.ha^{-1} . Estas produtividades foram inseridas no programa com a ferramenta “Experimental data”, em que foi realizado o preenchimento do “File experimental data A”. Este teve a função de computar apenas dados pontuais de produtividade e época de semeadura nas duas localidades e em todos os anos (2000 – 2019).

Em seguida foi realizada a calibração da cultivar M7730 IPRO, a qual serviu para garantir que a fisiologia da cultura, a curva de crescimento e a produtividade dos tratamentos fosse

semelhante aos valores de produtividade referência. Os parâmetros e seus vales foram obtidos do trabalho de Sampaio et al. (2020) para o município de Balsa – MA, em que, segundo os autores, o erro quadrático médio da produtividade de grãos das simulações foi de 12%. Os ajustes foram realizados na ferramenta “Genetics Coefficients”, em que foi alterado os parâmetros do arquivo SBGRO047.CUL com os valores da tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros e valores de calibração da soja para cultivar M7739 IPRO inseridos no arquivo SBGRO047.CUL no programa DSSAT, segundo Sampaio et al. (2020).

Características*	Descrição	Valores
#CUL	Código para coeficientes genéticos.	SBGRO047
CSDL	Duração do fotoperíodo crítico, o qual o desenvolvimento reprodutivo progride sem efeito do comprimento do dia (para plantas de dia curto) (h).	11,80
PPSEN	Inclinação da resposta relativa do desenvolvimento ao fotoperíodo com o tempo (positiva para plantas de dias curtos) (1/h).	0,325
EM-FL	Tempo entre a emergência das plantas e o aparecimento das flores (R1) (dias fototérmicos).	25,00
FL-SH	Tempo entre a primeira flor e a primeira vagem (R3) (dias fototérmicos).	5,00
FL-SD	Tempo entre a primeira flor e a primeira semente (R5) (dias fototérmicos).	10,50
SD-PM	Tempo entre a primeira semente (R5) e a maturidade fisiológica (R7) (dias fototérmicos).	27,50
FL-LF	Tempo entre a primeira flor (R1) e o final da expansão foliar (dias fototérmicos).	22,00
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar a 30°C, 350 ppm CO ₂ e luz alta (mg CO ₂ .m ⁻² .s ⁻¹)	1,200
SLAVR	Área foliar específica da cultivar sob condições padrão de crescimento (cm ² .g ⁻¹)	365
SIZLF	Tamanho máximo da folha inteira (três folíolos) (cm ²).	230
XFRT	Fração máxima do crescimento diário que é fracionada em semente e casca.	1,00

WTSPD	Peso máximo por semente (g).	0,15
SFDUR	Duração do enchimento de sementes de vagens em condições padrão de crescimento (dias fototérmicos).	18,2
SDPDV	Média de sementes por vagem sob condições padrão de cultivo.	2,00
PODUR	Tempo necessário para que a cultivar atinja a carga final de vagens em condições ótimas (dias fototérmicos).	10,00
THRSH	Proporção máxima de (semente/(semente + casca)) na maturidade. Faz com que as sementes parem de crescer à medida que seu peso seco aumente até que as cascas sejam preenchidas (porcentagem de debulha).	76,00
SDPRO	Fração de proteína nas sementes (g(proteína)/g(semente)).	0,40
SDLIP	Fração de óleo nas sementes (g(óleo)/g(semente)).	0,20

*Cada sigla das características apresentadas se refere ao código do próprio programa DSSAT.

2.4.4 Obtenção das produtividades (Y) no DSAAT

As simulações foram realizadas usando o modo experimental (“experimental”) do próprio programa, em que foi utilizado o modelo de crescimento de cultura da soja CROPGRO-SOYBEAN (HOOGENBOOM, et al., 1992; ALAGARSWAMY, et al., 2006; BANTERNG, et al., 2010). O modo “experimental” atendeu a premissa de reiniciar as simulações a cada ano (safra), garantindo que o teor inicial de água no solo era de 100%. Desta forma, para os dois pontos de São Desiderio, foram geradas as produtividades anuais dos 5 tratamentos de 2000 até 2019 em Mg.ha⁻¹. Para anos em que não houve irrigação, assumiu-se que o valor de produtividade era igual a média normalizada do tratamento. Os valores de produtividade serviram de dados de entrada para metodologia Verra – VM0042.

2.5 Uso da metodologia VERRA – VM0042

A metodologia VERRA – VM0042 (<https://verra.org/>) foi empregada para obtenção das emissões de carbono nos tratamentos, bem como o balanço de carbono e acúmulo de carbono no solo para as simulações. Com a ferramenta “Quantification Approach 3” da própria metodologia, foram selecionados os manejos de relevância para emissão de gases na produção de soja. As equações para contabilização dos gases CO₂ e N₂O foram aplicados individualmente para cada uma

das localidades da Tabela 1, em todos os tratamentos e todas as safras. Os tipos de manejo considerados foram para cálculo de emissão foram: (1) emissão de dióxido de carbono provenientes da combustão de combustíveis fósseis (CDEFF), (2) emissão de dióxido de carbono proveniente da calagem (CDEL) e (3) emissão de dióxido nitroso proveniente de fertilizantes nitrogenados e espécies fixadoras (NOEFF), conforme descrito nas equações abaixo:

1. Dióxido de carbono emitido da queima do combustível fóssil (CDEFF):

$$CDEFF, i, = \frac{\sum_{j=1}^j EFF, i, j}{A}$$

Equação 1

Em que: CDEFF,*i,j* é a emissão de dióxido de carbono da queima do combustível fóssil no ano (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹); EFF,*j* é a emissão de dióxido de carbono da queima do combustível fóssil em maquinário de motor a combustão quatro tempos (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹); A é a área de utilização do maquinário (ha); j é o tipo de combustível (diesel) e i unidade amostral (ha).

$$EFF, i, j = FFC, j, i, t * EF_{FF}$$

Equação 2

Em que: EFF,*i,j* é a emissão de dióxido de carbono da queima do combustível fóssil em maquinário de motor a combustão quatro tempos (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹); FFC,*j,i,t* é o diesel consumido (L); EF_{FF} é o fator de emissão de diesel (Mg CO_{2eq}.L⁻¹); j é o tipo de combustível e t o período (ano).

2. Dióxido de carbono emitido do uso de calcário (CDEL):

$$CDEL = \frac{EL, i, t}{A}$$

Equação 3

Em que: CDEL é a quantidade de dióxido de carbono emitido pela aplicação do calcário (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹) em área total; EL,*i,j* é a quantidade de dióxido de carbono emitido da aplicação do calcário (Mg CO_{2eq}); A é a área (ha); j é o tipo de calcário; i é a unidade amostral (ha) e t o período (ano).

$$EL, i, t = (Mdolomite, i * EFdolomite) * \frac{44}{12}$$

Equação 4

Em que: $EL_{i,t}$ é a quantidade de dióxido de carbono emitido da aplicação do calcário ($Mg\ CO_{2eq}$); $Mdolomite, i$ é a quantidade de calcário dolomítico aplicado ($Mg.ha^{-1}$) e $EFdolomite$ é o fator de emissão de dióxido de carbono do carbonato contido no calcário dolomítico (%).

3. Dióxido de carbono emitido da aplicação de fertilizantes e plantas fixadoras de N (NOEFF):

$$NOEFF = N2O_{fert, i, t} + N2O_{Nfix, i, t}$$

Equação 5

Em que: NOEFF é a emissão de óxido nitroso decorrente das entradas de nitrogênio no solo no ano ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); $N2O_{fert, i, t}$ é a emissão de óxido nitroso decorrente do uso de fertilizantes nitrogenados ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); $N2O_{Nfix, i, t}$ é a emissão de óxido nitroso decorrente do uso de espécie de plantas fixadoras de nitrogênio ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); i unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

$$N2O_{fertbsl, i, t} = NOEFF_{direct, i, t} + NOEFF_{indirect, i, t}$$

Equação 6

Em que: $N2O_{fertbsl, i, t}$ é a emissão de óxido nitroso decorrente do uso de fertilizantes nitrogenados ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); $NOEFF_{direct, i, t}$ é a emissões diretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes na linha de base ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); $NOEFF_{indirect, i, t}$ é a emissão indireta de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes na linha de base ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); i é a unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

$$NOEFF_{direct, i, t} = \frac{[(FSN, i, t) * EF_{Ndirect, bsl} * \frac{44}{28} * GWP_{N2O}]}{A}$$

Equação 7

Em que: $NOEFF_{direct, i, t}$ é a emissão de óxido nitroso decorrente do uso de fertilizantes nitrogenados ($Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}$); $FSN_{i,t}$ é aplicação de fertilizante nitrogenado sintético na agricultura no ano (Mg de N); $EF_{Ndirect, bsl}$ é o fator de emissão do fertilizante nitrogenado (%); GWP_{N2O} é fator de conversão para carbono equivalente (273); A é a área; i é a unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

$$FSN, i, t = \sum_{SF} M, i, t * NC_{SF}$$

Equação 8

Em que: FSN,*i,t* é aplicação de fertilizante nitrogenado na agricultura no ano (t); M,*SF,i,t* é a massa de fertilizante sintético (t); NC_{SF} teor de N do fertilizante sintético (%); *i* é a unidade amostral (ha) e *t* é o tempo (ano).

$$NOEFF_{indirect, i, t} = \frac{N2O_{fertbsl, volat, i, t}}{A}$$

Equação 9

Em que: NOEFF_{indirect,*i,t*} emissões indiretas de óxido nitroso devido ao uso de fertilizantes sintético (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹); N2O_{fertbsl, volat,*i,t*} emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da volatilização e acúmulo atmosférico (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹); *A* é a área de aplicação (ha); *i* é a unidade amostral (ha) e *t* é o período (ano).

$$N2O_{fert, volat, i, t} = \left[(FSN, i, t * FRAC_{GASF}) * EF_{Nvolat} * \frac{44}{28} * GWP_{N2O} \right]$$

Equação 10

Em que: N2O_{fert, volat,*i,t*} emissões indiretas de óxido nitroso produzidas a partir da volatilização e acúmulo atmosférico (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹); FSN,*i,t* é aplicação de fertilizante nitrogenado (t); FRAC_{GASF} é a fração de N sintético adicionado aos solos que volatiliza como NH₃ e NO_x (adimensional); EF_{Nvolat} é o fator de emissão para óxido nitroso em solos e superfícies de água (%); GWP_{N2O} potencial de aquecimento global para N₂O (273); *i* unidade amostral (ha) e *t* é o período (ano).

$$NOEFF_{fix, i, t} = \frac{FCR, i, t * EF_{Ndirect} * \frac{44}{28} * GWP_{N2O}}{A}$$

Equação 11

Em que: NOEFF_{fix,*i,t*} é a emissões de óxido nitroso devido ao uso de espécies fixadoras de N (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹); FCR,*i,t* quantidade de N em espécies fixadoras devolvidas aos solos (Mg N); EF_{Ndirect} fator de emissão de óxido nitroso para aplicação de fertilizante sintéticos (%); GWP_{N2O} é o potencial de aquecimento global para N₂O; *A* é a área; *i* é a unidade amostral (ha); *t* é o período (ano).

$$FCR_{i,t} = \sum_{g=1}^G MB_{g,i,t} * N_{content}$$

Equação 12

Em que: $FCR_{i,t}$ quantidade de N em espécies fixadoras devolvidas aos solos (t N); $MB_{g,i,t}$ é a matéria seca anual, incluindo acima e abaixo do solo, de espécies fixadoras (t); $N_{content}$ é a fração de N na matéria seca da planta fixadora (%); g é o tipo de espécie fixadora de N; i é a unidade amostral (ha) e t é o período (ano).

Dado que o sistema de manejo aplicado foi com revolvimento do solo, também foi inserido a emissão decorrente da aração e gradagem (EAG) de Reicosky (1997) no valor fixado de 0,81 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹. Para cada tipo de manejo foi utilizado a fração de C_x e N_x por insumo e os fatores de emissão padrões encontrados na literatura (Tabela 5).

Tabela 5 - Fração de C_x e N_x nos componentes considerados e fatores de emissão padrões da literatura utilizados para cálculo de emissão de São Desidério.

Frações de C _x e N _x	Valor	Grandeza	Equações	Fonte
NC _{SF}	45	%	Eq. 8 – NOEFF	IAC (2014)
FRAC _{GASF}	50	%	Eq. 10 – NOEFF	Tasca et al., (2011)
N _{content}	15	%	Eq. 12 - NOEFF	Hungria et al., (2001)

Fator de emissão	Valor	Grandeza	Equações	Fonte
EF _{FF}	0,00267	Mg CO _{2eq} .L ⁻¹	Eq. 2 – CDEFF	IPCC (2006)
EF _{Dolomite}	13	%	Eq. 4 – CDEL	IPCC (2006)
EF _{Ndirect}	1	%	Eq. 7 – NOEFF	IPCC (2006)
EF _{Nvolat}	10	%	Eq. 10 - NOEFF	IPCC (2006)

NC_{SF} é a fração de N na ureia; FRAC_{GASF} é a fração de N-NH₃ perdida por volatilização; N_{content} é a fração de N na matéria seca da soja; EF_{FF} é o fator de emissão da queima de combustível fóssil; EF_{Dolomite} é o fator de emissão do carbonato contido no calcário dolomítico; EF_{Ndirect} é o fator de emissão direto do N₂O-N; EF_{Nvolat} é o fator de emissão do N₂O-N do total volatilizado.

As quantidades de insumos utilizados foram padronizadas em função de um hectare, em que cada simulação recebeu um valor de: quantidade de combustível fóssil consumido (FFC), quantidade de aplicação de calcário (M_{dolomite}) e quantidade de aplicação de fertilizante nitrogenado (FSN). A quantidade de combustível consumida (FFC_l) na produção foi fixada para todos os cenários no valor de 40 L.ha⁻¹ de diesel S500 (EMBRAPA, 2021). O mesmo foi feito para quantidade de fertilizante, em que foi utilizado apenas a fonte sintética de 0,05 Mg.ha⁻¹ de ureia (FSN). Para quantidade de calcário (M_{dolomite}) foi utilizada apenas a fonte de calcário dolomítico e foi calculada segundo a metodologia de elevação de da saturação de bases (ALONSO, 1969) a cada dois anos do período. Em todos os insumos assumiu-se que não houve perda por lixiviação e a

fração da ureia volatilizada foi ajustada para 50% em função da temperatura média da região (TASCA et al., 2011).

Para estoque inicial de carbono no solo foi utilizada a equações de Carbono Orgânico Estocado no Solo (SOC_{stock}) proposto pelo modelo de Yang et al. (2008) com correção pela concentração de carbono orgânico dos solos do Cerrado de Zinn et al. (2005). Os dados de entrada utilizados foram os obtidos nas análises de solo descritas anteriormente, individualmente para cada ponto, sendo: teor de argila, teor de silte e densidade do solo. Não houve presença de cascalho no solo e a camada de solo utilizada foi de 0,30m de profundidade. O valor de SOC_{stock} calculado foi adotado como valor do primeiro ano da simulação (estoque inicial) e os valores de balanço de carbono anual subsequentes foram integrados no solo conforme a metodologia VM0042 (equação 15). O valor final de estoque de carbono foi obtido no último ano de simulação (2019) para todos os tratamentos e as duas localidades.

Equação de Yang et al. (2008):

$$SOC_{stock} = \sum_{i=1}^n SOCC * BD * T$$

Equação 13

Em que: SOC_{stock} é o estoque de carbono orgânico do solo ($Mg\ CO_{2eq}.m^{-2}$); $SOCC$ é a concentração de carbono orgânico no solo ($g.kg^{-1}$), BD é a densidade do solo ($g.cm^{-3}$) e T é a profundidade do solo (m).

Equação de Zinn et al. (2005) para cálculo de $SOCC$ no Cerrado:

$$SOCC = 3,04 + 0,0103 * CS_{cont}$$

Equação 14

Em que: $SOCC$ é a concentração de carbono orgânico do solo ($g.kg^{-1}$); CS_{cont} é a soma do conteúdo de argila e silte a 0,30m de profundidade ($g.kg^{-1}$).

Para cálculo da quantidade de carbono aportado no solo (CAPS), em $Mg\ CO_{2eq}.ha^{-1}.ano^{-1}$, foi realizado a determinação de carbono do resíduo pela aplicação da taxa de decomposição de massa residual de cultura de 63% para o tratamento 1 (SI) e 70% para os tratamentos 2, 3, 4 e 5 (KLEIMANN et al., 2006), porcentagem de carbono orgânico na biomassa residual da soja de 0,44 (RAUCCI et al., 2015) e índice de colheita de 0,3 (a umidade de 10%) (DOORENBOS e KASSAM,

1994) na produtividade da soja simulada pelo software DSSAT. Assumiu-se que o carbono dos solos das propriedades estava estabilizado desde o primeiro ano das simulações (“standstat carbon”), em que já ocorreu a mudança de uso do solo de floresta nativa para área agricultável e, portanto, os estoques de carbono foram linearmente proporcionais aos aportes (PAUSTIAN et al., 1997). Todos os valores foram padronizados para de Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹ e o procedimento foi repetido para todos os tratamentos (e todas as simulações) em escala anual.

Desta forma, após o cálculo de emissões do manejo do cultivo da soja, cálculo de carbono inicial do solo e aporte de carbono do resíduo cultural da soja, foi realizado o cálculo de balanço de carbono no solo anualmente (e para cada localidade) pela própria metodologia VM0042.

Equação de balanço de carbono anual:

$$BCS = SOC_{stocki} + (APt - Et)$$

Equação 15

Em que: BCS é o balanço de carbono do solo por ano em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹; SOC_{stocki} é o estoque de carbono no solo a 0,30m em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹; APt é o aporte de carbono total do resíduo cultura em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ e Et é a emissão total do manejo em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.

Considerou-se que todo resultado de BCS acarretou em mudanças no estoque do solo até 0,30m de profundidade, em que BCS<0 reduziu o estoque e BCS>0 promoveu seu aumento. Os valores foram acumulados durante todos os anos (integralização dos valores) para obtenção do estoque final (SOC_{stockf}). A taxa de acúmulo (TA) foi obtida a partir da relação simples do estoque total do período e o número de anos do período. Ressalta-se que a metodologia VERRA – VM0042 considera apenas as práticas de manejo para cálculo de balanço de carbono, o que justificou a ausência da pegada de carbono do maquinário de irrigação no atual trabalho.

2.6 Análise estatística

Os dados médios (média de 20 safras) de produtividade (Mg.ha⁻¹) e taxa de acúmulo de carbono no solo (Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹) foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) entre os tratamentos no software R Studio version +446. Em seguida, ambos os resultados foram comparados pelo teste de Tukey (p < 0,05) no mesmo programa.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados do balanço hídrico climatológico sequencial e de irrigação

Nas tabelas 6 e 7 estão expressos os valores anuais do resultado do balanço hídrico climatológico sequencial e de irrigação para os tratamentos, sendo indicados para cada um dos pontos de São Desidério-BA respectivamente.

Tabela 6 – Resultados obtidos pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para o ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).

Ano	Tratamentos	ETC total	LAT	NDI	AMS	ETR total	DHA	EHA
2000	1	408,46	-	-	69,86	242,33	114,13	173,37
	2	408,46	37,28	6,00	82,46	328,25	48,35	173,37
	3	408,46	62,13	10,00	83,70	353,10	44,95	173,37
	4	408,46	80,11	14,00	82,50	373,81	42,46	173,37
	5	408,46	82,85	13,00	83,10	402,49	42,22	173,37
2001	1	399,79	-	-	84,65	300,12	48,67	279,16
	2	399,79	18,08	3,00	88,25	328,13	35,44	279,16
	3	399,79	30,14	5,00	88,85	340,19	34,18	279,16
	4	399,79	40,19	6,00	88,27	350,23	33,20	279,16
	5	399,79	41,22	7,00	87,76	380,27	35,21	279,16
2002	1	398,02	-	-	78,06	307,78	77,24	95,67
	2	398,02	18,85	3,00	81,88	340,94	56,81	95,67
	3	398,02	31,42	5,00	82,51	353,51	54,79	95,67
	4	398,02	41,90	7,00	81,91	363,98	53,21	95,67
	5	398,02	40,84	7,00	80,17	389,72	52,94	95,67
2003	1	444,90	-	-	74,06	273,58	103,51	268,81
	2	444,90	18,65	3,00	81,51	328,13	56,37	268,81
	3	444,90	31,08	5,00	82,13	340,56	54,31	268,81
	4	444,90	41,44	7,00	81,53	350,92	52,71	268,81
	5	444,90	81,08	13,00	84,26	429,18	42,52	268,81
2004	1	461,44	-	-	58,24	228,73	159,72	98,79
	2	461,44	55,53	9,00	77,89	358,22	54,75	98,79
	3	461,44	92,54	15,00	78,55	395,24	49,62	98,79
	4	461,44	121,54	20,00	79,96	426,09	46,03	98,79
	5	461,44	123,39	21,00	82,75	449,05	50,82	98,79
2005	1	377,98	-	-	81,11	282,22	65,76	425,96
	2	377,98	0,00	0,00	87,43	301,92	43,05	425,96
	3	377,98	30,49	5,00	86,01	332,42	39,10	425,96
	4	377,98	40,65	6,00	87,45	342,58	37,94	425,96
	5	377,98	41,06	7,00	88,04	368,29	42,57	425,96
2006	1	381,92	-	-	68,96	249,42	95,97	52,73
	2	381,92	18,64	3,00	76,28	293,43	60,01	52,73
	3	381,92	31,07	5,00	76,90	305,85	57,58	52,73

	4	381,92	41,43	7,00	76,30	316,21	55,69	52,73
	5	381,92	80,70	13,00	76,72	378,52	54,10	52,73
2007	1	497,58	-	-	70,37	285,69	121,88	137,67
	2	497,58	55,82	9,00	82,14	385,09	58,10	137,67
	3	497,58	93,04	16,00	84,00	422,31	52,98	137,67
	4	497,58	119,05	20,00	82,20	453,32	49,74	137,67
	5	497,58	124,14	21,00	83,19	487,58	49,35	137,67
2008	1	304,25	-	-	91,75	279,98	24,27	454,78
	2	304,25	0,00	0,00	91,75	279,98	24,27	454,78
	3	304,25	0,00	0,00	91,75	279,98	24,27	454,78
	4	304,25	0,00	0,00	91,75	279,98	24,27	454,78
	5	304,25	0,00	0,00	91,75	279,98	24,27	454,78
2009	1	297,96	-	-	85,13	254,05	43,91	223,27
	2	297,96	0,00	0,00	85,13	254,05	43,91	223,27
	3	297,96	0,00	0,00	85,13	254,05	43,91	223,27
	4	297,96	0,00	0,00	85,13	254,05	43,91	223,27
	5	297,96	0,00	0,00	85,13	254,05	43,91	223,27
2010	1	282,03	-	-	86,91	249,37	32,66	135,30
	2	282,03	0,00	0,00	86,91	249,37	32,66	135,30
	3	282,03	0,00	0,00	86,91	249,37	32,66	135,30
	4	282,03	0,00	0,00	86,91	249,37	32,66	135,30
	5	282,03	0,00	0,00	86,91	249,37	32,66	135,30
2011	1	272,58	-	-	88,65	243,71	28,87	295,91
	2	272,58	0,00	0,00	88,65	243,71	28,87	295,91
	3	272,58	0,00	0,00	88,65	243,71	28,87	295,91
	4	272,58	0,00	0,00	88,65	243,71	28,87	295,91
	5	272,58	0,00	0,00	88,65	243,71	28,87	295,91
2012	1	397,52	-	-	79,56	224,12	75,41	332,12
	2	397,52	18,52	3,00	87,66	273,78	36,23	332,12
	3	397,52	30,86	5,00	88,28	286,12	34,67	332,12
	4	397,52	41,15	7,00	87,68	296,41	33,47	332,12
	5	397,52	82,13	14,00	90,15	365,52	28,25	332,12
2013	1	305,55	-	-	83,72	258,92	46,63	227,18
	2	305,55	0,00	0,00	83,72	258,92	46,63	227,18
	3	305,55	0,00	0,00	83,72	258,92	46,63	227,18
	4	305,55	0,00	0,00	83,72	258,92	46,63	227,18
	5	305,55	0,00	0,00	83,72	258,92	46,63	227,18
2014	1	378,87	-	-	70,96	204,77	99,10	242,22
	2	378,87	36,76	6,00	84,93	287,81	37,58	242,22
	3	378,87	61,27	10,00	86,15	312,32	34,63	242,22
	4	378,87	77,69	13,00	84,97	332,74	32,51	242,22
	5	378,87	83,31	14,00	85,09	358,49	33,75	242,22
2015	1	448,70	-	-	63,53	219,98	152,72	127,80
	2	448,70	56,59	9,00	82,79	356,43	44,97	127,80
	3	448,70	94,32	16,00	82,86	394,16	40,66	127,80

	4	448,70	119,82	20,00	83,05	425,59	37,66	127,80
	5	448,70	125,75	21,00	84,68	453,47	38,96	127,80
2016	1	504,52	-	-	47,86	173,41	211,83	16,01
	2	504,52	55,56	9,00	70,91	337,29	53,45	16,01
	3	504,52	92,60	15,00	70,97	374,33	48,16	16,01
	4	504,52	123,47	21,00	72,76	405,19	44,49	16,01
	5	504,52	163,53	28,00	73,29	474,01	41,42	16,01
2017	1	412,23	-	-	56,73	205,97	162,96	71,52
	2	412,23	55,10	6,00	78,47	301,08	42,06	71,52
	3	412,23	91,83	11,00	79,74	337,81	37,49	71,52
	4	412,23	117,44	19,00	81,47	368,42	34,37	71,52
	5	412,23	128,66	21,00	84,58	391,54	36,69	71,52
2018	1	381,24	-	-	68,68	205,97	104,27	117,26
	2	381,24	36,90	6,00	80,18	282,02	47,56	117,26
	3	381,24	61,50	10,00	80,22	306,62	43,74	117,26
	4	381,24	82,00	14,00	81,41	327,12	41,00	117,26
	5	381,24	82,89	14,00	81,68	349,98	43,65	117,26
2019	1	347,23	-	-	71,49	185,90	94,34	268,55
	2	347,23	36,78	6,00	82,92	259,02	41,62	268,55
	3	347,23	61,30	10,00	84,15	283,53	38,02	268,55
	4	347,23	81,73	14,00	82,96	303,97	35,47	268,55
	5	347,23	81,78	14,00	84,32	331,86	32,59	268,55

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). A ETC total é a evapotranspiração de cultura em mm; LAT a lâmina aplicada total em mm; NDI o número de dias de irrigação; AMS o armazenamento médio de água no solo em mm; ETR total a evapotranspiração real simulada em mm; DHA o déficit hídrico acumulado em mm e o EHA o excedente hídrico acumulado em mm.

Tabela 7 - Resultados obtidos pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para o ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).

Ano	Tratamentos	ETC total	LAT	NDI	AMS	ETR total	DHA	EHA
2000	1	408,32	-	-	69,87	242,22	114,01	173,45
	2	408,32	37,26	6,00	79,47	328,07	48,30	173,45
	3	408,32	62,10	10,00	81,47	352,91	44,90	173,45
	4	408,32	82,80	13,00	82,47	373,61	42,41	173,45
	5	408,32	87,47	14,00	83,30	402,28	42,17	173,45
2001	1	399,71	-	-	84,66	299,97	48,61	279,30
	2	399,71	18,08	3,00	83,26	327,95	35,40	279,30
	3	399,71	30,13	5,00	85,26	340,01	34,14	279,30
	4	399,71	36,17	6,00	87,36	350,05	33,16	279,30
	5	399,71	41,20	7,00	88,36	380,07	35,17	279,30
2002	1	394,79	-	-	78,08	307,64	77,15	95,78
	2	394,79	18,85	3,00	80,12	340,79	56,74	95,78
	3	394,79	31,41	5,00	81,90	353,35	54,72	95,78
	4	394,79	42,88	6,00	83,94	363,82	53,15	95,78
	5	394,79	48,82	8,00	84,77	389,55	58,87	95,78
2003	1	461,34	-	-	74,08	273,48	103,41	268,91
	2	461,34	18,64	3,00	79,52	327,99	56,31	268,91
	3	461,34	31,07	5,00	81,52	340,42	54,26	268,91
	4	461,34	41,42	7,00	82,52	350,77	52,65	268,91
	5	461,34	81,04	13,00	83,45	428,99	42,48	268,91
2004	1	461,74	-	-	58,26	228,69	159,54	98,83
	2	461,74	55,50	9,00	75,91	358,08	54,70	98,83
	3	461,74	92,50	15,00	77,91	395,09	49,58	98,83
	4	461,74	123,34	21,00	79,71	425,92	45,99	98,83
	5	461,74	123,79	21,00	82,85	451,42	50,37	98,83
2005	1	377,18	-	-	81,12	282,10	65,69	426,06
	2	377,18	0,00	0,00	87,44	301,78	43,00	426,06
	3	377,18	30,48	5,00	87,44	332,27	39,06	426,06
	4	377,18	40,64	6,00	87,44	342,43	37,90	426,06
	5	377,18	41,05	7,00	85,61	368,12	42,52	426,06
2006	1	381,72	-	-	68,98	249,34	95,86	43,23
	2	381,72	18,63	3,00	72,37	293,32	59,95	43,23
	3	381,72	31,05	5,00	73,31	305,74	57,51	43,23
	4	381,72	41,40	7,00	77,18	316,09	55,63	43,23
	5	381,72	80,66	13,00	81,93	378,37	54,04	43,23
2007	1	497,36	-	-	70,38	285,61	121,77	137,74
	2	497,36	55,80	9,00	74,15	384,95	58,05	137,74
	3	497,36	93,01	16,00	78,15	422,15	52,93	137,74
	4	497,36	119,01	20,00	81,17	453,15	49,31	137,74
	5	497,36	124,09	21,00	89,96	487,40	49,70	137,74
2008	1	304,08	-	-	91,76	279,84	24,24	454,92
	2	304,08	0,00	0,00	91,76	279,84	24,24	454,92

	3	304,08	0,00	0,00	91,76	279,84	24,24	454,92
	4	304,08	0,00	0,00	91,76	279,84	24,24	454,92
	5	304,08	0,00	0,00	91,76	279,84	24,24	454,92
2009	1	297,80	-	-	85,14	253,94	43,86	223,38
	2	297,80	0,00	0,00	85,14	253,94	43,86	223,38
	3	297,80	0,00	0,00	85,14	253,94	43,86	223,38
	4	297,80	0,00	0,00	85,14	253,94	43,86	223,38
	5	297,80	0,00	0,00	85,14	253,94	43,86	223,38
2010	1	281,87	-	-	86,92	249,25	32,62	135,39
	2	281,87	0,00	0,00	86,92	249,25	32,62	135,39
	3	281,87	0,00	0,00	86,92	249,25	32,62	135,39
	4	281,87	0,00	0,00	86,92	249,25	32,62	135,39
	5	281,87	0,00	0,00	86,92	249,25	32,62	135,39
2011	1	272,44	-	-	88,66	243,61	28,83	295,99
	2	272,44	0,00	0,00	88,66	243,61	28,83	295,99
	3	272,44	0,00	0,00	88,66	243,61	28,83	295,99
	4	272,44	0,00	0,00	88,66	243,61	28,83	295,99
	5	272,44	0,00	0,00	88,66	243,61	28,83	295,99
2012	1	387,38	-	-	79,56	224,03	75,34	332,20
	2	387,38	18,51	3,00	84,67	273,67	36,20	332,20
	3	387,38	30,85	5,00	85,71	286,01	34,64	332,20
	4	387,38	41,14	7,00	87,77	296,29	33,44	332,20
	5	387,38	82,10	14,00	89,34	365,37	28,23	332,20
2013	1	305,42	-	-	83,73	258,84	46,58	227,26
	2	305,42	0,00	0,00	83,73	258,84	46,58	227,26
	3	305,42	0,00	0,00	83,73	258,84	46,58	227,26
	4	305,42	0,00	0,00	83,73	258,84	46,58	227,26
	5	305,42	0,00	0,00	83,73	258,84	46,58	227,26
2014	1	371,74	-	-	70,97	204,71	99,03	260,46
	2	371,74	36,75	6,00	74,93	287,71	37,55	260,46
	3	371,74	61,25	10,00	79,78	312,21	34,61	260,46
	4	371,74	78,67	13,00	84,93	332,63	32,48	260,46
	5	371,74	83,29	14,00	86,27	358,37	33,72	260,46
2015	1	470,56	-	-	63,54	219,93	152,64	205,18
	2	470,56	56,58	9,00	72,80	356,33	44,94	205,18
	3	470,56	94,30	16,00	79,49	394,04	40,64	205,18
	4	470,56	119,73	20,00	82,80	425,48	37,64	205,18
	5	470,56	123,79	21,00	84,82	453,34	38,94	205,18
2016	1	501,13	-	-	47,86	173,68	211,83	16,01
	2	501,13	55,56	9,00	70,91	337,29	53,45	16,01
	3	501,13	92,60	15,00	74,91	374,33	48,16	16,01
	4	501,13	123,47	21,00	81,97	405,19	44,49	16,01
	5	501,13	163,53	28,00	83,66	474,45	41,42	16,01
2017	1	394,24	-	-	68,68	205,97	104,27	117,27
	2	394,24	36,90	6,00	72,18	282,02	47,56	117,27

	3	394,24	61,50	10,00	80,08	306,62	43,74	117,27
	4	394,24	82,00	14,00	84,17	327,12	41,00	117,27
	5	394,24	82,89	14,00	85,38	349,98	43,65	117,27
2018	1	371,79	-	-	68,21	202,32	119,47	230,27
	2	371,79	36,77	6,00	78,10	292,17	45,98	230,27
	3	371,79	61,29	10,00	81,30	316,69	42,42	230,27
	4	371,79	75,72	13,00	84,71	337,12	39,85	230,27
	5	371,79	82,98	14,00	85,40	362,25	41,72	230,27
2019	1	401,42	-	-	56,73	161,46	162,96	71,52
	2	401,42	55,10	9,00	64,47	301,08	42,06	71,52
	3	401,42	91,83	15,00	79,89	337,81	37,49	71,52
	4	401,42	117,44	20,00	81,17	368,42	34,37	71,52
	5	401,42	123,66	21,00	83,58	391,54	36,69	71,52

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). A ETC total é a evapotranspiração de cultura em mm; LAT a lâmina aplicada total em mm; NDI o número de dias de irrigação; AMS o armazenamento médio de água no solo em mm; ETR total a evapotranspiração real simulada em mm; DHA o déficit hídrico acumulado em mm e o EHA o excedente hídrico acumulado em mm.

Por ser uma variável que estima a máxima perda de água da cultura da soja, a ETC foi igual entre os tratamentos (em todos os anos). A ETC máxima do período para o CAR1 foi de 504,52mm no ano de 2016, enquanto a ETC mínima do período foi encontrada no ano de 2011, com valor de 272,58mm. Os valores de máximo e mínimo foram verificados para o CAR2 nos mesmos anos, em que a ETC máxima foi de 501,13mm no ano de 2016 e ETC mínima de 272,58 no ano de 2011.

Para ETR, houve variação entre tratamentos em todas as simulações e ambas as localidades. Os valores de ETR foram sempre menores no tratamento 1 e maiores, progressivamente, no tratamento 5. A maior ETR também ocorreu em 2016. Os valores máximos obtidos estavam no tratamento 5, apresentando $ETR_{CAR1}=474,01\text{mm}$ e $ETR_{CAR2}=474,45\text{mm}$. O menor valor de ETR também ocorreu em 2016 apenas para o tratamento 1 em ambos os pontos. O valor encontrado foi de $ETR_{CAR1}=173,41\text{mm}$ e $ETR_{CAR2}=173,68\text{mm}$ devido a baixa precipitação, alta temperatura e alta demanda atmosférica por água.

Notou-se que houve uma redução de déficit hídrico acumulado (DHA) nos tratamentos, em que sempre foi maior no tratamento 1 e menor no tratamento 5. No ano de 2016 houve o maior DHA do período, para ambas as coordenadas, com valor de $DHA=211,83\text{mm}$. Em 2011, o menor valor de déficit foi obtido, também para os CAR1 e CAR2, no valor de $DHA=28,83\text{mm}$.

O excedente hídrico acumulado (EHA) não variou entre os tratamentos nas duas localidades, apenas de um ano para outro. O mínimo valor de EHA foi de $EHA_{CAR1}=16,01\text{mm}$ e

$EHA_{CAR2}=16,01\text{mm}$ para o ano de 2016 e o máximo valor de $EHA_{CAR1}=454,92\text{mm}$ e $EHA_{CAR2}=454,78\text{mm}$ em 2008. Observou-se que os valores de EHA ocorreram em ordem diretamente proporcional aos valores de precipitação, em que anos de maior P apresentaram maior EHA, com a recíproca também verdadeira. Neste caso, para o ano de 2016, o valor de P foi o menor observado em todo período, com precipitação média anual de $P_{CAR1}=807,84\text{mm}$ e $P_{CAR2}=809,13\text{mm}$ e precipitação útil (agosto até março) de, aproximadamente, 650mm para ambas as propriedades. Em 2008, ano de maior EHA demonstraram $P_{CAR1}=1411,24\text{mm}$, $P_{CAR2}=1413,78\text{mm}$ e precipitação útil de, aproximadamente, 1050mm para as duas coordenadas.

Durante o período avaliado, apenas os anos 2008, 2009, 2010, 2011 e 2013 não apresentaram necessidade de irrigação para ambas as localidades. Nestes anos não houve secamento do solo abaixo de 50mm da capacidade de armazenamento ($CAD \leq AFD$) que justificasse a aplicação de água pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação.

As lâminas médias anuais variaram conforme os tratamentos (tabelas 8 e 9), em que houve presença de aplicação de água apenas nos tratamentos 2, 3, 4 e 5. A quantidade foi crescente, em que houve maior LAT no tratamento 5 e menor no tratamento 1 para todas as simulações dos pontos CAR1 e CAR2.

Tabela 8 – Resultados médios anuais obtidos pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para o ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).

Tratamentos	ETC total	LAT	NDI	AMS	ETR total	DHA	EHA
1	380,00	-	-	74,01	241,59	93,12	202,20
2	380,00	25,95	4	83	302,38	57,59	202,20
3	380,00	44,78	7	83,02	321,21	57,08	202,20
4	380,00	58,48	10	83,55	336,13	57,02	202,20
5	380,00	68,17	12	84,30	365,82	56,81	202,20
Máximo	-	68,17	12	84,30	364,82	93,12	-
Mínimo	-	25,95	4	74,01	241,59	56,81	-
D.P.	-	18,31	4,77	4,32	46,10	15,99	-
C.V.	-	3,66	0,95	0,86	9,22	3,20	-

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). Máximo e mínimo representam os maiores e menos valores da coluna, D.P. é o desvio padrão da coluna e C.V. é o coeficiente de variação da coluna. A ETC total é a evapotranspiração de cultura em mm; LAT a lâmina aplicada total em mm; NDI o número de dias de irrigação; AMS o armazenamento médio de água no solo em mm; ETR total a evapotranspiração real simulada em mm; DHA o déficit hídrico acumulado em mm e o EHA o excedente hídrico acumulado em mm.

Tabela 9 – Resultados médios anuais obtidos pelo balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação para o ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).

Tratamentos	ETC total	LAT	NDI	AMS	ETR total	DHA	EHA
1	387,47	-	-	73,86	242,33	94,39	204,66
2	387,47	25,95	5	79,33	303,93	44,82	204,66
3	387,47	44,77	8	82,22	322,76	42,25	204,66
4	387,47	58,29	10	84,28	337,68	40,78	204,66
5	387,47	68,52	12	85,74	366,35	40,49	204,66
Máximo	-	68,52	12	85,74	366,35	94,39	-
Mínimo	-	25,95	5	73,86	242,33	40,49	-
D.P.	-	18,40	2,99	4,70	46,40	23,25	-
C.V.	-	3,68	0,60	0,74	9,28	4,69	-

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). Máximo e mínimo representam os maiores e menos valores da coluna, D.P. é o desvio padrão da coluna e C.V. é o coeficiente de variação da coluna. A ETC total é a evapotranspiração de cultura em mm; LAT a lâmina aplicada total em mm; NDI o número de dias de irrigação; AMS o armazenamento médio de água no solo em mm; ETR total a evapotranspiração real simulada em mm; DHA o déficit hídrico acumulado em mm e o EHA o excedente hídrico acumulado em mm.

Houve pouca variação nas lâminas aplicadas entre as duas propriedades. Comparativamente, a média anual da LAT_{CAR1} dos tratamentos 2, 3, 4 e 5 foi menor em apenas 0,0734% se comparado a média anual das mesmas lâminas de LAT_{CAR2} , com a maior superioridade encontrada entre a média anual dos tratamentos 5 de 0,41mm. Dessa forma, entre localidades, a média anual de dias de irrigação também quase se manteve, com diferença superior de 1 dia para os tratamentos 2 e 3 do CAR2 em relação ao CAR1.

Entre tratamentos houve aumento progressivo da LAT média anual, em que $LAT_1=0$ e $LAT_2 < LAT_3 < LAT_4 < LAT_5$. Este resultado se manteve nas duas coordenadas e a maior diferença foi encontrada no comparativo do LAT_2 e LAT_5 de 42,57mm do próprio CAR2. No CAR1 a diferença média anual entre os tratamentos 2 e 5 também foi a maior observada de 42,22mm.

No período de 2000 até 2019 foram aplicadas $NDI_{CAR1}=627$ lâminas e $NDI_{CAR2}=665$ lâminas, as quais foram concentradas 84% nos meses de dezembro e janeiro, especificamente no segundo decêndio de dezembro (10/12 até 20/12) e primeiro decêndio de janeiro (1/01 até 10/01). Dos outros 16%, o valor de 15% foi distribuído no terceiro decêndio de novembro (10/11 até 20/11) e apenas 1% esteve presente na primeira semana após o plantio (31/10 até 09/11).

3.2 Resultados de produtividade e aporte de carbono do material orgânico

Estão sumarizados os resultados de produtividade e aporte de carbono do material orgânico nas tabelas 10 e 11 para todas as simulações.

Tabela 10 – Resultados anuais de produtividade e aporte de carbono no solo para o ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).

Ano	Tratamentos	Y	CAPS
2000	1	2,79	2,12
	2	3,44	2,62
	3	4,63	3,52
	4	4,95	3,42
	5	5,02	3,47
2001	1	2,52	1,91
	2	2,90	2,21
	3	3,43	2,61
	4	5,55	3,84
	5	5,41	3,74
2002	1	3,12	2,37
	2	4,00	2,37
	3	4,83	2,37
	4	5,01	2,37
	5	5,69	2,37
2003	1	3,21	2,44
	2	3,84	2,92
	3	4,73	3,82
	4	5,43	3,76
	5	5,77	3,99
2004	1	1,92	1,46
	2	2,38	1,81
	3	2,79	2,51
	4	3,01	2,34
	5	5,01	3,60
2005	1	2,97	2,26
	2	3,27	2,49
	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94
2006	1	3,27	2,48
	2	3,27	2,49
	3	3,68	2,80
	4	4,72	3,27
	5	5,76	3,98
2007	1	2,97	2,26
	2	3,27	2,49

	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94
	1	2,97	2,26
	2	3,27	2,49
2008	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94
	1	2,97	2,26
	2	3,27	2,49
2009	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94
	1	2,97	2,26
	2	3,27	2,49
2010	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94
	1	2,77	2,11
	2	3,02	2,29
2011	3	3,48	2,65
	4	3,89	2,69
	5	5,10	3,53
	1	3,98	3,03
	2	4,10	3,12
2012	3	5,01	3,60
	4	5,56	3,85
	5	6,47	4,47
	1	2,97	2,26
	2	3,27	2,26
2013	3	3,99	2,26
	4	4,57	2,26
	5	5,70	2,26
	1	2,76	2,10
	2	2,76	2,10
2014	3	3,97	3,02
	4	4,17	2,89
	5	5,31	3,67
	1	3,39	2,58
	2	2,97	2,26
2015	3	3,31	2,12
	4	3,49	2,08
	5	5,90	4,08
	1	2,97	2,26
2016	2	3,27	2,49

	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94
	1	2,97	2,26
2017	2	3,27	2,49
	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94
	1	2,97	2,26
2018	2	3,27	2,49
	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94
	1	2,52	2,26
2019	2	3,27	2,49
	3	3,99	3,03
	4	4,57	3,16
	5	5,70	3,94

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). Y representa a produtividade de grãos de soja em Mg.ha⁻¹ e CAPS representa o carbono aportado no solo em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.

Tabela 11 – Resultados anuais de produtividade e aporte de carbono no solo para o ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).

Ano	Tratamentos	Y	CAPS
2000	1	2,62	1.99
	2	3,21	2.45
	3	4,27	3.25
	4	4,43	3.06
	5	4,57	3.16
2001	1	2,65	2.02
	2	3,36	2.56
	3	4,51	3.43
	4	4,77	3.30
	5	5,33	3.69
2002	1	1,80	2.29
	2	2,08	2.65
	3	3,05	3.52
	4	4,09	3.31
	5	4,57	4.20
2003	1	1,80	1.37
	2	2,08	1.58
	3	3,05	2.32
	4	4,10	2.84
	5	5,12	3.54
2004	1	2,62	1.99
	2	3,13	2.38
	3	4,74	3.60
	4	5,06	3.50
	5	5,42	3.75
2005	1	2,97	2.26
	2	3,27	2.49
	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
2006	1	2,70	2.05
	2	3,44	2.62
	3	3,93	2.99
	4	4,84	3.35
	5	5,19	3.59
2007	1	2,97	2.26
	2	3,27	2.49
	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
2008	1	2,97	2.26
	2	3,27	2.49

	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
	1	2,97	2.26
2009	2	3,27	2.49
	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
	1	2,97	2.26
2010	2	3,27	2.49
	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
	1	2,89	2.20
2011	2	3,45	2.62
	3	4,53	3.45
	4	5,62	3.89
	5	6,10	4.22
	1	3,02	1.91
2012	2	3,48	2.40
	3	4,74	3.49
	4	5,62	3.83
	5	6,54	4.52
	1	2,97	2.26
2013	2	3,27	2.49
	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
	1	2,20	1.67
2014	2	2,49	1.90
	3	3,92	2.99
	4	4,09	2.83
	5	5,36	3.71
	1	2,54	1.93
2015	2	3,28	2.49
	3	4,60	3.50
	4	5,37	3.72
	5	5,75	3.97
	1	2,97	2.26
2016	2	3,27	2.49
	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
2017	1	2,97	2.26
	2	3,27	2.49

	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
	1	2,52	1.92
	2	3,27	2.49
2018	3	3,99	3.03
	4	4,57	3.16
	5	5,70	3.94
	1	2,62	1.99
	2	3,21	2.45
2019	3	4,27	3.25
	4	4,43	3.06
	5	4,57	3.16

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). Y representa a produtividade de grãos de soja em Mg.ha⁻¹ e CAPS representa o carbono aportado no solo em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.

Para o CAR1 a média anual de produtividade foi, nos tratamentos, de: Y₁=2,95 Mg.ha⁻¹, Y₂=3,27 Mg.ha⁻¹, Y₃=3,99 Mg.ha⁻¹, Y₄=4,57 Mg.ha⁻¹ e Y₅=5,63 Mg.ha⁻¹. Entre os anos avaliados nesta coordenada, a variável Y apresentou coeficiente de variação de 13,50%, 12%, 13,25%, 13,75% e 5,53% respectivamente para os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5. O ano de maior produtividade do período ocorreu em 2012, sendo Y_{1-MÁX.}=3,99 Mg.ha⁻¹, Y_{2-MÁX.}=4,10 Mg.ha⁻¹, Y_{3-MÁX.}=5,02 Mg.ha⁻¹, Y_{4-MÁX.}=5,56 Mg.ha⁻¹ e Y_{5-MÁX.}=6,46 Mg.ha⁻¹. O valor mínimo de produtividade do período foi observado no ano de 2004, sendo: Y₁=1,96 Mg.ha⁻¹, Y₂=2,38 Mg.ha⁻¹, Y₃=2,79 Mg.ha⁻¹, Y₄=3,01 Mg.ha⁻¹ e Y₅=5,01 Mg.ha⁻¹. O desvio padrão (d.p.) para todos os tratamentos foi semelhante, com a média de d.p._{méd.}=0,45 Mg.ha⁻¹

Notou-se, para o CAR1, que o ganho de produtividade com o uso da irrigação foi de 2,68 Mg.ha⁻¹, em que houve aumento de 90,85% de grãos de soja se comparado o tratamento 1 ao 5. Quando mantida a comparação somente entre os tratamentos irrigados, obteve-se um incremento de produtividade de 0,893 Mg.ha⁻¹ (14,88 sc.ha⁻¹) a cada aplicação de 14,30mm de água no ciclo da cultura da soja.

Para o CAR2 a média anual de produtividade foi, nos tratamentos, de: Y₁=2,73 Mg.ha⁻¹, Y₂=3,18 Mg.ha⁻¹, Y₃=4,14 Mg.ha⁻¹, Y₄=4,72 Mg.ha⁻¹ e Y₅=5,62 Mg.ha⁻¹. O coeficiente de variação, respectivos para os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5 foram de 11,82%, 10,57%, 9,53%, 8,82% e 7,37%, com d.p._{méd.}=0,38 Mg.ha⁻¹. A maior produtividade ocorreu no ano de 2012, com valor médio (entre tratamentos) menor em 6,88% quando comparado ao CAR1. Os menores valores de produtividade foram obtidos no ano de 2002, com Y_{1-MÍN.}=1,80 Mg.ha⁻¹, Y_{2-MÍN.}=2,08 Mg.ha⁻¹, Y_{3-MÍN.}=3,05 Mg.ha⁻¹, Y_{4-MÍN.}=4,09 Mg.ha⁻¹ e Y_{5-MÍN.}=4,57 Mg.ha⁻¹.

O ganho de produtividade com uso de irrigação na coordenada 2 foi de 2,89 Mg.ha⁻¹, o que representou um incremento de 94,46% de grãos de sojas se comparado o tratamento 1 ao 5. Em comparação com o CAR1, o uso da irrigação na localidade 2 foi mais eficiente no aumento de produtividade em 3,61%. Se excluído o tratamento 1, obteve-se um aumento de produtividade de 0,963 Mg.ha⁻¹ (16,05 sc.ha⁻¹) a cada 14,19mm de água aplicados.

Houve diferença estatística na média anual de produtividade entre os tratamentos, para ambas as localidades (tabelas 12).

Tabela 12 – Comparação estatística da produtividade média anual entre os tratamentos nas localidades CAR1 e CAR2.

Tratamentos	Y _{méd.anual} (CAR1)	Y _{méd.anual} (CAR2)
1	2,95 a	2,73 a
2	3,27 a	3,18 a
3	3,99 b	4,14 b
4	4,57 b	4,72 b
5	5,70 c	5,62 c
D.P.	1,09	1,16
C.V.	26,79	28,52

Os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5 representam, respectivamente: sem irrigação, irrigação com 45% da evapotranspiração de cultura, irrigação com 75% da evapotranspiração de cultura, irrigação com 100% da evapotranspiração de cultura e irrigação com 110% da irrigação de cultura. As siglas D.P. e C.V. representam, respectivamente, o desvio padrão (Mg.ha⁻¹) e o coeficiente de variação (%). Y_{méd. anual} representa a produtividade média de soja do período de 2000 – 2019 em Mg.ha⁻¹. As letras a, b e c que acompanham o conteúdo da tabela demonstram que houve diferença estatística pela análise de variância e, em seguida, pelo teste de Tukey, ambos a p-valor=0,5.

Para todas as simulações o tratamento 5 diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, em que apontou a maior produtividade em todos os anos do período. Os tratamentos 3 e 4 não diferiram entre si e ocuparam o segundo lugar em produtividade. Os tratamentos 1 e 2 também não apresentaram diferença entre si e foram as menores produtividades observadas em todas as simulações.

Os valores de CAPS acompanharam as mesmas tendências das produtividades em todas as simulações, em que as diferenças percentuais entre localidades e tratamentos foram mantidas.

3.3 Resultados do balanço de carbono e carbono acumulado no solo

O cálculo de estoque inicial de carbono até 0,30m de profundidade para o CAR1 foi de SOC_{stocki}=57,98 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ e para o CAR2 de SOC_{stocki}=141,78 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹. Na tabela 13 e 14 estão os resultados de balanço de carbono do solo (BCS), em que os valores negativos representaram a perda de carbono do estoque e os valores positivos a entrada de carbono para 0,30m de profundidade.

Tabela 13 – Resultados do balanço de carbono do solo para as localidades CAR1 e CAR2 de São Desidério-BA nos anos de 2000 – 2019.

Ano	Tratamentos	BCS (CAR1)	BCS (CAR2)
2000	1	-0,75	-1,88
	2	-0,29	-1,47
	3	0,45	-0,73
	4	0,46	-0,94
	5	0,53	-0,85
2001	1	-0,06	0,03
	2	0,21	0,52
	3	0,53	1,32
	4	1,66	1,17
	5	1,57	1,52
2002	1	0,35	0,28
	2	0,97	0,61
	3	0,57	1,40
	4	1,32	1,18
	5	1,74	1,99
2003	1	-0,18	-2,17
	2	0,26	-1,98
	3	1,54	-1,31
	4	0,99	-0,86
	5	1,20	-0,22
2004	1	-0,48	0,01
	2	-0,15	0,37
	3	1,08	1,48
	4	0,31	1,35
	5	1,45	1,58
2005	1	0,25	0,25
	2	0,46	0,46
	3	0,48	0,96
	4	1,05	1,05
	5	1,75	1,75
2006	1	-0,14	-1,55
	2	-0,14	-1,03
	3	0,96	-0,69
	4	0,54	-0,40
	5	1,19	-0,18
2007	1	0,25	0,25
	2	0,46	0,46
	3	0,15	0,96
	4	1,05	1,05
	5	1,75	1,75
2008	1	0,25	0,25

	2	0,46	0,46
	3	0,96	0,96
	4	1,05	1,05
	5	1,75	1,75
	1	-0,34	-1,36
2009	2	-0,14	-1,15
	3	0,96	-0,66
	4	0,45	-0,57
	5	1,16	0,14
	1	0,25	0,25
2010	2	0,46	0,46
	3	0,36	0,96
	4	1,05	1,05
	5	1,75	1,75
	1	0,11	0,20
2011	2	0,28	0,58
	3	0,96	1,33
	4	0,62	1,70
	5	1,38	2,00
	1	0,36	-1,68
2012	2	0,44	-1,23
	3	0,61	-0,24
	4	1,07	0,04
	5	1,63	0,66
	1	0,25	0,25
2013	2	0,46	0,46
	3	0,88	0,96
	4	1,05	1,05
	5	1,75	1,75
	1	0,11	-0,28
2014	2	0,11	-0,08
	3	0,96	0,91
	4	0,80	1,05
	5	1,51	1,54
	1	-0,05	-1,66
2015	2	-0,35	-1,15
	3	-0,47	-0,23
	4	-0,52	0,75
	5	1,28	0,17
	1	0,25	0,25
2016	2	0,46	0,46
	3	0,96	0,96
	4	1,05	-0,07
	5	1,75	1,75
2017	1	0,25	0,25

	2	0,46	0,46
	3	0,96	0,96
	4	1,05	1,05
	5	1,75	1,75
2018	1	-0,34	0,25
	2	-0,13	0,46
	3	0,36	0,96
	4	0,45	1,05
	5	1,75	1,75
2019	1	0,25	-1,67
	2	0,46	-1,15
	3	0,96	-0,66
	4	1,05	-0,57
	5	1,16	0,14

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). O BCS representa o balanço de carbono no solo em $\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$, em que $\text{BCS}<0$ são perdas de carbono do estoque do solo e $\text{BCS}>0$ são ganhos de carbono no estoque do solo, ambos a 0,30m de profundidade.

Os resultados de BCS apontaram que houve incremento de C no solo com uso da irrigação. Para todas as simulações e localidades, o tratamento 1 teve o menor BCS entre os tratamentos, se mostrando negativo em 40% dos resultados. O tratamento 2 apresentou uma redução de $\text{BCS}<0$ em 10% quando comparado ao tratamento 1, em que apenas 30% dos dados apontaram perda de C no solo; o tratamento 2 do CAR2 manteve a proporção de 40% dos dados com $\text{BCS}<0$. No tratamento 3, apenas o ano de 2016 acusou $\text{BCS}<0$ para o CAR1 (5% dos dados) e, para o CAR2, 35% do BCS foi menor que zero. Na localidade 1 (CAR1), o $\text{BCS}<0$ persistiu no ano de 2016 e, para o CAR2, o $\text{BCS}<0$ foi reduzido (em relação ao tratamento 3) de 35% para 30%. Por fim, no tratamento 5, os resultados não apontaram $\text{BCS}<0$ no CAR1, tendo, em todos os anos, acúmulo de carbono no solo; para o CAR2, o $\text{BCS}<0$ ocorreu apenas nos anos de 2000, 2003 e 2006.

As tabelas 14 e 15 demonstram a emissão total média e a participação média das emissões nos diferentes tratamentos do cultivo da soja. Os valores representam a quantidade de carbono que é emitida para atmosfera em $\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$ em função dos manejos previamente selecionados para produção (vide tópico 2.5 do Material e Métodos).

Tabela 14 – Emissão média anual total e participação média anual das emissões nos tratamentos 1 a 5 para o ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).

Tratamentos	Emissão total	CDEFF	CDEL	NOEFF	EAG
1	2,50	3,85	8,79	54,81	32,55
2	2,52	3,82	8,72	55,18	32,28
3	2,57	3,75	8,55	56,02	31,68
4	2,61	3,69	8,43	56,68	31,21
5	2,68	3,59	8,20	57,83	30,38

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). A emissão total é a soma das emissões do ano em $\text{Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$; CDEFF representa a fração do total de emissão proveniente apenas da queima do combustível fóssil em %; CDEL representa a fração do total de emissão proveniente apenas da aplicação de calcário dolomítico em %; NOEFF representa a fração do total de emissão proveniente apenas das entradas de nitrogênio em %; EAG representa a fração da emissão total do manejo de aração e gradagem do solo em %.

As emissões totais médias se comportaram de maneira crescente entre os tratamentos (tabela 14). O desvio padrão foi de $0,070 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{ha}^{-1}$, com coeficiente de variação de 2,81%. Notou-se que, para cultivo de soja no CAR1, as emissões associadas ao manejo de nitrogênio da cultura foram as que apresentaram maior porcentagem. Se subdividido somente o NOEFF, observou-se que a escala crescente de emissão seguiu o padrão: emissão direta ($\text{N-N}_2\text{O}$) com média de 3,50%, emissão da fixação biológica $\text{N-N}_{\text{fix}}\text{-N}_2\text{O}$ com média de 11% e emissão indireta ($\text{N-NH}_x\text{-N}_2\text{O}$) com média de 41,10%. Entre os tratamentos, o desvio padrão foi de 1,20% e o coeficiente de variação de 2,10% para NOEFF, com máximo valor no tratamento 5 (57,83%) e mínimo no tratamento 1 (54,81%).

Embora as emissões proveniente da queima do combustível fóssil, calcário e aração e gradagem demonstrarem baixo desvio entre os tratamentos ($d.p._{CDEFF}=0,11\%$; $d.p._{CDEL}=0,22\%$; $d.p._{EAG}=0,86\%$), os mesmos valores de produto/ferramenta (diesel S500; calcário; arado/grade) foram mantidos no manejo dos anos. Essa variação foi sempre decrescente entre os tratamentos (maior no 1 e menor no 5) e ocorreu em função do aumento de NOEFF, o qual está diretamente relacionada com o aumento de produtividade. Foi constatado que a maior produtividade resultou em um maior NOEFF, o que diluiu a proporção dos outros agentes emissivos dentro do sistema de produção.

Por ser um produto de solubilidade muito baixa (em torno de $0,14 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) e o Latossolo Amarelo Distrófico Típico do CAR1 possuir um V% (em torno de 17%) que demandou $1,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de calcário dolomítico, a modelagem promoveu a solubilidade de forma lenta e a emissão foi gradativamente ocorrendo ao longo dos anos.. Desta forma, embora a emissão do calcário tenha

ocorrido apenas no ano de aplicação do produto no valor de 0,60 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, a média anual de emissão foi de, aproximadamente, 0,22 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.

Tabela 15 - Emissão média anual total e participação média anual das emissões nos tratamentos 1 a 5 para o ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).

Tratamentos	Emissão total	CDEFF	CDEL	NOEFF	EAG
1	2,86	3,37	20,81	47,36	28,46
2	2,89	3,33	20,59	47,92	28,15
3	2,95	3,26	20,14	49,05	27,55
4	2,99	3,21	19,88	49,72	27,19
5	3,05	3,15	19,49	50,71	26,65

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). A emissão total é a soma das emissões do ano em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹; CDEFF representa a fração do total de emissão proveniente apenas da queima do combustível fóssil em %; CDEL representa a fração do total de emissão proveniente apenas da aplicação de calcário dolomítico em %; NOEFF representa a fração do total de emissão proveniente apenas das entradas de nitrogênio em %; EAG representa a fração da emissão total do manejo de aração e gradagem do solo em %.

Assim como o CAR1, o CAR2 apresentou emissões totais médias se comportando de maneira crescente entre os tratamentos (Tabela 15). O d.p. da emissão total foi de 0,076 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, com coeficiente de variação de 2,58%. As emissões associadas ao manejo de nitrogênio da cultura também foram as que apresentaram maior fração, com máximo valor no tratamento 5 (50,71%) e mínimo no tratamento 1 (47,36%). Entre os tratamentos, o desvio padrão foi de 1,34% e o coeficiente de variação de 2,75% para NOEFF. Se subdividido somente o NOEFF, observou-se que a escala crescente de emissão seguiu o mesmo comportamento do CAR1, sendo: emissão direta (N-N₂O) com média de 3,20%, emissão da fixação biológica N-N_{fix}-N₂O com média de 10,87% e emissão indireta (N-NH_x-N₂O) com média de 35,50%.

O comportamento das emissões de CDEFF, CDEL e ECA foram, no CAR2, os mesmos encontrados no CAR1, em que se manteve a utilização dos mesmos produtos/ferramentas (diesel S500; calcário dolomítico; arado/grade), mas houve diluição dos valores de emissão em função do aumento da produtividade.

O comportamento da emissão proveniente da aplicação de calcário também foi gradativo (anualmente) e dependente dos fatores: baixa solubilidade do produto e alta demanda do solo. Para o CAR2, em que o solo foi classificado com Gleissolo Háplico Alumínico Típico, houve a necessidade de aplicação de 3,67 Mg.ha⁻¹ (V_{inicial}=4%) a cada dois anos, o que resultou na emissão média anual de 0,60 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.

Após os valores de balanço de carbono anual serem acumulados no estoque de carbono inicial do solo, obteve-se os resultados de estoque de carbono final no ano de 2019 nos tratamentos, conforme as tabelas 16 e 17.

Tabela 16 – Resultados do estoque de carbono inicial e final dos tratamentos 1 ao 5 no ponto BA-2928901-667D923BC0CD48C6AA0BE773F356883F (CAR 1).

Tratamentos	SOC _{stocki}	SOC _{stockf}
1	57,98	58,67
2	57,98	62,40
3	57,98	71,36
4	57,98	72,93
5	57,98	84,79

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). O SOC_{stocki} representa o estoque inicial de carbono no solo no ano 2000 em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹; SOC_{stockf} representa o estoque final de carbono no solo no ano de 2019.

Foi constatado um aumento de C no solo durante o período avaliado (CAR1). Os maiores incrementos ocorreram nos tratamentos 5, 4, 3, 2 e 1, respectivamente (tabela 16). A maior taxa de acúmulo (TA) de carbono no solo ocorreu no tratamento 5 de TA₅=1,47 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹, seguido do tratamento 4 de TA₄=0, Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹, do tratamento 3 de TA₃=0,73 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹, do tratamento 2 de TA₂=0,23 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹ e do tratamento 1 de TA₁=0,04 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹.ano⁻¹. Quando considerados os resultados de carbono em um pivô central de 100ha e transformando o valor totais de Mg CO_{2eq} para Mg C, notou-se que o solo recebeu, em 20 anos, uma variação de -0,03 Mg C, 0,90 Mg C, 364,93 Mg C, 407,87 Mg C e 731,08 Mg C, respectivamente para os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 17 - Resultados do estoque de carbono inicial e final dos tratamentos 1 ao 5 no ponto BA-2928901-1CE6C7B533F4452681FDDA0CDA7B9F39 (CAR 2).

Tratamentos	SOC _{stocki}	SOC _{stockf}
1	141,78	133,49
2	141,78	138,98
3	141,78	151,07
4	141,78	152,45
5	141,78	162,38

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). O SOC_{stocki} representa o estoque inicial de carbono no solo no ano 2000 em Mg CO_{2eq}.ha⁻¹; SOC_{stockf} representa o estoque final de carbono no solo no ano de 2019.

Os resultados do CAR2 mostraram que o cultivo de soja no tratamento 1 e 2 tiveram perda de carbono no solo. No tratamento 1 houve $TA_1 = -0,51 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, em que ocasionou perda de $8,29 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ha}^{-1}$ ao longo do período de 20 anos. Para o tratamento 2, o aumento de produtividade compensou o decaimento de C no solo em relação ao tratamento 1, entretanto não foi o suficiente para manter e/ou incrementar os níveis iniciais. Observou-se que houve $TA_2 = -0,22 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ e redução de $2,80 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ha}^{-1}$. Para os tratamentos 3, 4 e 5, houve incremento de C no solo nas taxas: $TA_3 = 0,44 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, $TA_4 = 0,55 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ e $TA_5 = 1,10 \text{ Mg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Da mesma forma, quando observado os resultados em um pivô central de 100ha, notou-se que o solo recebeu, em 20 anos, uma variação de $-225,92 \text{ Mg C}$, $-76,29 \text{ Mg C}$, $253,36 \text{ Mg C}$, $291,15 \text{ Mg C}$ e $561,92 \text{ Mg C}$, respectivamente para os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5.

Para ambas as localidades, houve diferença significativa (5%) nas taxas de acúmulo médias anuais de carbono (tabela 18). Para o CAR1 e CAR2 a diferença estatística significativa ocorreu da mesma forma, em que o tratamento 5 apresentou a maior taxa de acúmulo e se diferenciou dos demais tratamentos. Os tratamentos 4 e 3 não diferenciaram entre si e se destacaram como os segundo e terceiro maiores acumuladores de C no solo. Os tratamentos 2 e 1 não diferenciaram entre si e ocuparam as últimas posições na taxa de acúmulo. Para o CAR2, os tratamentos 2 e 1 tiveram apenas perda de carbono no solo ($TA < 0$).

Tabela 18 - Comparação estatística da taxa de acúmulo média anual de C entre os tratamentos nas localidades CAR1 e CAR2.

Tratamentos	TA (CAR1)	TA (CAR2)
1	0,01 a	-0,14 a
2	0,06 a	-0,06 a
3	0,20 b	0,12 b
4	0,22 b	0,15 b
5	0,40 c	0,30 c

O tratamento representado por 1 é referente ao sem irrigação (SI), representado por 2 ao 45% da evapotranspiração de cultura (45%ETC), representado por 3 ao 75% da evapotranspiração de cultura, representado por 4 ao 100% da evapotranspiração de cultura (100%ETC) e representado por 5 é 110% da evapotranspiração de cultura (110%ETC). TA representa a taxa de acúmulo de carbono no solo em Mg C , em que $TA > 0$ significa acúmulo e $TA < 0$ significa perda de carbono do solo.

Os diferentes tratamentos irrigados, respectivamente 2, 3, 4 e 5, apresentaram ganhos expressivos no carbono do solo. Com a crescente lâmina aplicada entre os tratamentos, ambas as localidades tiveram seus TA maiores do que os tratamentos sem irrigação (tratamento 1). Embora o tratamento 2 (lâmina 45%ETC) tenha sido o único a gerar valores de $TA < 0$ para a localidade 2, os valores de TA_2 ainda foram maiores em 57,14% quando comparada ao TA_1 (sem irrigação), o que representou uma perda menor de carbono estocado no solo.

4 DISCUSSÃO

A necessidade hídrica da soja produzida em São Desidério ficou, em média, entre 380 e 388mm (ETC), nas localidades CAR1 e CAR2, respectivamente (tabelas 8 e 9). Notou-se uma diferença de apenas 8mm entre os valores, o que pode ser justificado pela distância geográfica de 190km entre as duas coordenadas e a distribuição de dados meteorológicos obtidos pelo NASA-POWER. Segundo Pinker e Laszlo (1992) a distribuição geográfica da radiação global (Q_g), temperatura máxima ($T_{\text{máx.}}$), temperatura mínima ($T_{\text{mín.}}$), temperatura média ($T_{\text{méd.}}$), velocidade do vento (WS) e umidade relativa (RU) ocorrem em grid amostral de $1^\circ \times 1^\circ$, o que representa variações significativas a cada, aproximadamente, 110km de distância entre dois pontos no NASA-POWER. Apenas a variável climática Q_g variou, em média, de 1,02% e as demais ficaram estáveis entre as duas localidades (tabela 19).

Tabela 19 – Variabilidade dos dados climáticos entre as localidades CAR1 e CAR2 de São Desidério – BA; média dos 20 anos.

Localidades	Q_g	$T_{\text{máx.}}$	$T_{\text{mín.}}$	$T_{\text{méd.}}$	WS	RU
CAR1	25,03	30,03	19,14	24,59	4,10	62,54
CAR2	25,29	30,03	19,14	24,59	4,10	62,54
Diferença percentual	1,02	0	0	0	0	0

A diferença percentual é relativa ao CAR1 e CAR2, em que o valor se encontra em %. Q_g representa a radiação global média em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; $T_{\text{máx.}}$ representa a temperatura máxima média em $^\circ\text{C}$; $T_{\text{mín.}}$ representa a temperatura mínima média em $^\circ\text{C}$; $T_{\text{méd.}}$ representa a temperatura média em $^\circ\text{C}$; WS representa a velocidade do vento em m.s^{-1} ; RU representa a umidade relativa em %.

A precipitação apresentou diferença de 12,99% entre ambas as coordenadas, sendo, a média anual do CAR1 de 1131,20mm e, no CAR2, de 984,64mm. A diferença de 146,55mm pode ser explicada pela alta variabilidade da precipitação, a qual, segundo Silva et al. (2021), apresentou coeficiente de variação de 69% no período chuvoso (outubro até março) do nordeste brasileiro para os anos de 1935 – 2000 na plataforma HIDROWEB. Os autores também apontaram que durante o período da seca (abril até setembro) o coeficiente de variação da precipitação é menor, atingindo valores de 30%. Neste trabalho, pela diferença de apenas 8mm na ETC, constatou-se que a variabilidade da precipitação pouco afetou a demanda evapotranspirativa quando comparada as duas localidades, garantindo proximidade nos resultados médios do balanço hídrico sequencial climatológico e de irrigação (tabelas 8 e 9).

Valores de ETC de 441mm foram observados em ambiente de Cerrado no município de Planaltina (DF) pelos autores Alves et al. (2021b), com ETC diária variando entre 2,10 e 7,10mm. Em relação a eles, São Desidério apresentou redução de 12,92% na ETC, o que foi justificado pela diferença entre os dados climáticos de Planaltina. Foi constatado pelo trabalho dos autores que a

precipitação foi maior em, aproximadamente, 370mm e temperatura média menor de 2,59°C. As máximas e mínimas diárias de ETC em São Desidério também variaram em relação aos autores, sendo, na média anual, de 1,89 mm.dia⁻¹ e 10,59 mm.dia⁻¹ no CAR1 e, no CAR2, de 0,94 mm.dia⁻¹ e 9,54 mm.dia⁻¹. Estes valores foram observados, aproximadamente, para os dias 55 e 101 após o plantio para ambos os trabalhos, os quais estão associados a fase reprodutiva da cultura.

Quando avaliado somente o ETR, este trabalho apontou que os maiores valores foram observados em ambientes com maior disponibilidade de água, em que o tratamento 5 apresentou maior ETR e o tratamento 1 menor ETR (tabelas 8 e 9). Em todas as simulações, nenhum valor de ETR atingiu a ETC do ano, demonstrando que ainda existiu um déficit hídrico relativo mesmo com a presença de irrigação. Quando comparado a ETR/ETC, observou-se que, para o CAR1, o déficit relativo foi de 36,42%, 20,42%, 15,47%, 11,54% e 3,73%, na média anual dos tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente. Para a localidade 2, os valores percentuais foram de 37,74%, 21,56%, 16,70%, 12,85% e 5,45% respectivamente para os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5. A justificativa para presença de um o déficit hídrico maior de 1,40% no CAR2 em relação ao CAR1 também está na menor precipitação média anual da coordenada.

Durante o período após semeadura, as maiores e menores ETR também foram observadas nos dias 55 e 101 do ciclo, em que os valores respectivos foram de, aproximadamente, 7,00 mm.dia⁻¹ e 0,70 mm.dia⁻¹ para ambas as localidades. Os autores Souza et al. (2016), em experimento de soja irrigada em Paragominas (PA) no ano de 2007/2008, também constataram que as maiores demandas evapotranspirativas ocorreram 56 dias após a semeadura e, as menores, 110 dias após a semeadura. Isso ocorreu pois as datas coincidiram com os maiores e menores valores de índice de área foliar ($IAF_{máx.}=3,98$; $IAF_{mín.}=0,20$) do ciclo, além das datas estarem associadas as fases fenológicas de maior exigência de água e senescência (R5 (enchimento de grãos) e R7-R8 (maturação) da cultura; figura 1).

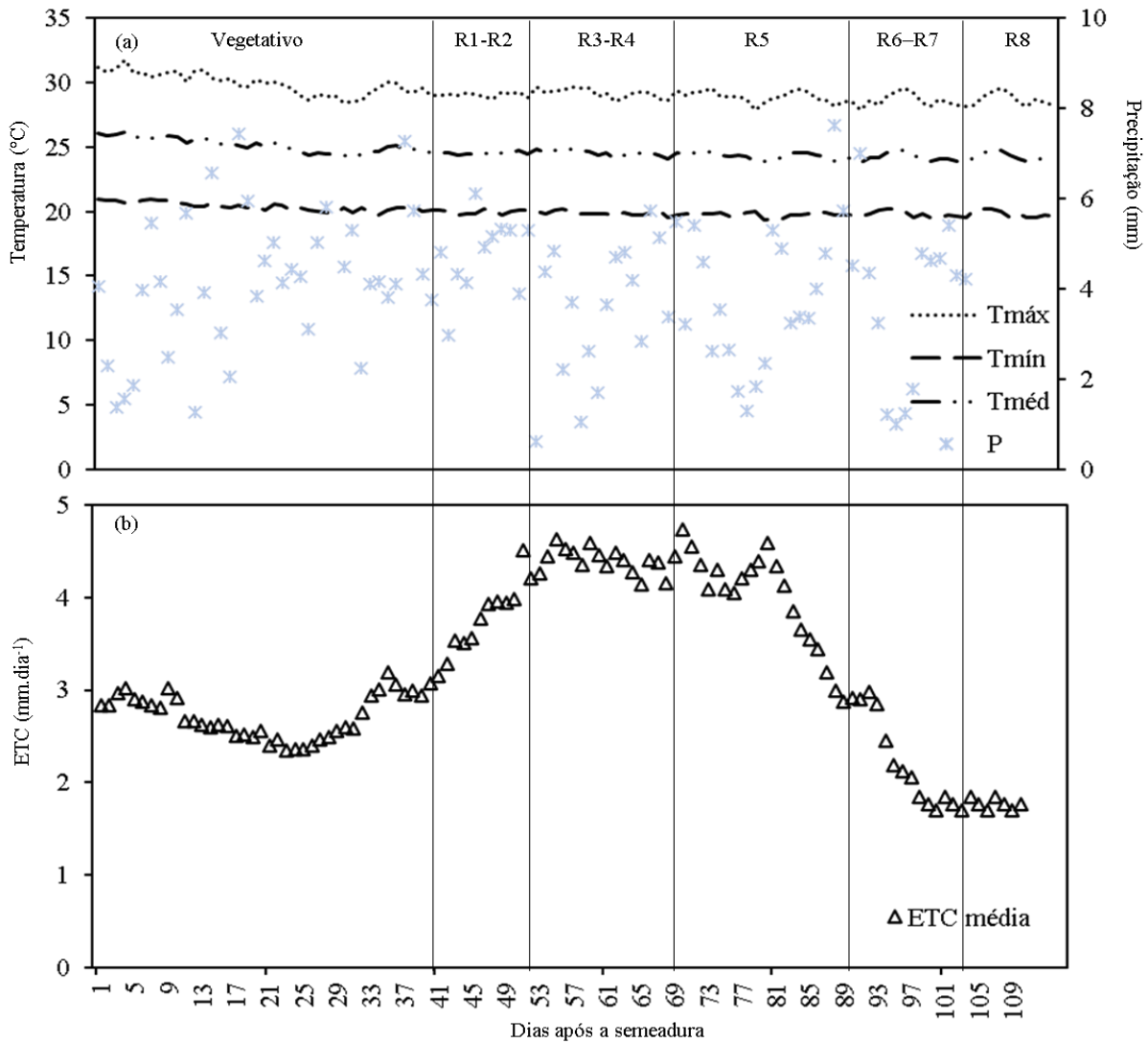


Figura 1 – Condições meteorológicas médias anuais do município de São Desidério ao longo do ciclo de produção de soja. Regime térmico e regime hídrico (a) e evapotranspiração de cultura (b). As linhas verticais marcam as mudanças de fase fenológica da cultura.

As altas ETC e ETR observadas no dia 55 após a semeadura justificaram a distribuição de 84% das lâminas totais aplicadas no período, para ambas as localidades, no segundo decêndio de dezembro (10/12 até 20/12). O maior volume de irrigação ocorreu na fase crítica ao déficit hídrico do cultivo, o que justificou os incrementos crescentes de produtividade com o aumento das lâminas aplicadas (Tabela 12). Embora o atual trabalho tenha demonstrado que houve diferença significativa (5% de confiança) de produtividade apenas no tratamento com lâmina superior a ETC (trat. 5), em nenhuma simulação houve $Y_{\text{TRAT1}} > Y_{\text{TRAT2}} > Y_{\text{TRAT3}} > Y_{\text{TRAT4}} > Y_{\text{TRAT5}}$. Desta forma, é seguro dizer que a irrigação é uma técnica funcional e que, mesmo com baixa adição de água na lavoura, existe viabilidade de rendimento no sistema. O trabalho de Alves et al. (2021a) para Unidade de Referência no Manejo de Água (URMA) de Planaltina (DF), bioma Cerrado, também constatou que a irrigação tem papel fundamental no incremento de produtividade quando é

realizada nas fases reprodutivas da lavoura, no qual o tratamento com déficit do solo entre 80 – 100% possuiu produtividade menor em 0,60 Mg.ha⁻¹, 1,40 Mg.ha⁻¹, 1,65 Mg.ha⁻¹ e 1,70 Mg.ha⁻¹ quando comparado aos tratamentos com restrição hídrica de água no solo de 60 – 80%, 40 – 60%, 20 – 40% e 0 – 20% respectivamente. Assim como no atual trabalho, os autores encontraram que o cultivo de soja sem irrigação (outubro a março) possuiu o mesmo desempenho da soja irrigada com déficit hídrico do solo de 80-100%, todavia isto tem que ocorrer apenas no estágio vegetativo do ciclo, apresentando valores de produtividade de até 3,40 Mg.ha⁻¹. Apesar disso, tanto os autores quanto o atual trabalho não recomendam a troca do sistema irrigado pelo sequeiro devido à incerteza e imprevisibilidade da precipitação, a qual pode ser insuficiente nos estádios reprodutivos da cultura. Para os autores e em situação de restrição hídrica, se faz necessária a manutenção do déficit no solo no mínimo de 40 - 60%, enquanto a atual pesquisa recomenda a manutenção da lâmina no mínimo 75% da ETC.

Alves et al. (2021a) apontaram que não existiu diferença na produtividade em lâminas que apresentam molhamento do solo nos níveis iguais ou inferiores ao déficit hídrico de 60 – 80%, enquanto este trabalho apontou diferença produtiva em lâminas excedentes (tratamento 5). Isto foi observado pois o modelo de balanço hídrico proposto pelos autores possui enfoque diretamente no solo, tendo como essência os parâmetros: capacidade de armazenamento de água do solo, evapotranspiração real e profundidade do solo. Já este trabalho foi feito com a metodologia de balanço hídrico proposta por Thornthwaite e Mather (1955), que possui inputs climáticos, de solo e cultura. Dessa forma foi possível calcular a quantidade de água necessária para deixar o solo sempre preenchido com níveis ideais para uso fisiológico, fazendo com que o modelo atingisse rendimento semelhante a produtividade potencial e fazendo com que lâminas excedentes também apresentassem rendimento de grãos excedentes. Além disso, a produtividade no trabalho dos autores foi decorrente da experimentação de campo, enquanto esta pesquisa simulou as produtividades no modelo CROPGRO-SOYBEAN do DSSAT, podendo ter uma variação de até 12% na produção de grãos de soja (SAMPAIO et al., 2020). Ressalta-se que a calibração utilizada satisfaz as condições de crescimento de cultura e parâmetros genéticos para cultivar M7739 IPRO no MATOPIBA por ter sido realizada com dados de Balsas – MA por Sampaio et al. (2020), porém não é específica para o município de São Desidério-BA, o que mostra a necessidade de ajustes experimentais.

Outro justificativa relevante para diferença estatística na produtividade da lâmina 110% da ETC foi o uso da cultivar M7739 IPRO desde o primeiro ano das simulações (2000). Embora o atual trabalho tenha garantido rendimento de grãos de soja semelhantes ao trabalho de Sampaio et al. (2020) em todas as safras e localidades, observou-se que houve diferença nos valores de sc.ha⁻¹

¹ médios quando comparados a série histórica CONAB (2023). A média de produtividade de todos os tratamentos para os primeiros 10 anos das simulações foi de $Y_{CAR1}=69,00 \text{ sc.ha}^{-1}$ e $Y_{CAR2}= 67,00 \text{ sc.ha}^{-1}$, enquanto a Conab (2023) apontou Y do município de $41,00 \text{ sc.ha}^{-1}$ no mesmo período. Quando comparado os valores de São Desidério do atual trabalho e da Conab (2023) foi constatado uma superestimativa no valor de, aproximadamente, 25 sc.ha^{-1} . A explicação está no fato da tecnologia IPRO ter sido lançada no ano de 2013 pela Bayer, em que possuiu características adequadas de período juvenil, ciclo e tipo de crescimento nos anos subsequentes. Desta forma, com a calibração CROPGRO-SOYBEAN com M7739 IPRO desde o primeiro ano (2000), o modelo ajustou as produtividades conforme os valores padrões inseridos no “Experimental File A” do estudo de Alves et al. (2021a) e Sampaio et al. (2020), garantindo que a variabilidade fosse igual ao observado na média dos autores, na média do atual trabalho e na média da série histórica da Conab de 67 sc.ha^{-1} .

O trabalho de Pereira-Silva et al. (2020) também apontou ganhos com a irrigação no município de Barreiras – BA, onde obteve a produtividade irrigada nos períodos de 1980 a 2015. Os autores observaram, para ambiente Cerrado, eficiência no uso a água de, aproximadamente, $0,25 \text{ sc.mm}^{-1}$ a mais quando o suprimento da demanda hídrica ocorreu nos períodos reprodutivos da cultura da soja (dezembro e janeiro). Eles testemunharam que a produção de soja com irrigação apenas no período crítico da cultura não diferiu significativamente da produtividade dos tratamentos irrigados em todo ciclo (vegetativo + reprodutivo). Também ressaltaram que a diferença na irrigação do ciclo completo foi inferior ao tratamento com irrigação apenas na fase reprodutiva, sendo de $0,21 \text{ sc.mm}^{-1}$. Neste trabalho, para a localidade 1, os tratamentos 2, 3, 4 e 5 apresentaram ganhos de até 87% maiores do encontrado por Pereira-Silva et al. (2020) de $1,12 \text{ sc.mm}^{-1}$, $1,36 \text{ sc.mm}^{-1}$, $1,56 \text{ sc.mm}^{-1}$ e $1,92 \text{ sc.mm}^{-1}$ respectivamente. Para a localidade 2, o ganho de produtividade foi de até 86% maior, em que se obteve $1,07 \text{ sc.mm}^{-1}$, $1,39 \text{ sc.mm}^{-1}$, $1,59 \text{ sc.mm}^{-1}$ e $1,89 \text{ sc.mm}^{-1}$ respectivamente para os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5 (figura 2). Embora ambas as localidades sejam no oeste baiano, estes números podem ser explicados pela diferença de município, diferente base de dados climáticos utilizada e pelo comprimento da série histórica. O grid amostral no artigo dos autores proveio do trabalho de Xavier et al. (2015), o qual possui dados meteorológicos de 1980 – 2013 espaçados em escala $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Além disso, Pereira-Silva et al. (2020) realizaram o balanço hídrico e de irrigação com 15 anos a mais dos dados meteorológicos de velocidade do vento, precipitação, radiação global, temperatura e umidade relativa, o que captou dados de mais de uma normal climatológica (1961-1991 e 1992-2022).

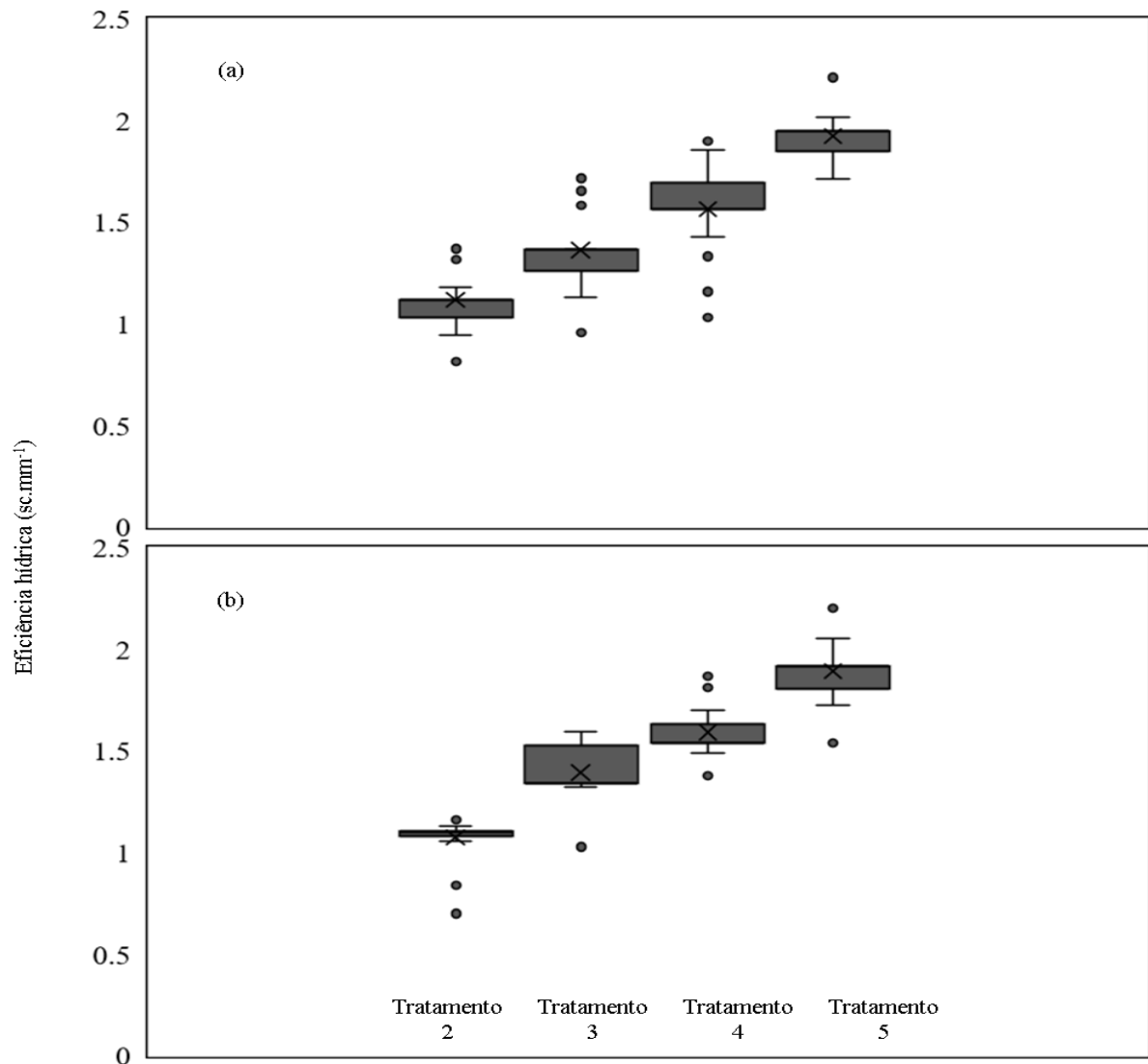


Figura 2 – Eficiência no uso da água para os manejos de irrigação dos tratamentos 2, 3, 4 e 5 nas localidades denominadas CAR1 (a) e CAR2 (b) de São Desidério – BA.

O cálculo de estoque de carbono inicial no solo pela equação de Yang et al. (2008) para o CAR1 ficou abaixo em 61,43% do observado na plataforma Soilgrid (<https://soilgrids.org/>) e 58,33% na plataforma MAPBIOMAS (2023), em que os valores absolutos encontrados foram 15,81 Mg C.ha⁻¹, 41 Mg C.ha⁻¹ e 36 Mg C.ha⁻¹ respectivamente. Para o CAR2, esta diferença foi menos representativa, em que os valores ficaram abaixo em 15,95% comparado ao Soilgrid e 19,45% comparado ao MAPBIOMAS (2023) e os valores absolutos encontrados foram de 38,66 Mg C.ha⁻¹, 46 Mg C.ha⁻¹ e 48 Mg C.ha⁻¹. Estas diferenças podem ser justificadas pela metodologia de obtenção de dados de cada metodologia, que, para o Soilgrid, o estoque de carbono é obtido através do método *state-of-the-art machine learning* para mapear espacialmente os solos dos continentes, no qual é realizado através de um grid amostral de 250m. Na plataforma MAPBIOMAS, é feita uma interpolação com dados de estoque de carbono do solo de 1980 – 2021 da literatura para todo o

Brasil, em que a *krigagem* é feita em grid amostral de 1km. Os valores obtidos para o CAR1 e CAR2 foram provenientes de coletas de solo em campo disponibilizadas pela plataforma BDIA, garantindo maior confiabilidade nos resultados.

As emissões encontradas para o CAR1 e CAR2 variaram apenas para os manejos de calcário e produtividade da soja. Para o CAR1, a média de emissão proveniente da aplicação de calcário dolomítico foi de 0,22 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ e, no CAR2, de 0,60 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹. O que justificou as elevadas emissões foram os altos níveis de aplicação de calcário, sendo de 1,35 Mg.ha⁻¹ no CAR1 e, aproximadamente, 4,00 Mg.ha⁻¹ no CAR2. A saturação por bases (V) nas análises de solo do BDIA foram, respectivamente, 5% e 17%, além da CTC em torno de 5 mmol_c.dm⁻³ em ambas as coordenadas. Estudos para região do Cerrado apontaram que os solos normalmente apresentam baixa disponibilidade nutricional e alto grau de intemperismo (LOPES, 1983; FAGERIA e GHEYI, 1999; SILVEIRA et al., 2000) que promove e ratifica os elevados níveis de aplicação de calcário para São Desidério-BA.

Para as emissões provenientes da soja houve incremento conforme o aumento da produtividade. Para o CAR1, as médias de emissão da biomassa residual foi de 0,20 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, 0,22 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, 0,27 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, 0,31 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ e 0,38 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, respectivamente para os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5. Já no CAR2, as médias obtidas foram 0,18 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, 0,21 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, 0,28 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹, 0,32 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ e 0,38 Mg CO_{2eq}.ha⁻¹ respectivamente nos tratamentos. Isto ocorreu para ambas as localidades devido a fração de N na biomassa residual da cultura ser fixa em 15%, variando apenas em função do aporte total após a colheita. Desta forma, o balanço de carbono anual (BCS), o qual foi inserido ou retirado do estoque inicial do solo, foi influenciado diretamente pela qualidade química do ambiente produtivo e da massa residual. Neste trabalho, por se ter assumido que o ajuste no estoque de carbono em função da mudança do uso e cobertura do solo já ocorrerá no primeiro ano da simulação, notou-se que o Latossolo Amarelo Distrófico Típico e o Gleissolo Háptico Alumínico Típico não interferiram diretamente no balanço de carbono anual. Mesmo que ambos tenham apresentado textura diferentes, sobretudo no percentual de argila até 30cm de profundidade (CAR1=17% e CAR2=37%), esta não influenciou na taxa de acúmulo de carbono.

As figuras 3 e 4 apontaram que a taxa de acúmulo de carbono depende diretamente da produtividade de grãos, a qual promove o aumento da biomassa aérea e radicular no período pós colheita (KING et al. 2009). Ainda que haja diferentes taxas de decomposição com o aumento de água no armazenamento do solo (JABRO et al. 2008), as taxas de 60% (tratamento 1), 63% (tratamento 2) e 70% (tratamento 3, 4 e 5) não foram suficientes para tornar a irrigação inviável como técnica de conservação da matéria orgânica, promovendo incremento de C atmosférico no

solo para as simulações, com exceção dos tratamentos 1 e 2 do CAR2. Mesmo assim, ainda houve uma redução na perda de carbono se comparado o tratamento 2 e o 1 do Gleissolo Háplico Alumínico Típico.

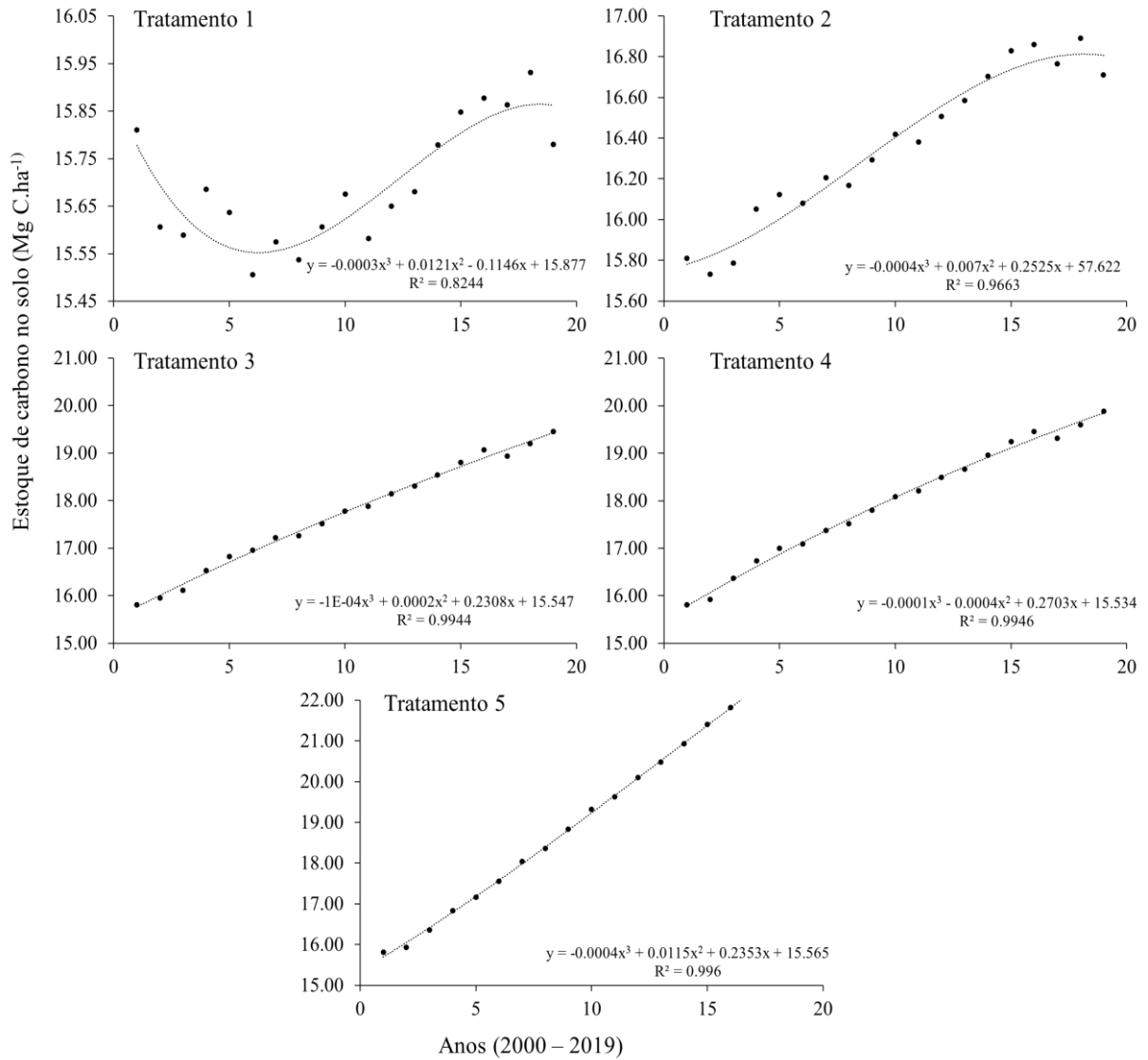


Figura 3 – Tendências das taxas de acúmulo de carbono no solo para a localidade CAR1 no período de 2000 – 2019.

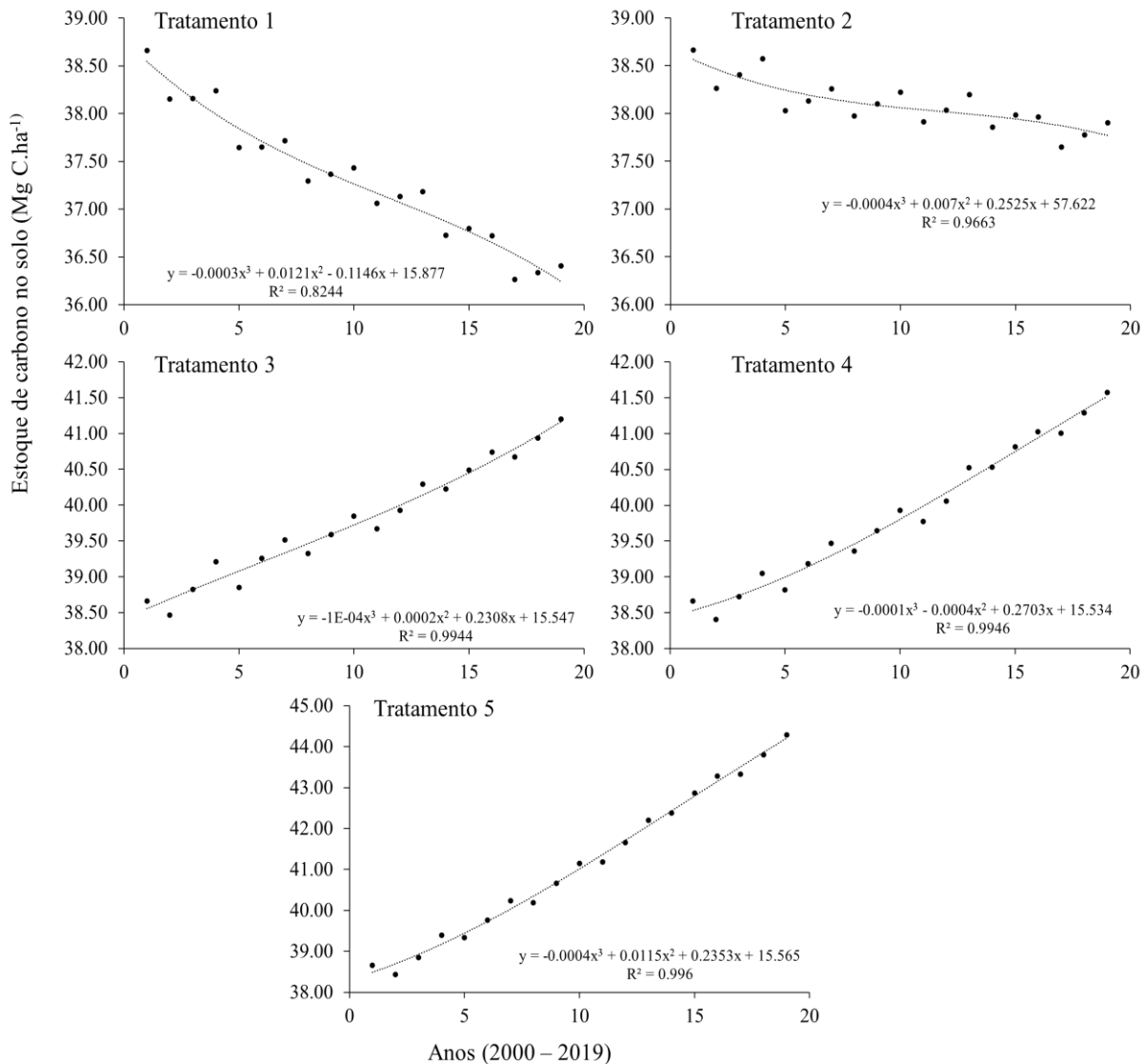


Figura 4 – Tendências das taxas de acúmulo de carbono no solo para a localidade CAR2 no período de 2000 – 2019.

O cultivo da soja de forma nominal (sequeiro) demonstrou que não há garantia da preservação da matéria orgânica no solo, podendo apresentar manutenção e/ou perda do estoque inicial. Todavia, a irrigação é capaz de cobrir a lacuna sustentável na produção, atingindo valores de até 0,40 Mg C.ha⁻¹ de remoção de carbono atmosférico e inserção no solo. Este valor ainda é incipiente quando comparado a outros sistemas de manejos ou outras culturas. O trabalho de Lovato et al. (2004) apontou, em experimento conduzido em Eldorado do Sul – RS de 20 anos, que o consórcio entre milho e culturas de cobertura (aveia preta, ervilhaca e feijão caupi) promove a adição de carbono no solo entre 4,11 Mg C.ha⁻¹ e 8,14 Mg C.ha⁻¹ até 0,30m de profundidade, com a participação de 60% do C fornecida pela cultura do milho. Para Aguar et al. (2014) em estudo nas regiões semiáridas brasileiras em experimentos de 15 anos, os sistemas integrados como silvipastoril e agrossilvipastoril podem adicionar de 1,40 Mg C.ha⁻¹ e 2,40 Mg C.ha⁻¹ também na profundidade de 0,30m. Em São Carlos – SP, Segnini et al. (2019) provou que pastagem

melhorada, com 9 anos de intensificação, é capaz de adicionar até 1,65 Mg C.ha⁻¹ nos primeiros 0,30m de profundidade do solo.

5 Conclusão

Os diferentes níveis de irrigação apontaram que a produtividade da soja é incrementada na região do Cerrado. Em São Desidério-BA, os índices evapotranspirativos da cultura com as lâminas aplicadas foram aumentados, passando de, aproximadamente, 300mm para até 504mm. Isto resultou em ganhos de produtividade de grãos simulados pelo modelo CROPGRO-SOYBEAN do software DSSAT. O incremento foi de, aproximadamente, 50 sc.ha⁻¹ para até 90 sc.ha⁻¹ quando comparado os tratamentos sem irrigação (1) com os irrigados (2, 3, 4 e 5). Esta diferença foi comprovada estatisticamente a nível de confiança de 5%.

Embora a calibração do modelo CROPGRO-SOYBEAN tenha sido feita no ambiente de Balsas-MA, os parâmetros de crescimento da cultivar M7739 IPRO foram semelhantes para o município de São Desidério-BA. Desta forma, as simulações obtidas pelo DSSAT apresentaram desvio padrão da produtividade de grãos de 12% para ambas as coordenadas dentro do município. Este valor foi igual ao observado no trabalho de Sampaio et al. (2021) e permitiu inferir que existe a possibilidade de aplicar a mesma calibração para outros estados do MATOPIBA.

É sabido que lâminas de irrigação acima da ideal (100%) para cultivo de grãos raramente promovem diferença na produtividade da cultura em comparação com lâminas de até 75% de déficit. Embora este trabalho tenha apresentado o contrário, em que o tratamento 5 (110%ETC) foi estatisticamente diferente dos demais tratamentos (SI, 45%ETC, 75%ETC e 100%ETC), as simulações de produtividade do DSSAT ainda apresentaram um erro em sua quantificação quando inserido o tratamento de lâminas excessivas (maior que a ETC) pois o programa não apresenta modelos de simulação de produtividade de água específicos. Desta forma, o software fica restrito aos dados de entrada de outros modelos e, conseqüentemente, acusa maiores produtividades em função do prolongamento do ciclo da cultura. A melhor solução para garantir menores desvios na produtividade simulada entre os tratamentos é pela experimentação e obtenção dos próprios parâmetros de calibração.

Em relação ao carbono, o tratamento sem irrigação (1) demonstrou que o manejo nominal da soja é capaz de manter a taxa de acúmulo de carbono (CAR1) ou reduzir a quantidade de carbono estocada previamente (CAR2) ao longo do tempo. Pelos resultados, pode-se afirmar que o sistema de produção da soja nominal realizado na maior parte da região do oeste baiano não garante a sustentabilidade da matéria orgânica, podendo até contribuir com sua remoção e, conseqüentemente, com o efeito estufa. A análise entre tratamentos demonstrou que a irrigação é

uma técnica capaz de incrementar o carbono do solo quando assegurado que as lâminas sejam aplicadas a partir de 75% da necessidade de água potencial da cultura (75%ETC). Embora seu uso seja com foco em aumento de produtividade, a partir dela é possível promover o aumento da biomassa residual aportada, a qual possui papel expressivo no acúmulo de matéria orgânica no estoque de carbono do solo até 0,30m de profundidade.

Referências

- AIBA (2023). Associação de irrigantes da Bahia. Disponível em: <https://aiba.org.br/>. Acesso: Junho de 2023.
- AGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 36, n. 11, p. 1419-1424, 2001.
- Aguiar, M. I., Fialho, J. S., Campanha, M. M., & Oliveira, T. S. (2014). Carbon sequestration and nutrient reserves under different land use systems. Revista Árvore, 38(1), 81-93.
- ALAGARSWAMY, G. et al. Evaluating the CROPGRO-soybean model ability to simulate photosynthesis response to carbon dioxide levels. Agronomy Journal, v. 98, n. 1, p. 34-42, 2006.
- ALLEN, R. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ALONSO, O. Avaliação da exigência de calcário do solo 1. 1969.
- ALVES, E. et al. Water deficit on the growth and yield of irrigated soybean in the brazilian cerrado region. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 25, n. 11, p. 750-757, 2021a.
- ALVES, E. et al. Evaluation of models to estimate the actual evapotranspiration of soybean crop subjected to different water deficit conditions. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 93, n. 4, p. 1-16, 2021b.
- ANDRADE, M.; LIMA, K. Projeção climática da frequência de eventos de precipitação intensa no Nordeste do Brasil: resultados preliminares. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 6, n. 5, p. 1158-1173, 2013.
- ANA (2021). Atlas de Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada (2ª edição). Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0>. Acessado em: Novembro de 2023.
- ASSAD, E. D. Chuva nos cerrados: análise e espacialização. Brasília: Embrapa SSPI, 423 p., 1994.
- BANTERNG, P. et al. Application of the cropping system model (csm)-croppro-soybean for determining optimum management strategies for soybean in tropical environments. Journal of Agronomy and Crop Science, v. 196, n. 3, p. 231-242, 2010.

- BARBOSA, J. et al. Produtividade da cultura da soja irrigada com déficit hídrico regulado no cerrado piauiense. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 14, n. 4, p. 4200–4210, 2021.
- BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, p.831-839, 2004.
- BONA, F. et al. Soil organic carbon in sprinkler irrigation systems under no-till and conventional tillage. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 30, n. 5, p. 911–920, 2006.
- CARVALHO, I. et al. Demanda hídrica das culturas de interesse agrônômico. *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer*, v. 9, n. 17, p.969-984, 2013.
- CONAB (2023). Série histórica de cultivos. Disponível em: [https:// www. conab. gov. br/ info- agro/ safras/](https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/). Acessado 15 Junho de 2023.
- CORREIA, S. et al. Aplicações E Limitações Da Modelagem Em Agricultura – Revisão. *BRAZILIAN JOURNAL OF AGRICULTURE - Revista de Agricultura*, v. 86, n. 1, p. 1, 2013.
- COSTA, F. S. et al. 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.
- DERSCH, G.; BÖHM, K. Effects of agronomic practices on the soil carbon storage potential in arable farming in Austria. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 60, p. 49-55, 2001.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. Efeito da água no rendimento das culturas. *Estudos FAO - Irrigação e Drenagem* n.33, 1994. 306p.
- DOURADO, D. et al. Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/publicacoes-1>. Acesso em: 13 nov. 2023.
- EMBRAPA. EMBRAPA NEW's: Mecanização e Automação. Brasil. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/59834897/artigo-o-impacto-do-oleo-diesel-no-custo-de-producao-do-milho-safrinha-em-mato-grosso-do-sul#:~:text=Considerando%2Dse%20que%20o%20somat%C3%B3rio,de%20%C3%B3leo%20diesel%20por%20hectare; acesso: Junho de 2023>.
- FERNANDES, R. et al. Climate change impacts on rainfed and irrigated soybean yield in Brazil's new agricultural frontier. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 147, n. 1–2, p. 803–816, 2022.
- FAO (2017). *The Future of Food and Agriculture - Trends and Challenges*. Rome. 2017.
- FAO (2023a). *Climate-Smart Agriculture*. Rome. 2023.
- FAO (2023b). *The impact of disasters on agriculture and food security - avoiding and reducing losses through investment in resilience*. Rome. 2017.

- FARIAS, J. R. et al. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.415-421, 2001.
- FONTE, S. et al. Fertilizer and Residue Quality Effects on Organic Matter Stabilization in Soil Aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, v. 73, n. 3, p. 961–966, 2009.
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El Nino and La Nina events. *Journal of Climate*, v. 13, n. 1, p. 35–58, 2000.
- HOOGENBOOM, G. et al. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using soygro, pnuogro, and beangro: a review. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 35, n. 6, p. 2043–2056, 1992.
- HOOGENBOOM, Gerrit et al. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: *Advances in crop modelling for a sustainable agriculture*. Burleigh Dodds Science Publishing, 2019. p. 173-216.
- HOFFMAN, Glenn J. et al. (Ed.). *Design and operation of farm irrigation systems*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.
- HUNGRIA, M. et al. Fixação Biológica Do Nitrogênio Na Cultura Da Soja. *Embrapa Soja. Circular Técnica*, 35, p. 48, 2001.
- IBGE, 2022. IBGE. Sidra: Banco de Tabelas Estatísticas. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca/brasil> Acesso em: julho de 2022.
- IPCC. 2006 IPCC GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES. Kanagawa: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006a. Relatório Técnico.
- IPCC (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland, pp. 1-34, The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. Relatório Técnico.
- JABRO, J. et al. Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops. *Journal of Environmental Management*, v. 88, n. 4, p. 1478–1484, 2008.
- KLIEMANN, H. et al. Taxas de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho distroférico. *Embrapa Informação Tecnológica*; Goiania, GO, 2006.
- KING, A. et al. Annual carbon and nitrogen loadings for a furrow-irrigated field. *Agricultural Water Management*, v. 96, n. 6, p. 925–930, 2009.
- KINGRA, P.; KAUR, H. Microclimatic Modifications to Manage Extreme Weather Vulnerability and Climatic Risks in Crop Production. *Journal of Agricultural Physics*, v. 17, n. 1, p. 1–15, 2017.
- LESSIN, R.; GHINI, R. Efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre o oídio e o crescimento de plantas de soja. *Tropical Plant Pathology*, v. 34, n. 6, p. 385–392, 2009.

- LIU, C. et al. Effects of irrigation on nitrous oxide, methane and carbon dioxide fluxes in an Inner Mongolian steppe. *Advances in Atmospheric Sciences*, v. 25, p. 748-756, 2008.
- LOPES, A. S. Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983.
- LOVATO, T. et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 1, p. 175–187, 2004.
- MAUGET, S. A.; UPCHURCH, D. R. El Nino and La Nina related climate and agricultural impacts over the great plains and midwest. *Journal of Production Agriculture*, v. 12, n. 2, p. 203–215, 1999.
- MANAVALAN L.P. et al. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant Cell Physiol* 50, p.1260-1276, 2009.
- MAPBIOMAS (2023) – Plataforma Interativa MAPBIOMAS v.7.1. Brasília: MAPBIOMAS. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>; acesso: Junho de 2023.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, v. 69, n. 1, p. 39–47, 2018.
- NOAA (2023). Global Monitoring Laboratory: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>. Acesso: Novembro de 2023.
- OORTS, K. et al. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 100, n. 2–3, p. 161–171, 2003.
- OLIVEIRA, A. et al. Avaliação Do Desempenho De Sistemas Pivô Central Na Região Oeste Da Bahia. *Irriga*, v. 9, n. 2, p. 126–135, 2004.
- PAUSTIAN, K. et al. Management controls on soil carbon. *Soil organic matter in temperate agroecosystems*, p. 15-49, 1997.
- PARTON, W. Models to evaluate soil organic matter storage and dynamics. In: *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. CRC Press, 2020. p. 421-448.
- PEREIRA-SILVA, L. P. et al. Estimativa da produtividade de soja usando irrigação na época das chuvas no bioma Cerrado. *Agrometeoros*, v. 28, 2020.
- PINKER, R.; LASZLO, I. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 31, n. 2, p. 194-211, 1992.
- RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, v. 314, n. June 2017, p. 122–137, 2018.
- REICOSKY, D. Tillage-induced CO₂ emission from soil Tillage-induced CO₂ emission from soil. n. July 1997, p. 273–285, 2014.

- SAUCEDA, M. S. et al. Variabilidade climática e sua influência na produção da mamona *Ricinus communis* L. na Bahia. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 9, n. 21, p. 347-357, 2022.
- SAMPAIO, L. S. et al. Assessment of sowing dates and plant densities using CSM-CROPGRO-Soybean for soybean maturity groups in low latitude. *Journal of Agricultural Science*, v. 158, n. 10, p. 819–832, 2020.
- SEGNINI, A. et al. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. *Scientia Agricola*, v. 76, n. 1, p. 33–40, 2019.
- SILVA, V. C. et al. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 27, p. 163-172, 2012.
- SILVEIRA, P. M. et al. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 10, p. 2057–2064, 2000.
- SIQUEIRA-NETO, M. et al. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no cerrado. *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 31, n. 4, p. 709–717, 2009.
- SOUZA, P. J. O. P. DE et al. Consumo Hídrico Da Soja No Nordeste Paraense. *Irriga*, v. 1, n. 01, p. 218, 2018.
- SUN, Q. et al. The Effect of Greenhouse Gas-Induced Warming on the Impact of El Niño and La Niña Events on Daily Precipitation Extremes in the Boreal Cold Season. *Journal of Climate*, v. 36, n. 18, p. 6393–6407, 2023.
- TANGANG, F. et al. Characteristics of precipitation extremes in Malaysia associated with El Niño and La Niña events. *International Journal of Climatology*, v. 37, p. 696–716, 2017.
- TASCA, F. A. et al. Volatilização De Amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v. 35, n. 2, p. 493–509, 2011.
- THORNTHWAITE, C.; MATHER, J. The water balance. *Publications in Climatology*, New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 104p. 1955.
- TOLEDO, C. et al. Viabilidade Econômica-Financeira Da Otimização De Sistemas De Irrigação Tipo Pivô Central. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 13, n. 1, p. 3275–3284, 2019.
- VANUYTRECHT, E. et al. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, v. 62, p. 351–360, 2014.
- XAVIER, A. et al. W. Scanlon BR. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, v. 36, p. 2644–2659, 2015.
- YANG, Y. et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, v. 14, n. 7, p. 1592–1599, 2008.