

## SIMULAÇÃO AGROVOLTAICA COM TOMATE NO SEMIÁRIDO CEARENSE INTEGRADO COM A PRODUÇÃO

Cristiano Lima da Silva<sup>1</sup>, Carlos Alexandre Gomes Costa<sup>2</sup>

**RESUMO:** Este estudo avaliou a viabilidade técnica e agrônômica de um sistema agrovoltaico no município de Russas, Ceará, integrando a geração de energia solar com o cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) em condições semiáridas. Utilizando modelagem computacional em Python e a biblioteca PVlib, foram simulados os dados de irradiância solar e produtividade agrícola ao longo de 12 meses. O sistema fotovoltaico, composto por 8 módulos de 550 W instalados a 2,5 m de altura, apresentou geração anual estimada de 7.030,00 kWh. A produção de biomassa vegetal total foi de 272,00 kg, com pico nos meses de junho e julho. Os resultados indicam que a integração entre produção energética e agrícola é viável, promovendo o uso eficiente da terra, redução do estresse térmico nas plantas e conservação hídrica. O modelo agrovoltaico demonstrou potencial para contribuir com a sustentabilidade ambiental e a segurança alimentar em regiões de alta incidência solar.

**PALAVRAS-CHAVE:** Agrovoltaico, Energia Solar, Sustentabilidade, Python

## AGRIVOLTAIC SIMULATION WITH TOMATO CULTIVATION IN THE SEMI- ARID REGION OF CEARÁ INTEGRATED WITH ENERGY PRODUCTION

**ABSTRACT:** This study evaluated the technical and agronomic feasibility of an agrivoltaic system in the municipality of Russas, Ceará, integrating solar energy generation with tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivation under semi-arid conditions. Using computational modeling in Python and the PVlib library, solar irradiance and agricultural productivity data were simulated over a 12-month period. The photovoltaic system, composed of eight 550 W modules installed at a height of 2.5 meters, yielded an estimated annual energy output of 7,030.00 kWh. Total plant biomass production reached 272.00 kg, with peak yields occurring in June and July. The results indicate that the integration of energy and agricultural production is feasible,

<sup>1</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza, CE

<sup>2</sup> Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Fortaleza, CE

promoting efficient land use, reducing thermal stress on crops, and enhancing water conservation. The agrivoltaic model demonstrated strong potential to contribute to environmental sustainability and food security in regions with high solar incidence.

**KEYWORDS:** Agrivoltaics, Solar Energy, Sustainability, Python

## INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas que o mundo enfrenta hoje é o aumento das emissões de gases de efeito estufa, que intensificam o aquecimento global e provocam desequilíbrios ambientais severos. Em resposta a esse desafio, diversos países têm adotado políticas públicas alinhadas ao que foi acordado no âmbito do Acordo de Paris, cujo objetivo é limitar o aumento da temperatura média global a no máximo 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (BRASIL, 2024a).

O Brasil, como signatário do Acordo, tem se comprometido com metas ambiciosas para reduzir suas emissões e promover um modelo de desenvolvimento sustentável. Em 2025, o país apresentou a Estratégia Brasil 2050, um plano de longo prazo que orienta políticas públicas e investimentos estratégicos com foco na sustentabilidade ambiental, justiça social e fortalecimento institucional (BRASIL, 2025).

Em 2024, o setor pecuário foi responsável por 54,17% das emissões nacionais de gases de efeito estufa (GEE), totalizando mais de 1,24 bilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, superando todas as outras fontes combinadas (EXAME, 2025). Além disso, cerca de 70% das emissões associadas ao desmatamento estão diretamente ligadas à expansão da pecuária, o que reforça sua centralidade nos impactos ambientais brasileiros.

A transição energética brasileira, baseada na expansão de fontes renováveis como a solar e a eólica, tem avançado rapidamente, especialmente no semiárido nordestino. Embora essas fontes sejam fundamentais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, sua implantação em larga escala tem gerado impactos ambientais e sociais significativos, sobretudo sobre o bioma Caatinga, único exclusivamente brasileiro.

Segundo levantamento do MapBiomas, a área ocupada por usinas solares de médio e grande porte no Brasil passou de 822 hectares em 2016 para 35,3 mil hectares em 2024, sendo que 62% dessa área está localizada na Caatinga (IHU, 2025). Esse avanço acelerado tem gerado preocupações quanto à supressão de vegetação nativa, à desertificação e à perda de biodiversidade. Além dos impactos ecológicos, a expansão dos parques solares tem gerado

conflitos fundiários e desapropriação de comunidades tradicionais, que denunciam a falta de consulta prévia e os prejuízos aos seus modos de vida (DIALOGUE EARTH, 2024).

Uma possível solução para os desafios territoriais e ambientais da expansão das energias renováveis no Brasil está na geração de uma sinergia entre a energia solar e o setor agrícola, por meio da tecnologia agrovoltáico. Essa abordagem já foi adotada em diversos países da Europa e da Ásia, onde a alta densidade populacional e a limitação espacial exigem o uso eficiente da terra (NEVES et al., 2022).

O conceito foi proposto em 1981 pelos pesquisadores Adolf Goetzberger e Armin Zastrow, e consiste no uso da mesma área para a geração de energia solar e a produção agrícola, promovendo benefícios mútuos tanto para a biomassa cultivada quanto para a eficiência energética (GOETZBERGER; ZASTROW, 1982).

No contexto do Semiárido nordestino, estudos apontam que os sistemas agrovoltáicos representam uma alternativa ecossustentável à produção tradicional, promovendo sinergias entre geração de energia solar, produção de alimentos e manejo hídrico (NEVES et al., 2022; SCIELO BRASIL, 2020). Além disso, análises técnicas indicam que o Semiárido brasileiro possui elevado potencial para geração fotovoltaica, com oportunidades para políticas públicas voltadas à agricultura familiar (DANTAS, 2020). Aliado à necessidade de otimizar o uso da terra, tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas agrovoltáicos, que integram produção agrícola e geração energética (Dupraz et al., 2011). Tais sistemas são particularmente promissores em regiões semiáridas como o Ceará, onde a alta incidência solar permite alto rendimento energético (CIEC, 2020).

A cultura do tomate é amplamente cultivada na região e apresenta resultados promissores em cultivos com sombreamento parcial (Boccalon et al., 2022). Nesse contexto, destaca-se a importância de utilizar culturas tolerantes à sombra, como o tomate, que possuem maior capacidade de adaptação a ambientes com redução parcial da radiação solar direta, mantendo sua produtividade sob estruturas fotovoltaicas (Amaducci et al., 2018).

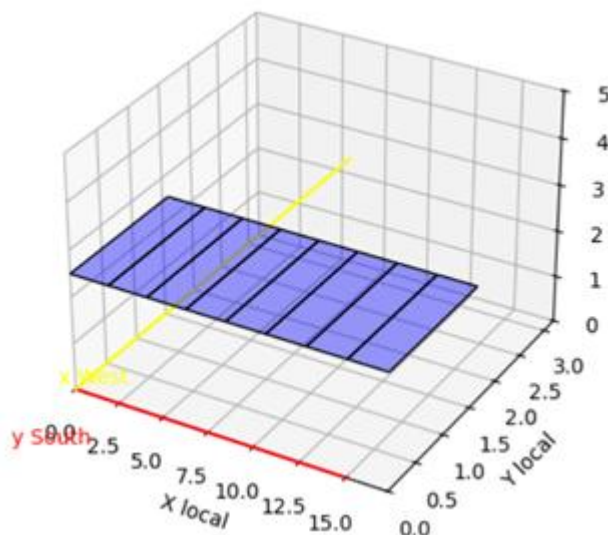
Neste trabalho, será realizada a simulação de sistemas agrovoltáicos no município de Russas, Ceará, com foco na avaliação da geração de energia ao longo de 12 meses e na produtividade agrícola da cultura do tomate. Para isso, será utilizada a linguagem de programação Python, que permite a modelagem computacional dos sistemas, a análise de dados climáticos e o processamento de resultados energéticos e agronômicos. A proposta busca contribuir para o desenvolvimento de soluções integradas que conciliem sustentabilidade energética, segurança alimentar e uso eficiente do território.

## MATERIAL E MÉTODOS

A principal biblioteca utilizada para o desenvolvimento das análises foi a PVlib, que oferece ferramentas avançadas para a modelagem de sistemas fotovoltaicos. Com ela, foi possível calcular a posição solar, a irradiância sobre superfícies inclinadas, as perdas ópticas e elétricas, além de estimar a geração de energia com base em dados meteorológicos e técnicos do sistema (HOLMGREN et al., 2018).

Paralelamente, foi desenvolvido um algoritmo próprio para simular a produtividade agrícola. Esse algoritmo foi estruturado com base em fundamentos agrônômicos e ambientais, considerando variáveis como temperatura, radiação solar, umidade do solo e características fisiológicas da cultura do tomate, adaptadas ao contexto semiárido do município de Russas. A abordagem adotada permitiu estimar o crescimento e a produtividade agrícola de forma personalizada, adequada às condições locais e aos objetivos do estudo (NEVES et al., 2022; SILVA, 2025).

Uma simulação foi realizada para um arranjo fotovoltaico (FV) típico, orientado para o norte, localizado em Russas, Ceará (Latitude:  $4,9397^\circ$  S; Longitude:  $37,9739^\circ$  W), caracterizado por um clima semiárido com alta incidência solar. O arranjo é composto por 8 módulos fotovoltaicos padrão, cada um medindo 2,15 m de largura por 1,6 m de comprimento, com potência de 550 W e instalado a altura de 2,5 m com ângulo de  $10^\circ$ , totalizando uma capacidade instalada de 4,4 kWp, representado na Figura 1.



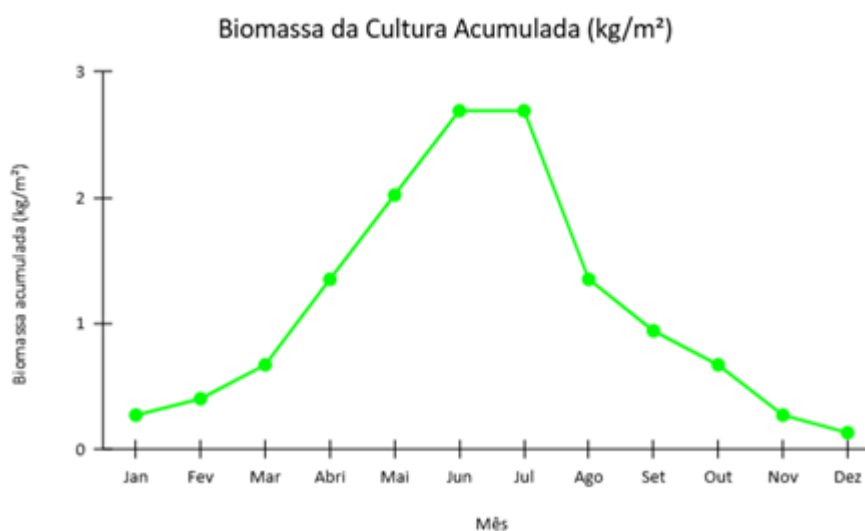
**Figura 1.** Representação dos módulos solares.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presente pesquisa avaliou o desempenho agrônômico da cultura do tomate (*Solanum lycopersicum*) em um sistema agrovoltaico ao longo de um ano, considerando uma área de 27,25 m<sup>2</sup>, densidade de 2 plantas/m<sup>2</sup> e 2,5 metros de altura. Foram analisadas a produtividade de biomassa vegetal e a geração de energia solar, com o objetivo de compreender a viabilidade integrada do sistema.

A biomassa total anual estimada foi de 272,00 kg, o que corresponde a uma média de 5,00 kg por planta. A distribuição mensal da biomassa seguiu o padrão fenológico da cultura, com crescimento gradual nos primeiros meses, pico produtivo entre junho e julho, e declínio nos meses finais do ano, representado na Figura 2. O valor máximo de produtividade foi observado em julho, com 2,70 kg/m<sup>2</sup>, refletindo o auge da frutificação e acúmulo de massa vegetal.

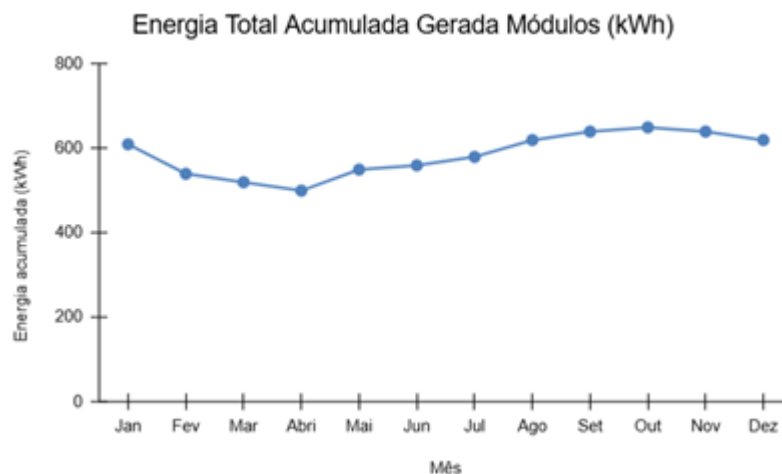
A curva de biomassa acumulada evidencia a influência dos ciclos de cultivo, com três ciclos anuais bem definidos. O sombreamento aplicado reduziu a radiação direta sobre as plantas, o que pode ter contribuído para uma redução estimada de 15% na produtividade em relação a sistemas convencionais, mas também proporcionou benefícios como menor estresse térmico e maior conservação hídrica.



**Figura 2.** Variação Mensal da Biomassa Acumulada da Cultura de Tomate

A produção energética do sistema fotovoltaico apresentou variações sazonais, com valores mensais entre 500 e 600 kWh, totalizando uma geração anual significativa. A curva de energia acumulada manteve-se estável ao longo do ano, com leve declínio nos meses de menor radiação solar (março a junho), seguido de recuperação nos meses subsequentes, observado na Figura 3.

A coexistência entre os módulos solares e a cultura agrícola demonstrou ser eficiente, sem comprometer significativamente a produtividade vegetal. A altura de 2,5 m dos painéis permitiu boa penetração de luz difusa, essencial para a fotossíntese, e ao mesmo tempo garantiu espaço adequado para o desenvolvimento das plantas.



**Figura 3.** Variação Mensal da Energia Total Acumulada Gerada por Módulos Fotovoltaicos

A análise conjunta dos dados revela que o sistema agrovoltaico é capaz de conciliar produção agrícola e geração de energia, promovendo o uso eficiente da terra e contribuindo para a sustentabilidade do cultivo. A biomassa vegetal acumulada e a energia gerada apresentam curvas distintas, mas complementares, reforçando o potencial do modelo para regiões de alta incidência solar como o Nordeste brasileiro.

## CONCLUSÕES

A simulação do sistema agrovoltaico em Russas, Ceará, evidenciou a viabilidade da integração entre geração de energia solar e cultivo de tomate em condições semiáridas. Com uma produção anual estimada de 7.030,00 kWh/ano e produção de biomassa vegetal acumulada de 272,00 kg no período de um ano, o modelo demonstrou eficiência energética e agrônômica. A estrutura elevada dos painéis solares permitiu boa penetração de luz difusa, favorecendo o desenvolvimento das plantas e contribuindo para a redução do estresse térmico e a conservação hídrica.

O sistema mostrou-se promissor, ao promover o uso racional do território e conciliar produção de alimentos com energia limpa. Essa abordagem representa uma alternativa estratégica para o semiárido nordestino, com potencial para fortalecer a segurança alimentar, a

sustentabilidade ambiental as frente às mudanças climáticas. Os resultados reforçam o papel dos sistemas agrovoltaicos como solução inovadora.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaios experimentais em campo para validar os dados simulados, além da análise econômica do modelo em diferentes escalas produtivas. Também é relevante explorar outras culturas agrícolas tolerantes ao sombreamento, estudar arranjos cooperativos voltados para comunidades rurais e integrar tecnologias como irrigação inteligente e armazenamento de energia. Essas iniciativas podem ampliar o impacto social, ambiental e tecnológico dos sistemas agrovoltaicos no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADUCCI, S. et al. Agrivoltaic systems to optimise land use: efficiency of sweet pepper cultivation under solar panels. *European Journal of Agronomy*, v. 101, p. 117-123, 2018.

BOCCALON, C. et al. Shading tolerance and light use efficiency in tomato under solar panels. **Journal of Agrivoltaic Research**, v. 5, n. 2, p. 85-94, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. Brasília: MMA, 2024a. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 11 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento. **Ministérios iniciam validação da versão final da Estratégia Brasil 2050**. Brasília: MPO, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/noticias/2025/ministerios-iniciam-validacao-da-versao-final-da-estrategia-brasil-2050>. Acesso em: 11 ago. 2025.

CIEC. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2020.

DANTAS, Stefano Giacomazzi. **Oportunidades e desafios da geração solar fotovoltaica no Semiárido do Brasil**. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstreams/3eb7aca6-3cd0-41d3-84b6-6d1b8357b9fa/download>. Acesso em: 10 ago. 2025.

DIALOGUE EARTH. **Boom da energia solar acirra disputas com comunidades na Caatinga**. 2024. Disponível em: <https://dialogue.earth/pt-br/energia/boom-energia-solar-disputas-comunidades-caatinga/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

DUPRAZ, C. et al. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. **Renewable Energy**, v. 36, n. 10, p. 2725-2732, 2011.

EXAME. **A pecuária respondeu por 54% das emissões do Brasil em 2024**. Exame, São Paulo, 2025. Disponível em: <https://exame.com/colunistas/ideias-renovaveis/a-pecuaria-respondeu-por-54-das-emissoes-do-brasil-em-2024/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

GOETZBERGER, A.; ZASTROW, A. On the co-existence of solar-energy conversion and plant cultivation. **International Journal of Solar Energy**, v. 1, n. 1, p. 55–69, 1982.

HOLMGREN, W. F. et al. PVLIB Python: A python package for modeling solar energy systems. **Journal of Open Source Software**, v. 3, n. 29, p. 884, 2018.

IHU – Instituto Humanitas Unisinos. **Energia solar cresce 43 vezes em 8 anos e avança sobre a Caatinga**. São Leopoldo: IHU, 2025. Disponível em: <https://www.ihu.unisinos.br/655788-energia-solar-cresce-43-vezes-em-8-anos-e-avanca-sobre-a-caatinga>. Acesso em: 11 ago. 2025.

LI, X. et al. Photosynthetic adaptation and yield of tomato in response to reduced light under photovoltaic modules. **Scientia Horticulturae**, v. 287, p. 110268, 2021.

NEVES, Fabrício Monteiro et al. Conceito de sistemas agrovoltaicos no Nordeste: uma solução de desenvolvimento ecossustentável para o Semiárido nordestino. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 42, 2022. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/189543>. Acesso em: 12 ago. 2025.

OLIVEIRA, R. T.; COSTA, D. M. Respostas fisiológicas do tomateiro à sombra e à deficiência hídrica. **Cadernos de Agronomia**, v. 9, n. 2, p. 101–115, 2017.

SANTOS, M. A.; PEREIRA, L. F.; MOURA, J. R. Efeitos da sombra na umidade do solo em sistemas agrovoltaicos. **Revista Brasileira de Agricultura Sustentável**, v. 12, n. 3, p. 45–58, 2018.

SCIELO BRASIL. Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: **o desafio da integração de políticas públicas**. Estudos Avançados, v. 34, n. 98, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.3498.011>. Acesso em: 12 ago. 2025.