

AgriPV como Infraestrutura de Resiliência para Bioinsumos em *Commodities* Tropicais: Uma Agenda de Pesquisa para o Cerrado e Semiárido

Eduardo Mayer Fagundes
São Paulo, Brasil
eduardo.mayer@efagundes.com

ABSTRACT

*Global climate projections indicate severe yield losses for rainfed commodities in tropical biomes due to heat stress and irregular rainfall. While Brazil's recent Bioinputs Law (No. 15.070/2024) accelerates the adoption of biological agents like *Bacillus aryabhattai* for drought mitigation, their field efficacy is frequently limited by abiotic extremes. This paper proposes Agrivoltaics (AgriPV) not merely as energy infrastructure, but as a physical resilience strategy to stabilize the microclimate required for bioinput performance. Adopting the Food-Energy-Water (FEW) nexus framework, we establish a causal model linking photovoltaic shading to microbial viability in soybean (*Glycine max*) and maize (*Zea mays*) crops. We propose a standardized **multi-site (N=3), split-split-plot experimental protocol** over three cropping seasons to test the synergy between partial shading, water regimes, and biological management. We provide explicit mathematical definitions for Land Equivalent Ratio (LER) and Water Use Efficiency (WUE), aiming to validate AgriPV as the necessary "hardware" to protect the biological "software" in the Brazilian Cerrado transition zones.*

Keywords: Agrivoltaics; AgriPV; Bioinputs; Climate Resilience; Split-plot Design; *Bacillus aryabhattai*.

RESUMO

Projeções climáticas indicam perdas severas de produtividade para *commodities* de sequeiro em biomas tropicais devido ao estresse térmico e irregularidade pluvial. Embora a Lei de Bioinsumos (nº 15.070/2024) institucionalize o uso de agentes biológicos como *Bacillus aryabhattai* para mitigação de seca, sua eficácia a campo é

frequentemente limitada por extremos abióticos. Este artigo de posicionamento propõe o sistema Agrivoltaico (AgriPV) como infraestrutura de resiliência física capaz de estabilizar o microclima necessário para a performance desses bioinsumos. Adotando o nexo Alimento-Energia-Água (FEW), estabelecemos um modelo causal que conecta o sombreamento fotovoltaico à viabilidade microbiana em soja e milho. Propomos um **protocolo experimental padronizado em parcelas sub-subdivididas (split-split-plot)**, conduzido em três sítios distintos por três safras, para testar a sinergia entre sombreamento, regime hídrico e manejo biológico. O trabalho fornece definições matemáticas explícitas para a Razão de Equivalência de Terra (LER) e Eficiência do Uso da Água (WUE), visando validar o AgriPV como o "hardware" de proteção para o "software" biológico no Cerrado e zonas de transição.

Palavras-chave: Agrivoltaico; AgriPV; Bioinsumos; Resiliência Climática; Delineamento Experimental; *Bacillus aryabhattai*.

I. INTRODUÇÃO

A convergência entre a crise climática e a insegurança alimentar impõe a necessidade de novas arquiteturas de produção. Dados recentes indicam que, sem medidas de adaptação disruptivas, a produtividade de culturas essenciais como a soja e o milho no Brasil pode sofrer reduções drásticas — estimadas em até 80% e 51%, respectivamente, até 2050 — devido ao aumento da temperatura e alterações no regime de chuvas.

Paralelamente, o Brasil institucionalizou uma transição tecnológica através da Lei nº 15.070/2024, que regula a produção e uso de bioinsumos. O mercado, que já movimentava R\$ 6,7 bilhões por safra, aposta em microrganismos como

Bacillus aryabhattai para mitigação de estresse hídrico e fungos entomopatogênicos (*Metarhizium*) para controle de pragas. No entanto, existe um paradoxo operacional crítico: microrganismos introduzidos no solo funcionam como "invasores" em comunidades estabelecidas e sua colonização é severamente limitada por condições abióticas hostis, como radiação UV excessiva, temperaturas do solo letais ($>40^{\circ}\text{C}$) e dessecação rápida.

A literatura sobre sistemas agrivoltaicos (AgriPV) demonstra que a co-localização de painéis solares e agricultura pode reduzir a evapotranspiração e a temperatura do solo. Contudo, a maioria dos estudos foca em benefícios físicos diretos, deixando uma lacuna sobre como essa modificação ambiental interage com a "revolução biológica".

Contribuições do Estudo Este artigo preenche essa lacuna ao propor que o AgriPV atue como infraestrutura de suporte à estabilidade biológica. Diferente de estudos observacionais prévios, este trabalho entrega três artefatos metodológicos para a pesquisa no Cerrado e Semiárido:

1. **Modelo Conceitual Causal:** A formalização dos mecanismos (mediadores abióticos) pelos quais a infraestrutura física afeta a persistência de inóculos microbianos;
2. **Protocolo Experimental Auditável:** Um desenho estatístico em blocos casualizados com parcelas sub-subdivididas (*split-split-plot*) e análise de poder para garantir replicabilidade;
3. **Matematização de Indicadores (KPIs):** A definição formal de fórmulas para LER, WUE e PR, permitindo comparabilidade em metanálises globais.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E MODELO CAUSAL

A premissa central deste trabalho é que o AgriPV não apenas gera energia, mas mitiga a "depressão do meio-dia" (*midday depression*) na fotossíntese de plantas C4 (milho) e C3 (soja), criando um nicho ecológico protegido para bioinsumos.

O Diagrama Causal Proposto: Para superar a natureza descritiva, estruturamos a interação através do seguinte fluxo de mecanismos:

1. **Input (Infraestrutura):** A interceptação da radiação de ondas curtas pelos módulos fotovoltaicos (transparência 40-50%) altera o balanço de energia na superfície.
2. **Mediadores Abióticos (Mensuráveis):**
 - Redução da Temperatura Máxima do Solo (T_{soil_max});
 - Redução do Déficit de Pressão de Vapor (VPD) no dossel;
 - Manutenção do Potencial Hídrico do Solo (ψ_{soil}).
3. **Mecanismo Biológico ("Caixa Preta" a ser aberta):**
 - *Bactérias:* A manutenção da umidade favorece a motilidade e a formação de biofilmes de *Bacillus aryabhattai* na rizosfera.
 - *Fungos:* O bloqueio da radiação UV-B aumenta a meia-vida de conídios de *Metarhizium* e *Beauveria* na superfície foliar.
4. **Desfecho (Outcome):** Estabilização da produtividade agrícola (menor variância σ^2 interanual em anos de El Niño) e aumento da eficiência global do sistema ($LER > 1$).

III. HIPÓTESES DE PESQUISA

Para garantir rigor científico e evitar viés de confirmação, formulamos um conjunto de hipóteses falsificáveis, incluindo a hipótese nula e uma hipótese rival explícita.

- **H_0 (Hipótese Nula):** A instalação de sistemas AgriPV sobre culturas de soja e milho **não altera significativamente** $p > 0,05$) a taxa de sobrevivência de bioinsumos nem a produtividade das culturas em comparação ao cultivo a pleno sol, ou os ganhos microclimáticos não compensam a perda por sombreamento.
- **H_1 (Sinergia Biológica):** O microclima modificado pelo AgriPV (menor T_{soil} e maior umidade) aumenta a abundância de genes marcadores de bioinsumos

(quantificado via qPCR) e sua eficácia agrônômica, resultando em maior colonização radicular comparada ao controle.

- **H₂ (Eficiência Fisiológica):** O sombreamento intermitente mitiga o estresse térmico extremo, reduzindo a fotoinibição e mantendo a condutância estomática durante as horas de pico de irradiação, elevando a **Eficiência do Uso da Água (WUE)**.
- **H₃ (Nexo Operacional):** A geração de energia *on-site* reduz o OPEX da irrigação, viabilizando a agricultura de precisão que monitora o microclima para otimizar a aplicação dos bioinsumos.
- **H₄ (Hipótese Rival - Risco Fitossanitário):** O aumento da umidade relativa e do tempo de molhamento foliar sob os painéis fotovoltaicos favorece a proliferação de **patógenos fúngicos indesejados** (ex: ferrugem asiática na soja), anulando os benefícios dos bioinsumos e exigindo maior controle fitossanitário.

IV. METODOLOGIA E PROTOCOLO EXPERIMENTAL (PADRÃO DE REPLICABILIDADE)

Para superar a variabilidade de resultados apontada na literatura e garantir validade externa para o bioma tropical, estabelece-se o seguinte protocolo mandatório para a execução da pesquisa, focado no nexo entre microclima e eficácia biológica.

A. Amostragem e Delineamento Estatístico

O experimento deve ser conduzido em abordagem **multilocacional**, cobrindo um gradiente de aridez na transição Cerrado-Semiárido, regiões críticas para a segurança alimentar.

- **Sítios Experimentais (N=3):** Recomenda-se a instalação em três macrorregiões distintas (ex: Oeste da Bahia, Norte de Minas Gerais e Sul de Goiás) para capturar a interação *Genótipo x Ambiente x Manejo*.
- **Duração:** Mínimo de **3 safras agrícolas completas** (3 anos) para mitigar a variabilidade climática interanual, isolar

efeitos residuais (*carryover*) no solo e capturar anos de El Niño/La Niña.

- **Delineamento:** Blocos Completos Casualizados (DBC) com arranjo em parcelas sub-subdivididas (**Split-Split-Plot**), com 4 repetições (blocos) por sítio. O tamanho mínimo da unidade experimental deve ser de 10m x 20m para evitar efeitos de borda da sombra projetada pelos módulos.

B. Fatores e Tratamentos

O arranjo experimental testará três fatores simultâneos para isolar os mecanismos causais:

1. Parcela Principal (Fator A - Cobertura):
 - A₁: Sistema AgriPV (Módulos elevados >4m, espaçamento entre fileiras ajustado para maquinário, transparência luminosa de 40-50%, com rastreamento *backtracking* para otimizar luz difusa).
 - A₂: Controle a Céu Aberto (Área adjacente sem influência de sombreamento).
2. Subparcela (Fator B - Regime Hídrico):
 - B₁: Irrigação Plena (Reposição de 100% da Evapotranspiração da Cultura - ETc).
 - B₂: Déficit Hídrico Controlado (50% da ETc), simulando cenários de seca severa projetados para o Cerrado.
3. Sub-subparcela (Fator C - Manejo Biológico):
 - C₁: Controle Químico Padrão (Fungicidas/Inseticidas sintéticos convencionais).
 - C₂: Manejo com Bioinsumos de Mitigação (Protocolo definido na seção III-C).

C. Especificação dos Bioinsumos e Conformidade Regulatória

Para atender à Lei nº 15.070/2024 e garantir a replicabilidade, o protocolo exige o uso de cepas registradas no MAPA com eficácia agrônômica comprovada:

- **Mitigação de Seca (Soja/Milho):** Inoculação via sulco ou tratamento de

sementes com *Bacillus aryabhattai* (cepa CMAA 1363, tecnologia Embrapa/NOOA ou equivalente comercial). Esta bactéria é escolhida por sua capacidade de induzir tolerância ao estresse hídrico através da produção de exopolissacarídeos na rizosfera, protegendo as raízes contra a dessecação.

- **Controle Biológico e Resiliência:** Aplicação foliar de fungos entomopatogênicos *Metarhizium anisopliae* (isolado IBCB 425) ou *Beauveria bassiana* para controle de pragas (ex: cigarrinha-do-milho e percevejos). Estes organismos servem como bioindicadores ideais da proteção UV oferecida pelos painéis, dado que sua persistência (conídios) é degradada rapidamente pela radiação solar direta e temperaturas >30°C.

Protocolo de Monitoramento da Viabilidade: A persistência dos microrganismos deve ser quantificada via qPCR (PCR quantitativo) visando o gene 16S rRNA (bactérias) e ITS (fungos), ou contagem de UFC (Unidades Formadoras de Colônia), com amostragens em $t = 0$, $t = 7$ e $t = 21$ dias após a aplicação. O objetivo é testar se o AgriPV atua como "escudo" para o microbioma introduzido.

D. Métricas de Sucesso (KPIs) e Fórmulas

A validação do nexa Alimento-Energia-Água (FEW) exige a coleta simultânea de dados padronizados. Definem-se as fórmulas para os indicadores críticos:

1. **Razão de Equivalência de Terra (LER - Land Equivalent Ratio):** Métrica primária para avaliar a eficiência do uso do solo no sistema dual.

$$LER = \frac{Y_{AgriPV}}{Y_{Mono}} + \frac{E_{AgriPV}}{E_{SolarOnly}}$$

Onde Y é a produtividade agrícola (kg/ha) e E é a geração de eletricidade (MWh/ha) na mesma área. Um $LER > 1$ indica que o sistema integrado é mais eficiente que os usos separados.

2. **Eficiência do Uso da Água (WUE - Water Use Efficiency):** Fundamental para testar a Hipótese 2 (resiliência à seca).

$$WUE_{crop} = \frac{Y(\frac{kg}{ha})}{ET_a(mm)}$$

A Evapotranspiração Real ET_a deve ser medida via balanço hídrico de solo utilizando sondas de nêutrons ou sensores capacitivos instalados nas profundidades de 10, 30 e 60 cm.

3. **Performance Ratio (PR) do Sistema Fotovoltaico:** Para testar a hipótese de resfriamento dos módulos pela transpiração das culturas.

$$PR = \frac{E_{out}}{P_{peak} \times H_i}$$

Onde E_{out} é a energia gerada (kWh), P_{peak} é a potência instalada (kWp) e H_i é a irradiação solar no plano do arranjo (kWh/m²). Espera-se que o microclima agrícola melhore o PR em comparação ao solo nu.

E. Análise Estatística e Poder

Os dados serão analisados utilizando **Modelos Lineares Mistos (LMM)** para considerar a estrutura hierárquica dos dados e a correlação temporal entre safras.

- **Modelo:**

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (Interações) + Bloco_l + \varepsilon_{ijkl}$$

- **Poder Estatístico:** O dimensionamento amostral foi calculado para garantir um poder estatístico $(1 - \beta) \geq 0,80$, capaz de detectar um tamanho de efeito (d de Cohen) de 0,5 com nível de significância $\alpha = 0,05$. A análise focará nas interações $A \times C$ (Cobertura x Bioinsumo) para validar a tese de sinergia.

V. DISCUSSÃO: O AGRI-PV COMO "HARDWARE" PARA O "SOFTWARE" BIOLÓGICO

A proposta de integrar Agri-PV com a bioeconomia agrícola parte de uma premissa de engenharia de sistemas: o clima atua como restrição estrutural e a biotecnologia como ferramenta de manejo. A discussão a seguir situa essa interação no contexto das projeções climáticas para o Brasil.

A. Fechando a Lacuna de Viabilidade Biológica

As projeções indicam que, sem adaptação, a produtividade da soja e do milho no Brasil pode cair drasticamente — até 80% e 51%, respectivamente — até meados do século devido ao estresse térmico e hídrico. A resposta institucional, via Lei nº 15.070/2024, aposta massivamente em bioinsumos como *Bacillus aryabhattai* e fungos entomopatogênicos. Contudo, a literatura indica um paradoxo: estes organismos exigem condições microclimáticas específicas para colonizar a rizosfera e expressar seu potencial. Bactérias introduzidas atuam como invasoras em comunidades estabelecidas e sua sobrevivência decai rapidamente sob radiação UV e dessecação. A evidência física de que painéis solares reduzem a evapotranspiração e a temperatura do solo é robusta na literatura internacional. A inovação desta agenda reside em conectar esse fenômeno físico à sobrevivência biológica. Argumenta-se que o Agri-PV atua como o **hardware de proteção** (reduzindo UV e choque térmico) necessário para que o **software biológico** (os inoculantes) processe a indução de resistência à seca. Sem essa proteção física, a eficácia da "revolução biológica" corre o risco de ser limitada pelos extremos climáticos do Cerrado.

B. O Nexa FEW e a Governança de Dados

Para evitar que terras agricultáveis sejam convertidas em usinas solares disfarçadas ("pseudo-agri-PV"), é imperativo que o Brasil adote normas técnicas inspiradas na DIN SPEC 91434. A política pública deve condicionar incentivos fiscais à manutenção da produtividade agrícola primária. O Agri-PV não deve ser visto como substituição, mas como uma infraestrutura de uso dual onde a geração elétrica subsidia a modernização da

irrigação e a agricultura de precisão, fechando o ciclo do nexa Alimento-Energia-Água (FEW).

VI. LIMITAÇÕES DO ESTUDO E BARREIRAS À ADOÇÃO

Embora a sinergia proposta seja teoricamente plausível, este artigo reconhece limitações críticas e hipóteses rivais que impedem recomendações imediatas de escala industrial.

1. **Hipótese Rival: O Risco Fitossanitário (H₄):** O aumento da umidade relativa sob os painéis, benéfico para a hidratação da planta, pode criar um microclima favorável a patógenos fúngicos necrotróficos (ex: ferrugem asiática na soja). Se o Agri-PV favorecer doenças mais do que favorece os bioinsumos benéficos, o saldo líquido agronômico será negativo. O monitoramento fitossanitário rigoroso é, portanto, obrigatório.
2. **O Trade-off da Luz em Plantas C4:** Culturas como o milho possuem alta demanda por radiação. Existe um risco real de que o sombreamento, mesmo parcial, reduza a produtividade em anos de clima ameno, onde o estresse térmico não é o fator limitante. O modelo econômico do Agri-PV deve ser avaliado pela **estabilidade de safra** (menor variância) e não apenas pelo teto produtivo.
3. **Maturidade Tecnológica (TRL):** Atualmente, a integração Agri-PV-Bioinsumos no Brasil encontra-se em TRL 3-4 (validação de conceito). A agenda de pesquisa proposta visa elevar este nível para TRL 6-7 (demonstração em ambiente relevante) antes que políticas de subsídio massivo sejam desenhadas.

VII. CONCLUSÃO

A crise climática impõe a necessidade de camadas adicionais de resiliência para a agricultura tropical. Este *position paper* sustentou a tese de que os sistemas Agrivoltaicos podem transcender a função energética para atuar como infraestrutura de suporte à biotecnologia.

Conclui-se que:

1. A combinação "**AgriPV + Bioinsumos**" representa uma fronteira inexplorada para mitigação de seca em *commodities*, potencialmente superior ao uso isolado de cada tecnologia.
2. A validação dessa tese exige rigor experimental. O protocolo proposto (fatorial *split-split-plot* multissítio) é o passo obrigatório para transformar hipóteses plausíveis em recomendações agronômicas seguras.

Recomenda-se aos organismos de fomento e regulação (MAPA, Embrapa, ANEEL) o financiamento de pilotos que integrem métricas biológicas e energéticas, garantindo que a transição energética brasileira fortaleça, e não ameace, sua segurança alimentar.

VIII. GLOSSÁRIO

Bacillus aryabhattai: Bactéria isolada originalmente de raízes de mandacaru (*Cereus jamacaru*) na Caatinga brasileira. É utilizada como bioinsumo para mitigação de estresse hídrico em culturas como milho e soja. Sua função principal é induzir a tolerância à seca na planta através da produção de substâncias que protegem as raízes da desidratação. No contexto da pesquisa, serve como organismo modelo para testar se o microclima do AgriPV favorece sua colonização no solo.

Backtracking (Rastreamento Solar Inteligente): Algoritmo de controle utilizado em estruturas de rastreadores solares (*trackers*) de eixo único. Em usinas convencionais, sua função é evitar que uma fileira de painéis faça sombra na fileira de trás durante o amanhecer e o entardecer. No AgriPV, o *backtracking* assume uma função agronômica vital: o algoritmo pode ser programado para ajustar o ângulo dos painéis a fim de permitir a passagem de luz direta para as culturas em momentos críticos ou para proteger as plantas de excesso de radiação ao meio-dia, gerenciando ativamente o microclima.

Beauveria bassiana: Fungo entomopatogênico (que causa doença em insetos) amplamente utilizado no controle biológico de pragas agrícolas. Além de combater insetos diretamente, pode penetrar na planta e ativar defesas naturais e hormônios de crescimento. É altamente sensível à

radiação ultravioleta (UV), sendo um candidato ideal para validar a hipótese de que o sombreamento dos painéis solares prolonga a vida útil dos bioinsumos aplicados nas folhas.

CAPEX (*Capital Expenditure*): Refere-se ao investimento inicial necessário para a construção do sistema AgriPV, que é tipicamente mais alto do que o de uma usina solar convencional devido à necessidade de estruturas elevadas e reforçadas.

Déficit de Pressão de Vapor (VPD): Indicador meteorológico que combina temperatura e umidade relativa do ar para medir o "poder de secagem" da atmosfera. Um VPD alto indica ar seco, que força a planta a fechar seus estômatos e interromper o crescimento para não perder água. O sistema AgriPV busca manter o VPD em níveis mais baixos sob os painéis, reduzindo a demanda hídrica da cultura.

DIN SPEC 91434 Norma técnica desenvolvida na Alemanha que se tornou a referência global para a certificação de sistemas agrivoltaicos. O documento estabelece critérios rigorosos para garantir que a produção de energia não prejudique a atividade agrícola. A norma define, por exemplo, que a perda de área agricultável devido à infraestrutura não pode exceder 10 a 15% e que a agricultura deve permanecer como a atividade principal da terra ("uso agrícola primário"). A adoção de critérios baseados na DIN é fundamental para evitar a descaracterização da propriedade rural.

Ecovoltáico (*Ecovoltaics*): Conceito distinto do agrivoltáico focado em *commodities*. O sistema ecovoltáico combina a geração de energia solar com a restauração ecológica ou conservação da biodiversidade, em vez da produção de alimentos comerciais. É utilizado, por exemplo, para criar habitats para polinizadores (como abelhas e borboletas) ou restaurar pastagens nativas sob os painéis. Projetos que integram AgriPV em áreas de preservação permanente ou reserva legal podem se enquadrar nesta categoria.

Evapotranspiração da Cultura (ETc): Volume total de água perdido para a atmosfera através da evaporação do solo e da transpiração das plantas. É a métrica fundamental para o cálculo da eficiência

do uso da água (WUE). Estudos indicam que o AgriPV pode reduzir a ETc ao diminuir a incidência direta de radiação solar sobre o solo e o dossel das plantas, economizando água de irrigação.

Governança de Dados: Conjunto de políticas e processos que garantem a qualidade, a integridade e a segurança dos dados coletados em campo. Em pesquisas AgriPV, que envolvem sensores complexos de solo, clima e planta, a governança define quem é o "dono" do dado, como ele é auditado e como é padronizado para permitir comparações entre diferentes fazendas e safras. A falta de governança é apontada como uma das principais lacunas que impedem a validação científica da tecnologia em larga escala.

Intermitência e Variabilidade: Características intrínsecas à geração de energia solar, que depende da disponibilidade de luz solar e varia conforme o clima e o ciclo diurno. No contexto do AgriPV, a variabilidade da luz que atinge o solo (causada pela sombra dos painéis) não é um defeito, mas um recurso de manejo. O desenho do sistema busca criar um padrão de "luz intermitente" que reduza o estresse térmico das plantas sem comprometer sua capacidade de realizar fotossíntese.

LCOE (Levelized Cost of Electricity - Custo Nivelado de Energia): Métrica utilizada para calcular o custo médio de geração de cada megawatt-hora (MWh) ao longo de toda a vida útil do projeto (geralmente 25 a 30 anos). No AgriPV, o cálculo do LCOE é mais complexo, pois deve incorporar não apenas os custos da energia, mas também as possíveis perdas ou ganhos de produtividade agrícola decorrentes da infraestrutura. Um LCOE competitivo é o que torna a tecnologia atrativa para investidores e produtores rurais.

Lei de Bioinsumos (Lei nº 15.070/2024): Legislação federal brasileira aprovada em dezembro de 2024 que regulamenta a produção, registro e uso de insumos biológicos na agricultura. A lei institucionaliza o setor, facilitando o registro de novos produtos e incentivando a produção *on-farm* (dentro da propriedade). O artigo utiliza este marco legal como justificativa para a urgência de

pesquisas que integrem bioinsumos e infraestrutura.

***Metarhizium anisopliae*:** Gênero de fungos utilizado no controle biológico de pragas, como cigarrinhas e percevejos. Assim como a *Beauveria*, sua eficácia depende de condições ambientais favoráveis, como alta umidade e proteção contra radiação solar intensa. É um dos bioindicadores propostos para monitorar a "saúde biológica" do ambiente sob os painéis fotovoltaicos.

Microbioma da Rizosfera: Conjunto de microrganismos (bactérias, fungos, vírus) que vivem na região do solo em contato direto com as raízes das plantas. Funciona como a primeira linha de defesa contra doenças. A pesquisa investiga se a proteção física do AgriPV ajuda a manter a diversidade desse microbioma, potencializando o efeito dos inoculantes introduzidos.

OPEX (Operating Expenditure): Refere-se aos custos recorrentes de operação e manutenção. No AgriPV, o OPEX inclui a gestão complexa da integração entre maquinário agrícola e estruturas elétricas. A viabilidade do projeto depende do equilíbrio entre esses custos e as receitas duplas (energia + alimentos).

Pegada de Carbono (Carbon Footprint): Medida total das emissões de gases de efeito estufa causadas direta e indiretamente por uma atividade. Na agricultura, o uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos e o desmatamento são grandes emissores. A estratégia proposta no artigo visa reduzir a pegada de carbono da lavoura através de duas vias: a substituição de químicos por bioinsumos (produzidos com baixo carbono) e a geração de energia renovável no local para alimentar o maquinário agrícola.

Polinizadores: Insetos e animais responsáveis pela reprodução de muitas plantas com flores. O declínio global de polinizadores é uma ameaça à segurança alimentar. Estruturas solares convencionais muitas vezes removem a vegetação, prejudicando esses agentes. O AgriPV bem planejado, ao contrário, pode criar refúgios térmicos e florais na entrelinha dos painéis, prestando um serviço ecossistêmico vital para culturas vizinhas que dependem de polinização.

Produção On-Farm: Modelo de fabricação de insumos biológicos (bioinsumos) realizado dentro da própria fazenda pelo produtor rural. A Lei nº 15.070/2024 regulamentou e facilitou essa prática no Brasil. A integração com o AgriPV é estratégica para este modelo, pois a usina solar fornece a energia barata necessária para manter os biorreatores e a climatização dos laboratórios de multiplicação de bactérias e fungos na propriedade.

Pseudo-Agrivoltaico (*Greenwashing*): Termo crítico utilizado para descrever projetos que se autodenominam "agrivoltaicos" para obter licenças ambientais ou benefícios fiscais, mas que, na prática, inviabilizam a agricultura devido ao sombreamento excessivo ou layout inadequado. A pesquisa proposta pela nMentors visa estabelecer métricas rigorosas para identificar e evitar o pseudo-agrivoltaico, garantindo a legitimidade do setor.

Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR): Faixa do espectro de luz solar (entre 400 e 700 nanômetros) que as plantas efetivamente utilizam para realizar a fotossíntese. Ao projetar um sistema AgriPV, é crucial medir a PAR disponível sob os painéis para garantir que, mesmo com o sombreamento, a planta receba luz suficiente para seu desenvolvimento pleno.

Resiliência Climática: Capacidade de um sistema agrícola absorver choques ambientais (como secas prolongadas ou ondas de calor) e recuperar-se mantendo sua função produtiva. Diferente da "resistência" (que tenta bloquear o impacto), a resiliência envolve adaptação. O AgriPV atua como uma infraestrutura de resiliência ao modificar fisicamente o ambiente (reduzindo temperatura e evaporação) para que as plantas e os bioinsumos sobrevivam aos extremos climáticos projetados para o Cerrado e Semiárido.

Serviços Ecossistêmicos: Benefícios que a natureza proporciona aos seres humanos e à economia, muitas vezes sem custo financeiro direto. Incluem a polinização, a regulação do clima, a purificação da água e a formação do solo. O sistema AgriPV é desenhado não apenas para produzir bens (eletricidade e comida), mas para amplificar esses serviços, por exemplo,

aumentando a retenção de água no solo e reduzindo a erosão pelo vento.

Sombreamento Parcial e Dinâmico: Diferente do sombreamento fixo de uma árvore ou edifício, o sombreamento em sistemas AgriPV é projetado e previsível. A "taxa de transparência" dos módulos e o espaçamento entre as fileiras determinam a quantidade de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) que atinge a cultura. O objetivo da engenharia é encontrar o ponto ótimo onde o sombreamento reduz a evaporação da água e a temperatura do solo, mas ainda fornece luz suficiente para a bioeconomia da planta.

Tecnologia de Prontidão (TRL - *Technology Readiness Level*): Escala global utilizada para classificar o estágio de maturidade de uma tecnologia, variando de 1 (ideia básica) a 9 (operação comercial comprovada). A estratégia da pesquisa é elevar a integração AgriPV-Bioinsumos do nível TRL 3-4 (validação em ambiente laboratorial ou controlado) para TRL 6-7 (demonstração em ambiente operacional relevante), passo necessário para atrair financiamento em larga escala.

Uso Agrícola Primário: Princípio normativo (presente na norma DIN SPEC 91434) que determina que, em um sistema agrivoltaico, a produção agrícola deve ser a atividade principal e prioritária, enquanto a geração de energia é secundária. Se a instalação dos painéis causar uma perda de produtividade agrícola superior a um limite tolerável (ex: 20-30%), o projeto deixa de ser classificado como AgriPV e passa a ser uma usina solar convencional, perdendo potenciais incentivos rurais.

Uso Dual da Terra (*Dual Land Use*): Conceito central do AgriPV que propõe a coexistência sinérgica de duas atividades econômicas na mesma superfície. Ao contrário da competição tradicional onde se escolhe entre "plantar comida" ou "gerar energia", o uso dual busca aumentar a eficiência total da terra. Para que seja considerado uso dual legítimo, e não apenas uma usina solar em terreno rural, a produtividade agrícola deve ser mantida ou estabilizada através da gestão do microclima.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEH, E. H.; SELKER, J. S.; HIGGINS, C. W. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. **PLOS ONE**, v. 13, n. 11, e0203256, 2018.
- ALI ABAKER OMER, A. et al. Impacts of agrivoltaic systems on microclimate, water use efficiency, and crop yield: A systematic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 221, art. 115930, out. 2025.
- BARRON-GAFFORD, G. A. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 9, p. 848–855, 2019.
- BARRON-GAFFORD, G. A. et al. Agrivoltaics as a climate-smart and resilient solution for midday depression in photosynthesis in dryland regions. **npj Sustainable Agriculture**, v. 3, n. 1, art. 32, 2025.
- BRASIL. Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024. Dispõe sobre a produção, a importação, a exportação, o registro, a comercialização, o uso e os incentivos à produção de bioinsumos. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L15070.htm. Acesso em: 16 dez. 2025.
- DIN – DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN SPEC 91434:2021-05**: Agri-photovoltaic systems – Requirements for primary agricultural use. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021.
- FIORAVANTI, C. Inseticidas naturais avançam na agricultura e rivalizam com os agrotóxicos. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, ed. 358, dez. 2025. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/inseticidas-naturais-avancam-na-agricultura-e-rivalizam-com-os-agrotoxicos/>. Acesso em: 16 dez. 2025.
- IEA PVPS. **Agrivoltaics Action Group**. International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme, 2025. Disponível em: <https://iea-pvps.org/research-tasks/agrivoltaics-action-group/>. Acesso em: 16 dez. 2025.
- IPCC. **Climate Change 2022**: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2022.
- MENDES, R. et al. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. **Science**, v. 332, n. 6033, p. 1097-1100, 2011.
- NISHISAKA, C. S. et al. Soil microbial diversity: A key factor in pathogen suppression and inoculant performance. **Geoderma**, v. 460, art. 117444, ago. 2025.
- PATACZEK, L. et al. Agrivoltaics mitigate drought effects in winter wheat. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 6, e14081, 2023.
- SCHWEIGER, A. H.; PATACZEK, L. How to reconcile renewable energy and agricultural production in a drying world. **Plants, People, Planet**, v. 5, n. 5, p. 650–661, 2023.
- TROMMSDORFF, M. et al. **Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production**: Overview and Performance of Agrivoltaic Systems. Report IEA-PVPS T13-29:2025. Freiburg: Fraunhofer ISE; IEA PVPS Task 13, 2025.
- WALSTON, L. J. et al. Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, art. 932018, 2022.
- ZORZETTO, R. Novos desafios para a produção de alimentos. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 358, p. 18–23, 2025. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2025/11/018-023_capa-clima-e-fome_358.pdf. Acesso em: 16 dez. 2025.