CONSIDERAÇÕES PARA DESENHO DE EXPERIMENTOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Alex Renan Arrifano Manito
Marcelo Pinho Almeida – marcelopa@iee.usp.br
Maria Cristina Fedrizzi
Roberto Zilles
Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente, Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos
Rafael Braghieri Menillo
Moacir Tuzzin de Moraes
Tiago Osório Ferreira
Carlos Eduardo Pellegrino Cerri
Maurício Roberto Cherubin
Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Ciência do Solo

Resumo. *A procura global por alimentos para consumo humano e animal, biocombustíveis e geração de eletricidade impulsiona competição entre os diversos usos dos solos, fazendo-se necessária a consideração de abordagens inovadoras como o agrovoltaico. Entretanto, este tema ainda carece de pesquisa para identificação e mitigação dos riscos associados à inovação, os quais podem criar obstáculos para seus potencias benefícios. Este trabalho apresenta e discute questões associadas ao desenvolvimento de experimentos de pesquisa em sistemas agrovoltaicos a céu aberto inter-espaçados, notadamente, as variáveis de entrada de interesse, a distribuição de luz e perdas associadas ao gerador fotovoltaico. Além disso, também é apresentado o arranjo experimental que será implementado no projeto de pesquisa Agrovoltaico: combinando produção de energia elétrica com produção de alimentos e adaptação às mudanças climáticas - AgriPV_Brazil. Espera-se que o desenvolvimento de experimentos de pesquisa possa alavancar os benefícios advindos de sistemas agrovoltaicos.*

Palavras-chave: *Agrovoltaico, Fotovoltaico, Uso híbrido da terra*

1. INTRODUÇÃO

A procura global por alimentos para consumo humano, animal, biocombustíveis, geração de eletricidade, entre outros, impulsiona uma competição entre os diversos usos dos solos. Assim, o desafio a ser resolvido é como promover a intensificação sustentável do uso da terra para enfrentar os desafios globais críticos, como aumentar a produção de energia renovável (fotovoltaica), promover a segurança alimentar, mitigar e adaptar-se às mudanças climáticas atuais e futuras. Usinas fotovoltaicas, em particular as de solo, demandam áreas substanciais, que competem com a produção de alimentos, rações, fibras e biocombustíveis. Uma possível solução seria a integração sinérgica, na mesma área, de sistemas agrícolas com a geração fotovoltaica, produzindo energia elétrica e alimentos e ajudando a sequestrar carbono (regulação do clima) enquanto fornece outros serviços ecossistêmicos importantes (por exemplo, controle de erosão, biodiversidade do solo, ciclagem de nutrientes, regulação da água e polinização). Ressalta-se que a popularização e a queda de preços de sistemas fotovoltaicos vêm aumentando consideravelmente a área ocupada por essa tecnologia. Neste contexto, o agrovoltaico é um método de hibridização que combina a geração fotovoltaica com usos produtivos, como agricultura, pecuária e serviços ecossistêmicos.

O agrovoltaico se configura como uma solução promissora para abordar os desafios comentados anteriormente. No entanto, em algumas regiões e no atual estágio de maturidade tecnológica, as instalações agrovoltaicas também podem contribuir para custos operacionais e de instalação mais elevados e para uma maior complexidade dos projetos (NREL, 2022). Nos últimos 10 anos, os sistemas agrovoltaicos têm ganhado impulso (Trommsdorff *et al*., 2022), embora a ideia de combinar energia fotovoltaica e agricultura não seja nova, remontando ao início da década de 1980 com a publicação do artigo "*On the Coexitence of Solar -Energy Convertion and Cultivation*" (Goetzberger e Zastrow, 1982). Como o Agrovoltaico é um tema relativamente novo e ainda não atingiu a maturidade, muitos autores estão tentando compilar as informações e experiências encontradas até agora. Por exemplo, Al Mamun *et al.* (2022) apresentaram uma revisão sistemática da literatura sobre este tema, na qual os autores concluem que falta um desempenho financeiro abrangente; Hernandez *et al.* (2019) tentaram criar uma estrutura para avaliar sinergias tecnoecológicas que pudessem ser aplicadas a sistemas agrovoltaico; Kumpanalaisatit *et al.* (2022) compilam o status do agrovoltaico até 2022 e destacaram que o agrovoltaico em usinas fotovoltaicas pré-existentes ainda é um tema inexplorado; Sarr *et al.* (2023) fornecem uma visão geral sobre a co-localização sinérgica do agrovoltaico; Toledo *et al.* (2021) fornecem uma visão geral sobre tecnologias emergentes que poderiam ser aplicadas a sistemas agrovoltaico e outros pontos que devem ser observados ao lidar com tais sistemas; Trommsdorff *et al.* (2022) abordam vários aspectos dos sistemas agrovoltaico e fornece insights sobre a

regulamentação adotada em diferentes países; e Walston *et al.* (2022) fornecem insights sobre diversas variáveis relacionadas aos serviços ecossistêmicos e relaciona o agrovoltaico com os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU. Este último artigo destaca ainda a importância do projeto e do desenvolvimento de uma revisão sistemática para avaliar as lacunas de pesquisa presentes neste campo, principalmente a falta de pesquisas voltadas para os sistemas em condições tropicais.

No Brasil, o tema agrovoltaico é relativamente novo, exigindo investimentos em pesquisa e desenvolvimento para abordar esta questão estratégica, e entender as oportunidades e limitações deste tipo de intensificação do uso da terra. Este artigo visa apresentar pontos a serem considerados para o desenvolvimento de experimentos para pesquisa em sistemas agrovoltaicos a céu aberto inter-espaçados. As próximas seções apresentam as variáveis de interesse (seção 2), as considerações sobre a utilização de área e o sombreamento (seção 3) e um arranjo experimental juntamente com o racional de decisão que embasou a concepção do experimento que será implementado no projeto de pesquisa *Sistema Agrovoltaico: combinando produção de energia elétrica com produção de alimentos e adaptação às mudanças climáticas - AgriPV_Brazil* (seção 4). O artigo finaliza com as conclusões, onde são comentadas as expectativas para o experimento e levantadas perspectivas que devem ser levadas em consideração quando da implementação de experimentos para avaliação de sistemas agrovoltaicos.

2. VARIÁVEIS DE INTERESSE EM SISTEMAS AGROVOLTAICOS

Os sistemas agrovoltaicos são influenciados por diversos fatores, os quais muitas vezes possuem acoplamento entre si, dificultando avaliações de desempenho. A Tab. 1 elenca de forma não extensa alguns fatores a serem levados em consideração e os agrupa por categoria para fins ilustrativos, contudo deve-se ressaltar que esses fatores não devem ser avaliados em separado, uma vez que sistemas biológicos possuem muitos meios compensatórios os quais tornam as variáveis de interesse altamente acopladas. Por exemplo, a alteração das condições de irradiância sobre culturas pode provocar mudança morfológica nas plantas para compensar deficiências na captação de luz. Estas alterações modificam o metabolismo da cultura e a sua interação com os meios bióticos e abióticos em seu entorno (solo, biota do solo, atmosfera, etc.). Para delimitação do objeto a ser tratado neste trabalho, faz-se necessária a definição do que se configura como um sistema agrovoltaico: sistemas em que a atividade agrícola e a geração fotovoltaica compartilham a mesma área e possuem sinergia entre si. Assim, sistemas fotovoltaicos meramente instalados em áreas de fazendas ou em telhados de edificações presentes em áreas de atividade agrícolas não são considerados como sistemas agrovoltaicos.

Tabela 1 – Variáveis de entrada de interesse em sistemas agrovoltaicos.

Solo	Manejo e operação	Microclima	Meteorológicas	Conf. geométrica
Ciclo de micro e macro nutrientes	Maquinário	Déficit de pressão de vapor	Irradiância	Distribuição de luz
Biota do solo	Rotação de culturas	Irradiância abaixo dos módulos	PAR	Distribuição de água
Difusão e retenção de água	Altura máxima das culturas	PAR	Precipitação	
Erosão	Passagem de cabos	Albedo	Temperatura ambiente	
Compactação durante instalação do gerador	Limpeza dos módulos	Temperatura	Velocidade e direção do vento	
	Irrigação			

Destaca-se que, em sistemas agrovoltaicos, diferentemente de sistemas fotovoltaicos, haverá maior intensidade de trabalho sendo realizado dentro da área do gerador, o qual pode envolver o aumento de riscos para pessoas e equipamentos, principalmente durante etapas de semeadura e colheita, onde podem ser utilizados instrumentos para corte e/ou maquinário. A Fig. 1 ilustra a colocação das variáveis apresentadas na Tab. 1, onde são apresentadas diferentes distribuições de luz e água na área do gerador, erosão do solo principalmente pelo acúmulo de água na área abaixo da borda inferior dos módulos fotovoltaicos, e as necessidades de maquinário em termos de espaçamento entre fileiras e altura das mesas.

Com relação ao desempenho do sistema, a variáveis mais comumente encontradas são LER (Land Equivalent Ratio – Razão de Área Equivalente) que compara a produção de eletricidade e biomassa com valores de referência e basicamente visa comparar o sistema agrovoltaico com sistemas fotovoltaicos e agrícolas separados; WUE (Water Use Efficiency – Eficiência de Uso de Água) que compara a quantidade de água utilizada para a produção da mesma quantidade de biomassa; qualidade da produção agrícola em termos de avaliação da composição nutricional e energética da cultura; e métricas tradicionais utilizadas para sistemas fotovoltaicos como produtividade. Ressalta-se que as avaliações devem ser feitas dentro de contextos amplos de forma que a utilização de apenas uma métrica, como LER, pode fornecer uma visão enviesada sobre os benefícios de sistemas agrovoltaicos.

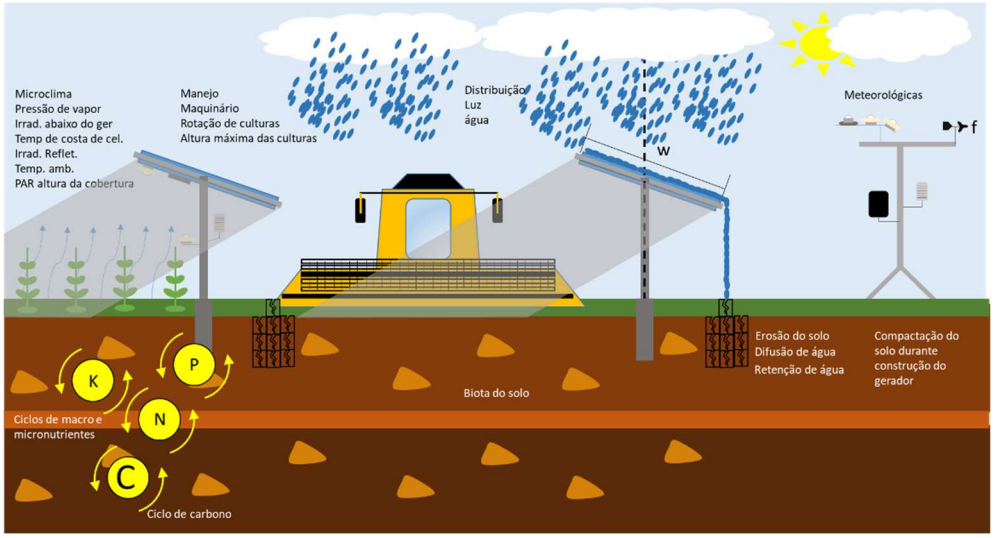


Figura 1 – Esquemático de sistema agrovoltaico.

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE IRRADIAÇÃO NO O SOLO, SOMBREAMENTO E GANHOS DE BIFACIALIDADE

A topologia de um gerador fotovoltaico afetará a distribuição da luz na área abaixo e próxima do mesmo, influenciando a radiação que chega ao solo, as perdas por sombreamento e a quantidade da energia incidente que é refletida para a parte posterior dos módulos fotovoltaicos e influenciará os ganhos de bifacialidade em módulos bifaciais. As análises de sensibilidade desta seção foram realizadas utilizando o software SAM (*System Advisor Model*) do NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) e posteriormente tratadas utilizando *Matlab*.

A irradiação que chega ao solo na área de um gerador fotovoltaico é bastante heterogênea e pode ser dividida basicamente em quatro situações de sombreamento sobre o solo durante as horas de maior densidade de energia da irradiação solar, nomeadamente, sempre sombreadas (B), nunca sombreadas (D), mais sombreadas no verão do que no inverno (A) e mais sombreadas no inverno do que no verão (C). A Fig. 2 apresenta cada uma das situações citadas anteriormente, que são função das variáveis X, L, Θ, Y (definidas na Fig. 2) e da latitude. É importante destacar que nem sempre as quatro situações existirão em um gerador fotovoltaico e que a Fig. 2 apresenta um exemplo ilustrativo genérico.

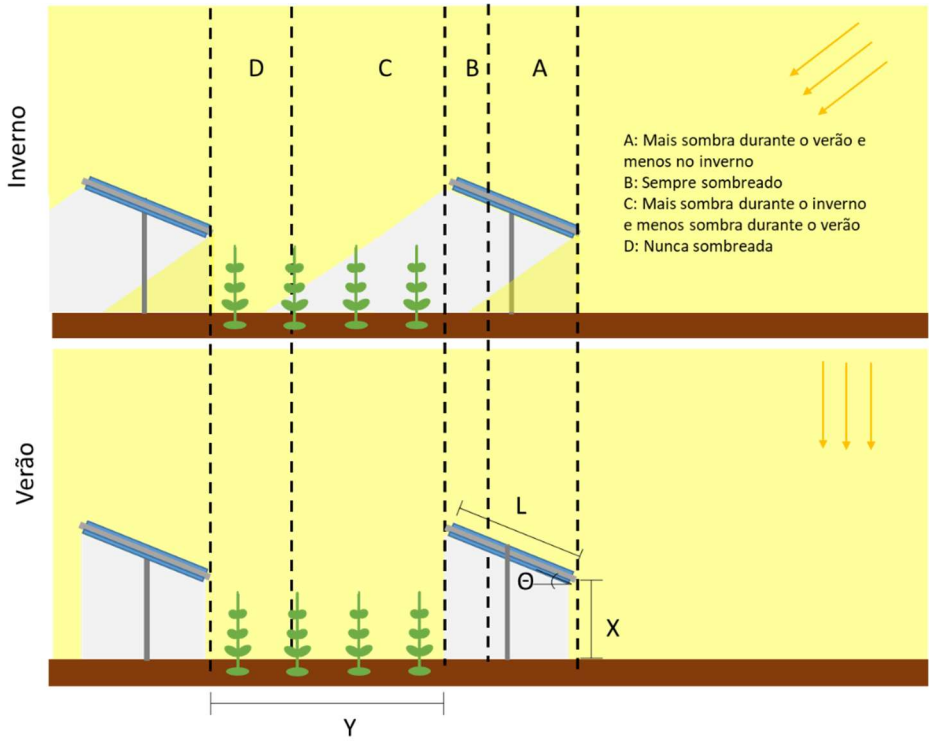
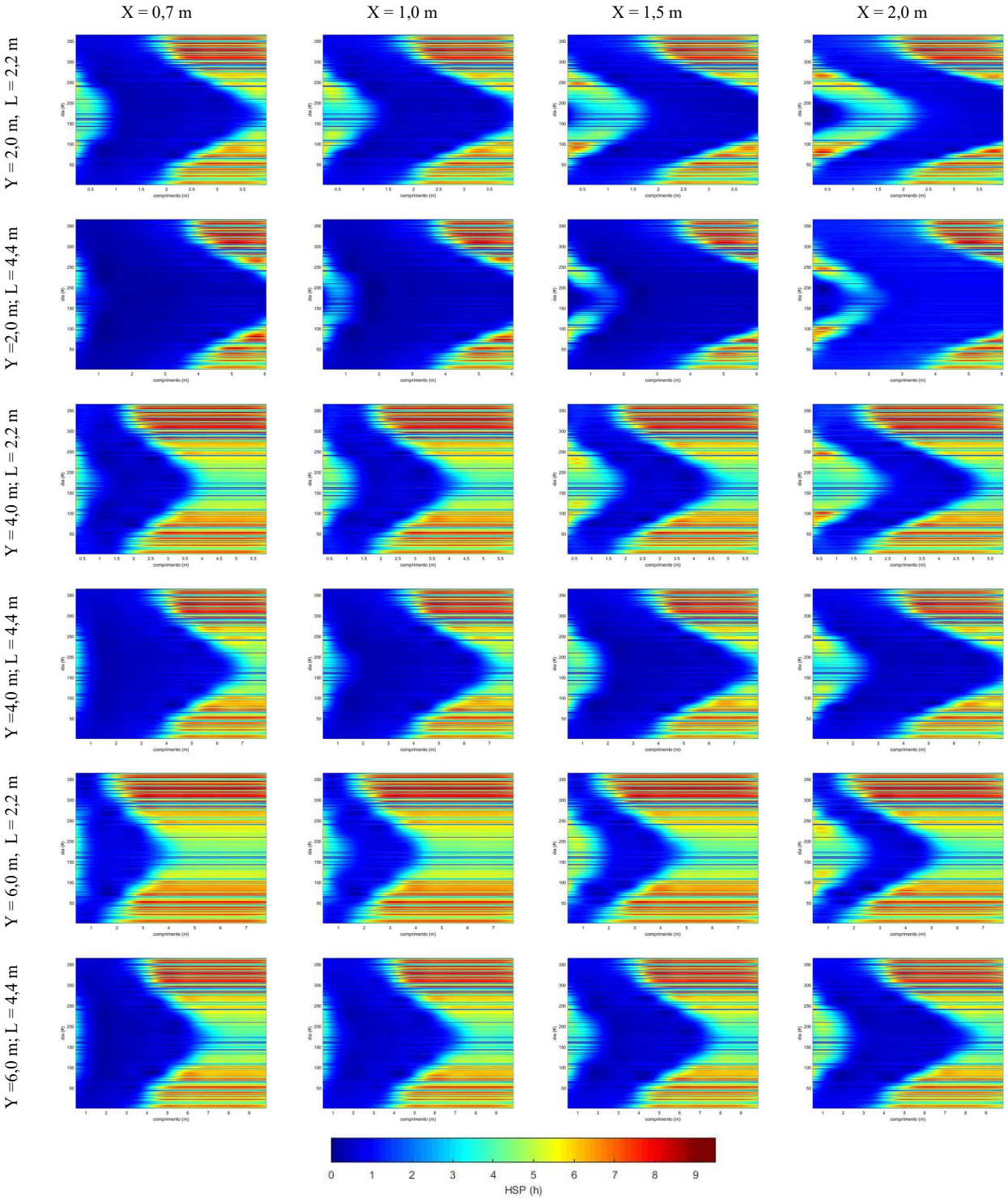


Figura 2 – Exemplo de distribuição de luz em um sistema agrovoltaico genérico.

Para avaliar a distribuição da irradiação no local do experimento, foi realizada uma análise de sensibilidade com as variáveis X, Y e L (com Θ = 22º) para um sistema instalado em Piracicaba, SP. A Tab. 2 mostra o conjunto de simulações realizadas, onde é estimada a quantidade de horas de sol pleno (HSP) a qual estaria sujeito o solo em cada dia do ano. A escolha por horas de sol pleno em vez de irradiância se deve ao fato de que a primeira fornece uma ideia melhor sobre a quantidade de energia que chega ao solo e pode ser mais diretamente comparada com o valor de referência médio para a localidade selecionada, qual seja, 5,37 HSP/dia. O eixo horizontal das figuras da Tab.2 corresponde à distância entre o ponto do solo localizado imediatamente abaixo da porção mais baixa de um módulo e o mesmo ponto do módulo localizado na fileira posterior. Nas simulações, os efeitos de borda são desconsiderados, o que é uma suposição razoável para o caso de sistemas montados em solo, os quais possuem mesas extensas, e considerando que a mesa sob análise se encontra no meio do gerador, e considera-se também o possível sombreamento de mesas à frente. A variáveis X, Y e L foram avaliadas nos intervalos de valores de 0,7 m a 2 m, 1 m a 6 m e 2,2 m a 4,4 m, respectivamente.

Tabela 2 - Horas de sol pleno que o solo estaria sujeito na área ocupada por um gerador fotovoltaico ao longo do ano.



A Tab. 2 apresenta uma heterogeneidade considerável na distribuição de luz no solo, o que afetará as culturas plantadas abaixo do gerador. Para que possa haver todas as situações de sombreamento mencionadas anteriormente o gerador deve ser instalado a uma altura maior que 1,5 m e o espaçamento entre fileiras deve ser maior que 4 m. Nos casos de Y igual a 2 m, nota-se que não haveria situação na qual o número de horas de sol pleno atingindo o solo não fosse consideravelmente reduzido durante os meses de inverno. Adicionalmente, no caso de sistemas com X maior que 1,5 m, percebe-se que o sombreamento também afetaria o solo abaixo da mesa imediatamente atrás, impedindo parte da irradiação nos meses de inverno. A escolha de culturas deve levar em consideração as necessidades de luz e como esta última se distribuirá na área do gerador. Além disso, deve-se considerar que apesar do recurso solar diferenciado, as culturas continuarão compartilhando outros fatores, como o solo e a água o que provocará uma interação que provavelmente produzirá um resultado diferente de situações totalmente sombreadas ou totalmente sem sombra.

Quanto aos ganhos de reflexão para a parte posterior dos módulos, a Fig. 3 apresenta os resultados da análise de sensibilidade para L = 2,2 m, na Fig. 3 (a), e L = 4,4 m, na Fig. 3 (b). Essas figuras apresentam a distribuição do ganho de energia refletida na parte posterior dos módulos em função da altura de instalação (X) e do espaçamento entre fileiras (Y). Nota-se a diferença de energia refletida em função de L, que, ao ser dobrado, reduz consideravelmente os ganhos de energia refletida para a parte posterior dos módulos. Nota-se, também, que a energia refletida é influenciada tanto pela altura de instalação quanto pelo espaçamento entre fileiras, apresentando comportamento similar a curvas de indiferença e uma saturação do gradiente de energia refletida para a costa do módulo em função da altura de instalação, o que sugere que aumentá-la não incorreriam em ganhos de bifacialidade, e provavelmente aumentaria os custos das estruturas de sustentação dos módulos.

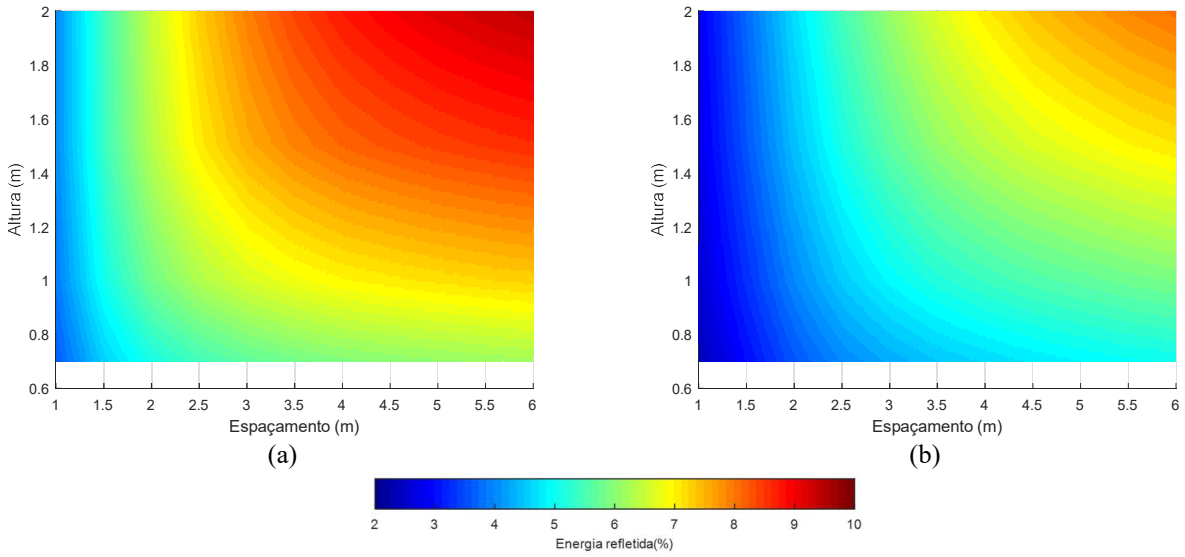


Figura 3 – Energia refletida para a parte posterior dos módulos fotovoltaicos. (a) L igual 2,2 m e (b) L igual 4,4 m.

A ocupação do terreno foi considerada em termos do *ground cover ratio* (GCR) e das perdas por sombreamento em X e Y, os quais são apresentadas na Fig. 4 (a), para o caso de L igual a 2,2 m, e na Fig. 4 (b), para o caso de L igual a 4,4 m. Nota-se o aumento das perdas por sombreamento com o aumento de L para uma mesma distância de separação entre mesas, como esperado, porém há também o aumento considerável de GCR, o que sugere melhor utilização do terreno do ponto de vista da geração fotovoltaica. Valores típicos de GCR para sistemas fixos variam entre 50% e 55% (Berrian *et al.*, 2019), os quais necessitariam de espaçamento entre fileiras entre 3 m e 4 m para L igual a 4,4 m, e de mais ou menos 2 m para L igual a 2,2 m. Observa-se também que, para um mesmo GCR, a configuração com L igual a 4,4 m possui menos perdas por sombreamento.

4. ARRANJO EXPERIMENTAL

Os pontos levantados nas seções anteriores foram levados em consideração para a elaboração de um arranjo experimental que visa avaliar casos de hibridação do uso do solo em usinas fotovoltaicas pré-existentes, bem como casos em que a hibridação do uso do solo foi concebida desde o início, permitindo estimar o *Land Equivalent Ratio* (LER) para cada caso mencionado (além de outras métricas de desempenho, como *water use efficiency* e *radiation use efficiency*), e contribuir para o desenvolvimento de diretrizes para o projeto, construção e operação de sistemas agrovoltaicos. A Fig. 5 apresenta o local onde será montado o experimento no campus da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros (ESALQ) juntamente com a representação da área a ser ocupada pelo experimento. Segundo a classificação de Koppen, o clima regional é definido como subtropical úmido com inverno seco (Cwa). A precipitação média anual é de aproximadamente 1.400 mm e a temperatura média anual é de 22,9°C (com o mês mais quente de verão ultrapassando 23°C e o mês mais frio abaixo de 18°C).

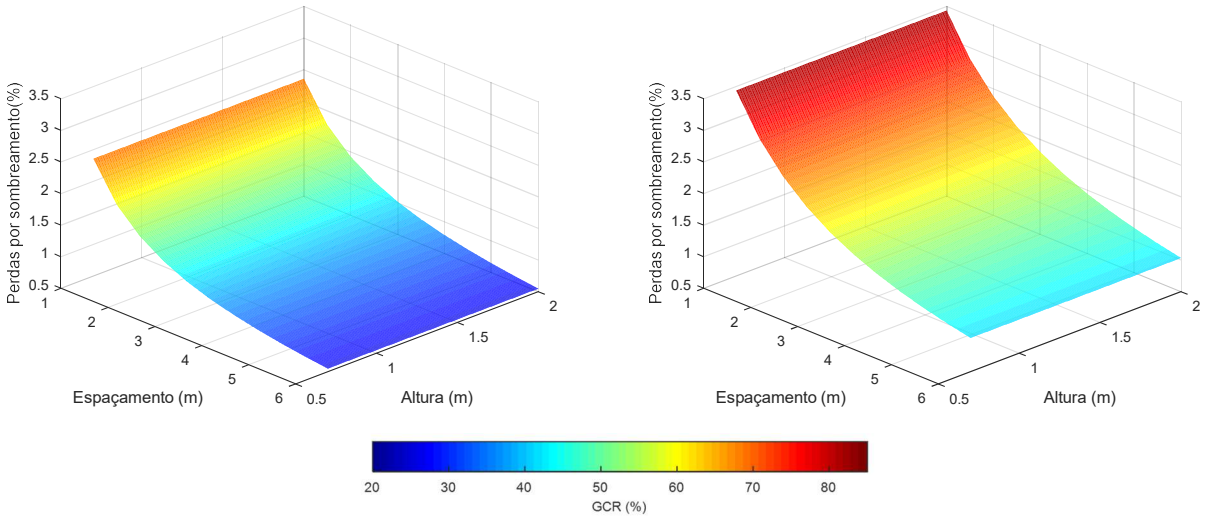


Figura 4 – Perdas por sombreamento e GCR. (a) L igual 2,2 m e (b) L igual 4,4 m.

O gerador fotovoltaico terá capacidade nominal de aproximadamente 110 kWp, divididos em 10 mesas, cada uma com seguimento do ponto de máxima potência independente. Devido a uma das premissas do projeto ser que os sistemas agrovoltaicos no Brasil iniciariam sua adoção pelo mercado com configurações que não se afastam muito dos sistemas fotovoltaicos padrão, serão utilizados módulos fotovoltaicos bifaciais de aproximadamente 550 W em estruturas metálicas fixas monopolares montadas no solo interespaçadas com ângulo fixo. O Brasil é um país continental, portanto a escassez de terras não é tão restritiva como é em outros países, como o Japão, onde existe um apelo maior para estruturas adaptadas. Além disso, como uma das montagens experimentais avalia especificamente a inserção da agricultura em sistemas fotovoltaicos pré-existentes, foi necessária a utilização de uma estrutura de ampla utilização no mercado. A escolha dos módulos bifaciais para o projeto deve-se à perspectiva de ampla utilização deste tipo de módulo, que atingiu uma fração de mercado de 20% em 2020 e deverá atingir os 70% até 2030 (VDMA, 2020), e ao fato de que os módulos bifaciais não são completamente opacos, permitindo que alguma quantidade de luz passe por eles.

O experimento foi concebido para possuir duas áreas que funcionarão como controle, uma para o sistema fotovoltaico, área FV, e outra para a produção agrícola, área Agricultura, e dois tratamentos onde serão implantados os sistemas agrovoltaicos, áreas Agrovoltaico$_{AI}$ e Agrovoltaico$_{CI}$. A área Agrovoltaico$_{AI}$ considera a situação onde a agricultura é inserida na área de uma usina preexistente. Dessa forma, a topologia do gerador segue a construção típica encontrada em usinas fotovoltaicas (As mesas possuem duas fileiras empilhadas com 10 módulos cada, como mostrado na Fig. 6) de forma a avaliar o potencial de hibridização de áreas já voltadas para a produção de energia elétrica, tema ainda hoje pouco explorado (Kumpanalaisatit *et al.*, 2022). A área Agrovoltaico$_{CI}$ considera a situação onde a hibridização de uso foi concebida desde o princípio e, dessa forma, possui uma forma atípica de ocupação do terreno (maior distanciamento entre fileiras e maior altura de instalação dos módulos fotovoltaicos), sendo uma ocupação menos densa do que a encontrada em sistemas fotovoltaicos convencionais (as mesas possuem uma única fileira com os 20 módulos, como mostrado na Fig. 6). Isso foi feito de forma a avaliar a produtividade em diferentes padrões de distribuição de recurso solar. A Fig. 6 apresenta o perfil lateral das mesas nos diferentes tratamentos, juntamente com os sensores a serem instalados.

As áreas dos subsistemas Agricultura, Agrovoltaico$_{AI}$ e Agrovoltaico$_{CI}$ serão divididas para cultivo de pastagem (gramínea) e culturas anuais (sucessão soja-milho), permitindo quantificar a influência do sistema fotovoltaico nas culturas em termos de eficiência no uso da radiação e produção de biomassa e grãos. A espécie de gramínea será a Urochloa ruziziensis (“braquiária”), gramínea mais cultivada no Brasil. A soja será semeada em novembro (início do período de chuvas na região de São Paulo) e colhida em fevereiro. Logo após a colheita da soja, será semeado o milho como segunda safra. A colheita do milho ocorrerá em junho/julho. As práticas de manejo da cultura seguirão a recomendação agronômica da EMBRAPA para ambas as culturas.

No início do experimento (baseline) e após 12 e 24 meses, campanhas de amostragem de solo serão realizadas para medir as mudanças no solo induzidas pelos sistemas. Resumidamente, amostras de solo (com e sem influência do gerador fotovoltaico) serão coletadas para avaliar os estoques de carbono do solo, indicadores químicos (conteúdos de nutrientes, acidez e CTC), indicadores físicos (densidade do solo, agregação, porosidade do solo, curva de retenção de água no solo, teor de água, condutividade hidráulica, infiltração e temperatura do solo) e biológicos (atividade enzimática, macrofauna do solo e microrganismos).

As plantas serão avaliadas durante cada safra agrícola por meio de várias métricas, como taxa de crescimento, taxa fotossintética ativa, insumos de matéria seca e rendimento da cultura. Por fim, alguns parâmetros atmosféricos serão monitorados de forma pontual, como emissões de gases de efeito estufa - GEE (CO_2, N_2O, CH_4) e interceptação da radiação solar, ou de forma contínua, como as condições climáticas, ou seja, precipitação, temperatura do ar, incidência de radiação, evapotranspiração, e condições do solo, como temperatura e umidade, além de calcular o balanço de carbono

do sistema, o fluxo de água no solo, a dinâmica do calor no solo, bem como, correlacionar os dados climáticos com a produção de energia elétrica, eficiência do sistema e crescimento e produtividade das culturas.

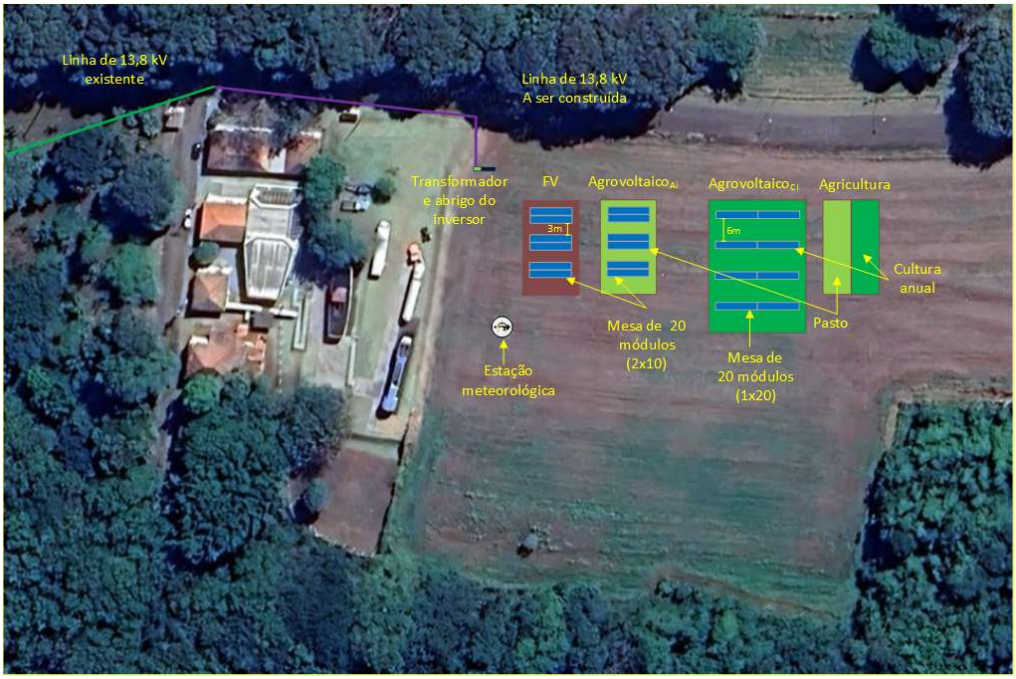
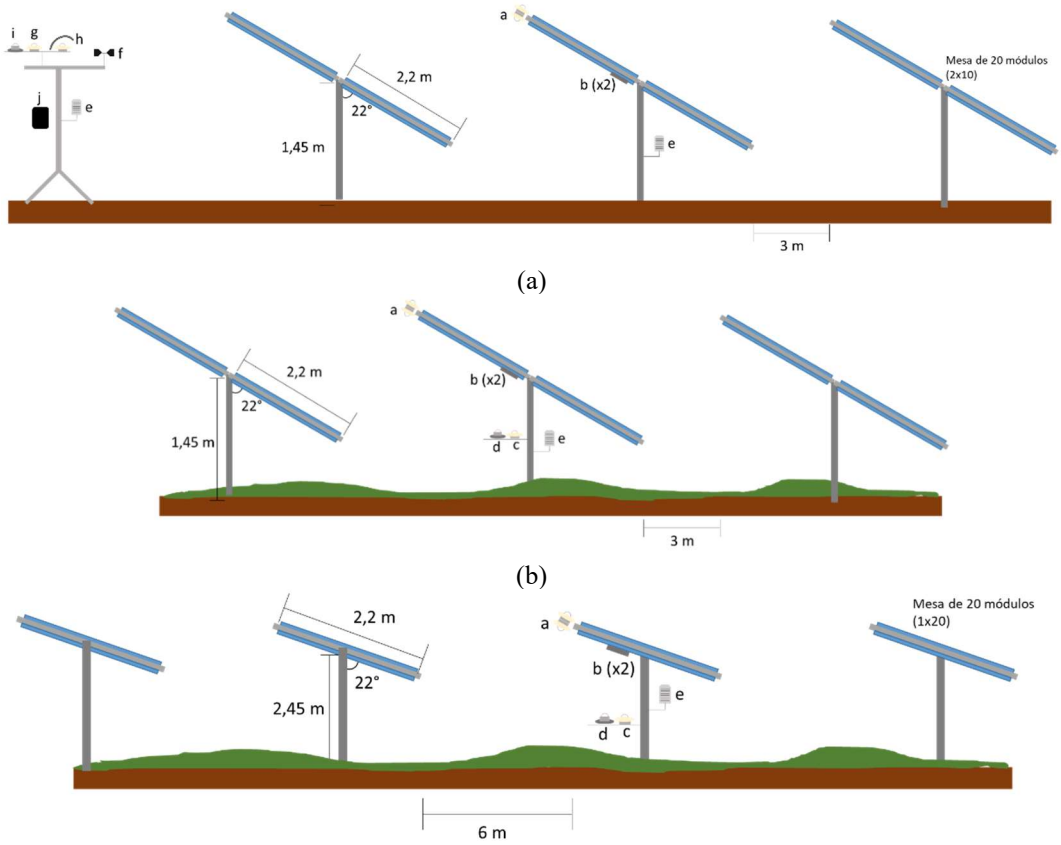


Figura 5 – Layout do experimento.



a – Albedômetro (POA e irradiância refletida); b – termopares (temperatura de célula); c – Piranômetro sombreado; d – Sensor PAR sombreado; e – Termo-higrômetro; f – anemômetro; g – piranômetro para GHI; h – piranômetro com anel de sombreamento para DHI; i – Sensor PAR não sombreado; j – Pluviômetro.

Figura 6 – disposição dos geradores fotovoltaicos nos diferentes tratamentos. (a) FV, (b) Agrovoltaico$_{AI}$ e (c) Agrovoltaico$_{CI}$.

O perfil de distribuição da irradiação ao longo do ano juntamente com necessidades associadas ao manejo (por exemplo, espaço para uso de maquinário) foram os quesitos mais decisivos na escolha da configuração das mesas a serem montadas na área Agrovolaico$_{CI}$, enquanto que a área Agrovoltaico$_{AI}$ priorizou a ocupação típica de sistemas fotovoltaicos convencionais, encontrada em sistemas fixos de solo, sendo desejado valor aproximado a 55% de ocupação da área, sendo desta forma fiel a premissa principal que norteia esta parte do experimento (agrovoltaico inserido em usina preexistente). Dispostas da forma representada nas Figs. 5 e 6, as áreas que estão sempre sombreadas estariam no Agrovoltaico$_{AI}$, as áreas que nunca estão sombreadas estariam no Agrovoltaico$_{CI}$, as áreas que ficam mais sombreadas no verão do que no inverno estariam no Agrovoltaico$_{CI}$ e as áreas que ficam mais sombreadas no inverno do que no verão estariam no Agrovoltaico$_{AI}$ e no Agrovoltaico$_{CI}$. Estas situações podem ser observadas na Fig. 7, que apresenta a irradiação diária no solo entre fileiras ao longo do ano. Estas regiões com diferentes frações do recurso solar poderão ser comparadas com os tratamentos de controle, FV e Agricultura.

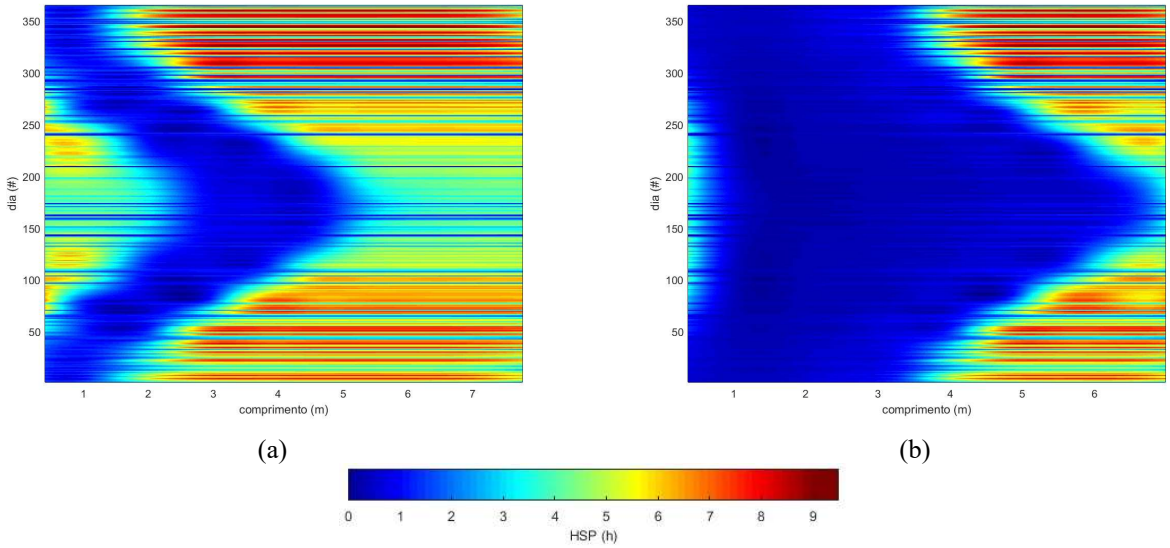


Figura 7 - Horas de sol pleno na área do gerador ao longo do ano para as configurações escolhidas. (a) Sistema Agrovoltaico$_{CI}$ e (b) sistema Agrovoltaico$_{AI}$.

Um dos pontos de risco, contudo, são os chamados efeitos de borda, os quais podem afetar experimentos de forma considerável, uma vez que arranjos experimentais geralmente possuem dimensões reduzidas em relação a usinas reais. A Fig. 8 ilustra o efeito de borda para os períodos da manhã e da tarde para as mesas do sistema Agrovoltaico$_{CI}$, e a Fig. 9 apresenta o percentual do solo afetado por efeito de borda durante o solstício de inverno para os sistemas Agrovoltaico$_{AI}$ e Agrovoltaico$_{CI}$, situação que é considerada a pior do ano, pois o sol está baixo no horizonte.

Nota-se que os efeitos de borda afetam em nó máximo 21% e 12% durante o período de 9h às 15h no solstício de inverno, respectivamente para as áreas Agrovoltaico$_{AI}$ e Agrovoltaico$_{CI}$. Em situações onde o tamanho do gerador é limitado, pode-se utilizar anteparos em substituição aos módulos fotovoltaicos nos pontos extremos do gerador de forma a aumentar suas dimensões e reduzir o efeito de borda na área estudada.

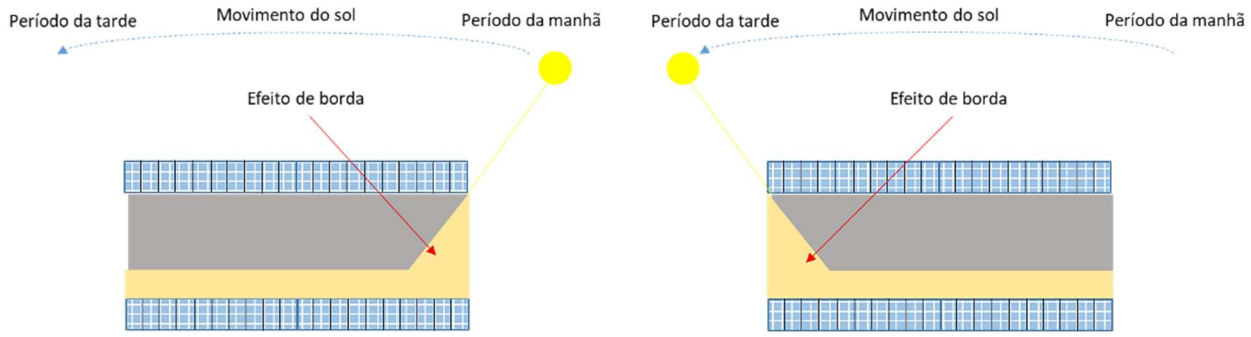


Figura 8 – Efeitos de borda. (a) Manhã e (b) tarde.

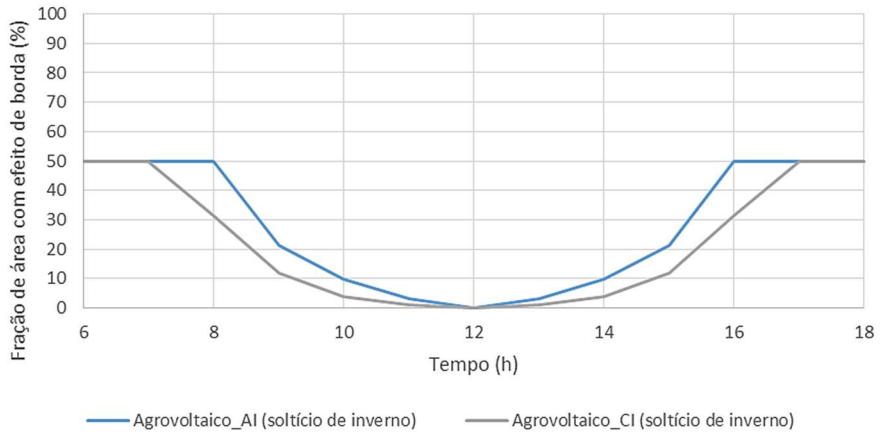


Figura 9 – Fração de área afetada por efeitos de borda

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou pontos a serem considerados quando do desenvolvimento de projetos de pesquisa associados com sistemas agrovoltaicos. Os pontos contemplaram as variáveis a serem levadas em consideração e a distribuição da irradiância na área do gerador. Ressalta-se que os resultados apresentados de distribuição da irradiância são adequados apenas para latitudes em torno de 20º, embora recomendações gerais possam ser feitas como a necessidade de avaliação da existência das áreas A, B, C e D da Fig. 2.

Além disso, foi apresentada a configuração a ser utilizada no projeto de pesquisa *Sistema Agrovoltaico: combinando produção de energia elétrica com produção de alimentos e adaptação às mudanças climáticas*. Ressalta-se que os benefícios advindos da infraestrutura a ser instalada extrapolam as finalidades mais imediatas do projeto de pesquisa que a concebeu, deixando um legado que possibilitará a produção de trabalhos científicos por muitos anos. No futuro, outras linhas de pesquisa abarcadas pelo leque do agrovoltaico poderão ser conduzidas, como sistemas com pastagem e animais, fornecimento de serviços ecossistêmicos e apicultura, além da possibilidade de teste de outras culturas (sazonais ou permanentes) na área do experimento. A concepção do projeto procurou adotar uma topologia que preservasse flexibilidade de usos e, por isso, evitou infraestrutura feita sob medida para um propósito apenas. Assim, essa infraestrutura amplia a capacidade técnica de realização de projetos de pesquisa e formação de recursos humanos ao inserir no campus de Piracicaba da USP um campo de testes onde será possível realizar diversos estudos em linhas de pesquisa emergentes sobre agrovoltaico, assunto que vem ganhando cada vez mais relevância internacional.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio do RCGI – Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa, sediado pela Universidade de São Paulo (USP) e patrocinado pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2020/15230-5; 2014/50279-4) e patrocinadores, e à importância estratégica do apoio da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) por meio da regulamentação da taxa de P&DI. Agradecemos também o apoio à pesquisa e desenvolvimento da TotalEnergies através do financiamento do projeto "Sistema Agri-PV: combinando produção de energia solar com produção de alimentos e adaptação às mudanças climáticas" (código ANP 23674-5).

REFERÊNCIAS

Al Mamun, M. A., Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N. A., Aziz, A. A., (2022) A review of research on agrivoltaic systems. Renwable and Sustainable Energy Reviews. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351

Berrian, D., Libal, J., Klenk, M., Nussbaumer, H., Kopecek, R., 2019. Performance of bifacial PV arrays with fixed tilt and horizontal single-axis tracking: comparison of simulated and measured data. IEEE J. of Photovolt. 9 (6), 1583–1589

Goetzberger, A., Zastrow, A., (1982) On the Coexistence of Solar Energy Conversion and Plant Cultivation. International Journal of Solar Energy. DOI: https://doi.org/10.1080/01425918208909875

Hernandez, R. R., Armstrong, A., Burney, J., Ryan, G., Moore-O'Leary, K., Diédhiou, I., Grodsky, S. M., Saul-Gershenz, L., Davis, R., Macknick, J., Mulvaney, D., Heath, G. A., Easter, S. B., Hoffacker, M. K., Allen, M. F., Kammen, D. M., (2019) Techno–ecological synergies of solar energy for global sustainability. Nature Sustainability. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-019-0309-z

Kumpanalaisatit, M., Setthapun, W., Sintuya, H., Pattiya, A., Jansri, S. N., (2022) Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food,environment, economy, and society. Sustainable Production and Consumption. DOI: https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.013

NREL (2022). The 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors in the United States: Lessons from the InSPIRE Research Study. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-83566. Available at: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83566.pdf

Sarr, A., Soro Y. M., Tossa, A. K., Diop, L., (2023) Agrivoltaic, a Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production in Perpetual Mutation: A Comprehensive Review. Processes. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11030948

Toledo, C., Scognamiglio, A., (2021) Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns). Sustainability. DOI: https://doi.org/10.3390/su13126871

Trommsdorff, M., Dhal I. S., Ozdemir O. E., Ketzer, D., Weinberger, N., Rosch, C., (2022) Solar Energy Advancement in Agriculture and Food Production Systems. Chapter 5 – Agrivoltaics: solar power generation and food production. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89866-9.00012-2

VDMA (2020). Photovoltaic roadmap (ITRPV): Eleventh edition.

Walston, L., Barley, T., Bhandari, I., Campbell, B., McCall, J., Hartmann, H., Dolezal, A., (2022) Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals. Frontiers. DOI: https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.932018

CONSIDERATIONS FOR THE DESIGN OF PERFORMANCE EVALUATION EXPERIMENTS OF AGRIVOLTAIC SYSTEMS

Abstract. *The global demand for food for both human and animal consumption, biofuels and electricity generation drives competition between different land uses, making it necessary to consider innovative approaches such as agrovoltaics. However, this topic still lacks research to identify and mitigate the risks associated with innovation, which can create obstacles to its potential benefits. This work presents and discusses issues associated with the development of research experiments in inter-spaced open-air agrovoltaic systems, notably, the input variables of interest, the distribution of light and losses associated with the photovoltaic generator. Furthermore, the experimental arrangement that will be implemented in the research project Agrovoltaico: combinando produção de energia elétrica com produção de alimentos e adaptação às mudanças climáticas - AgriPV_Brazil. It is expected that the development of research experiments can leverage the benefits arising from agrovoltaic systems.*

Keywords: *Agrivoltaics, Photovoltaics, Land-use hybridization*