

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNNA MARQUES BRUM ALVES

MAPEAMENTO DAS ÁREAS COM POTENCIAIS PARA INSTALAÇÃO DE SISTEMAS
AGROVOLTAICOS NO BRASIL

CURITIBA
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNNA MARQUES BRUM ALVES

MAPEAMENTO DAS ÁREAS COM POTENCIAIS PARA INSTALAÇÃO DE SISTEMAS
AGROVOLTAICOS NO BRASIL

Artigo apresentado como requisito final
à conclusão do curso de MBA em
Gestão Ambiental, Setor de Ciências
Agrárias, Universidade Federal do
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vizioli

CURITIBA
2024

RESUMO

O Brasil possui uma posição de destaque mundial na produção e exportação de bens primários, como grãos e carne. A necessidade de adoção de práticas mais sustentáveis para o combate às mudanças climáticas, desmatamento e desigualdades sociais se faz urgente para se manter competitivo no mercado. Devido à sua vasta extensão territorial, alta incidência de radiação solar e diversidade de climas e solo, o país apresenta um imenso potencial para a implementação de sistemas agrovoltáicos. Esses sistemas integram a produção agrícola ou pecuária com a geração de energia solar, otimizando o uso do solo e promovendo benefícios ambientais, sociais e econômicos. Este estudo se propõe a mapear áreas potenciais para a instalação de sistemas agrovoltáicos no Brasil, excluindo a Amazônia Legal e outras áreas protegidas. Utilizou-se uma combinação de variáveis físicas e climáticas, além da proximidade com subestações de energia, fornecidas pela *Global Solar Atlas* e *MapBiomass*, e processadas no QGIS e *Google Earth Engine*. Os resultados indicam que o país possui mais de 1,9 milhões de hectares de plantio de soja e cerca de 5,8 milhões de hectares de pastagens aptas para a instalação desses sistemas, entre outras culturas. Cerca de 90% do território apresenta alto potencial para instalação de sistemas agrovoltáicos, ou 39,46 milhões de hectares. A implementação de sistemas agrovoltáicos pode contribuir significativamente para a diversificação da matriz energética, aumento da produtividade agrícola e fortalecimento da sustentabilidade rural, sem a necessidade de abrir novas áreas para uso agrícola ou energético. O estudo sugere a necessidade de regulamentações específicas e políticas públicas para incentivar a adoção dessa tecnologia, promovendo um desenvolvimento mais sustentável no contexto brasileiro.

Palavras-chave: sistemas agrovoltáicos, geoprocessamento, energia solar, sustentabilidade, otimização do uso do solo.

ABSTRACT

Brazil holds a prominent global position in the production and export of primary goods, such as grains and meat. The urgent need for adopting more sustainable practices to combat climate change, deforestation, and social inequalities is essential for maintaining competitiveness in the market. Given its vast territorial extent, high solar radiation, and diverse climates and soils, the country has immense potential for implementing agrivoltaic systems. These systems integrate agricultural or livestock production with solar energy generation, optimizing land use and promoting environmental, social, and economic benefits. This study aims to map potential areas for the installation of agrivoltaic systems in Brazil, excluding the Legal Amazon and other protected areas. A combination of physical and climatic variables, along with proximity to energy substations, was utilized, drawing from data provided by the *Global Solar Atlas* and *MapBiomass*, and processed in QGIS and *Google Earth Engine*. The results indicate that the country has over 1,9 million hectares of soybean cultivation and approximately 5.8 million hectares of pastures suitable for the installation of these systems, among other crops. Around 90% of the territory demonstrates high potential for installation, totaling 39.46 million hectares. The implementation of agrivoltaic systems could significantly contribute to diversifying the energy matrix, increasing agricultural productivity, and strengthening rural sustainability, without the need to clear new areas for agricultural or energy use. The study suggests the necessity for specific regulations and public policies to encourage the adoption of this technology, promoting more sustainable development in the Brazilian context.

Keywords: agrivoltaic systems, geoprocessing, solar energy, sustainability, land use optimization

INTRODUÇÃO

Apesar das grandes proporções do território brasileiro, há debates sobre a necessidade da conversão de áreas florestais em novos usos, como para agropecuária e construção de parques solares/eólicos. Com uma rica biodiversidade, o país se vê entre iniciativas conservacionistas e o dever de impulsionar a socioeconomia muito apoiada na produção e exportação de bens primários. Sua posição entre os cinco maiores produtores de *commodities* do mundo, se dá pela vantagem territorial, diversidade de solos, tipos de clima, entre outros fatores. Biomas únicos como a floresta Amazônica, Mata Atlântica e Cerrado são, com razão, alvos de diversas políticas de conservação e proteção devido ao seu valor não só ecológico, mas também sociocultural.

A grande quantidade de rios e lagos faz com que o país também se destaque na produção de energia hidrelétrica, o colocando como referência mundial na produção de energia limpa renovável, combatendo assim a emissão de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas. Ainda mais após o compromisso firmado nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS) em 2015, o Brasil conjuntamente tem se despertado para a produção de energia solar e eólica, matrizes promissoras em todo o mundo e que já tem ocupado um lugar considerável na diversificação da matriz energética brasileira.

Com um potencial de produção e diversas políticas públicas voltadas para o meio rural e o agronegócio, dificuldades administrativas por vezes impedem uma justa distribuição de renda, alimentos e infraestrutura fazendo com que diversas regiões ainda não tenham acesso à bens básicos. Mesmo em cidades, seja de médio, grande ou pequeno porte, há inadimplência das concessionárias de energia, além da falta de diversidade de alimentos de boa qualidade e a um preço acessível, comprometendo a segurança e soberania alimentar da população. Não obstante, o crescimento populacional principalmente nas áreas urbanas, tornam esses problemas ainda mais evidentes devido a competição por terras, e a especulação imobiliária. As discrepâncias socioeconômicas entre áreas urbanas e rurais são nítidas em termos de infraestrutura, carecendo assim de ainda mais políticas de inovação.

Como sucessor dos sistemas agroflorestais, seguindo a mesma lógica de diversificação dos espaços, surgem os sistemas agrovoltaicos. Numa tentativa de suprir demandas cruciais do uso do solo, este duplo aproveitamento da terra emergiu nos últimos anos ao redor do mundo se mostrando cada vez mais vantajoso ambiental, social e economicamente. De fato, o agropecuarista espera tirar o maior proveito da terra, plantando ou criando aquilo que é mais viável e rentável na sua realidade. O que por muitas vezes será uma monocultura ou a criação de grandes quantidades de animais. Além de ter que disputar terra com áreas protegidas, espaços urbanos ou latifúndios, ele também se vê dependente da sua terra para a própria sobrevivência. Na falta da assistência governamental, a busca pela autossuficiência é crucial. Com a proposta de sistemas inovadores e acessíveis como os sistemas agrofotovoltaicos, essa independência pode ser alcançada. A geração de energia solar por si tem se tornado bastante rentável e de baixo custo de instalação, somados à produção de alimentos e/ou à criação de animais, tanto a terra quanto o produtor se beneficiam consideravelmente.

A otimização dos espaços é de suma importância no contexto de intenso crescimento populacional e/ou territórios escassos. Juntamente com uma das pautas mais relevantes no contexto ambiental, a diversificação da matriz energética, sobretudo a troca por uma limpa e renovável, são fundamentais para conter as mudanças climáticas. Muitos são os benefícios do sistema de duplo aproveitamento da terra, não necessitando de abertura de novas áreas para construção de parques solares ou áreas agricultáveis. Há dupla monetização da área, autossuficiência energética, capacidade adaptativa do sistema a diversos contextos (tamanho da terra, tipo de uso do solo e capacidade econômica do usuário), proteção climática do solo/culturas, proteção térmica para trabalhadores, animais e culturas, aumento da produtividade de diversas culturas, entre outros motivos.

Em uma tentativa de demonstrar o potencial dos sistemas agrovoltáticos no contexto brasileiro, este trabalho propõe uma espacialização em grande escala das áreas potenciais para instalação considerando diversos fatores. Alguns países já se encontram bem à frente do Brasil com sua utilização principalmente devido a urgente necessidade de otimizar pequenos territórios e alcançar as ODS. Mesmo ainda não sendo muito difundido, este trabalho se coloca como precursor na exploração do potencial brasileiro.

OBJETIVO

Mapear as áreas mais propícias para instalação dos sistemas agrovoltáticos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Por meio de revisão de literatura elencar as variáveis relevantes para o funcionamento do sistema.
- Mapear áreas estratégicas para a instalação de painéis agrovoltáticos com base em diversos fatores, fornecendo um mapa base para implementação do sistema.

DESENVOLVIMENTO

Com base na literatura, alguns fatores são intrínsecos para o sucesso dos sistemas agrovoltáticos. Com isso, muitas culturas e fatores dominantes são utilizados seguindo os padrões climáticos e características regionais diversas de cada país. Ao trazer a discussão para o contexto brasileiro, é necessária uma análise adaptativa reconhecendo as limitações tanto físicas quanto socioeconômicas.

Os sistemas agrovoltáticos no contexto mundial e brasileiro

As discussões sobre o uso de combustíveis fósseis, mudanças climáticas, práticas e produtos sustentáveis mudou a concepção que a sociedade tinha a respeito do ambiente em que vivem e do alimento que consomem. Com o crescimento populacional acelerado nas últimas décadas, a utilização de agroquímicos para aumentar a produtividade dos alimentos se tornou comum. Assim como a expansão dos limites agrícolas em terrenos e biomas que não deveriam ser ocupados ou utilizados para fins comerciais, como a Amazônia e o cerrado. Políticas públicas, investimentos em projetos, acordos ambientais, socioeconômicos e comerciais têm sido feitos em todo o mundo na tentativa de promover um futuro mais sustentável.

A otimização do espaço terreno como forma a garantir a sobrevivência das populações permeia diversas ciências. Bem como a segurança alimentar e a melhoria da qualidade de

vida adquirida com o restabelecimento do equilíbrio ecológico. Tais benefícios podem ser promovidos por meio da inovação. A primeira menção de um sistema inovador que engloba essas questões, remonta aos anos 80, pelo alemão Adolf Goetzberger, ao publicar um artigo sobre a possibilidade do duplo uso da terra com a criação de batatas sob painéis solares. Entretanto, os primeiros projetos em pequena escala foram iniciados no início dos anos 2000.

Um sistema agrovoltaico (ou agrofotovoltaico, agrivoltaico), refere-se à geração de energia por meio de placas fotovoltaicas (solares, PV) a uma altura elevada em que seja possível o cultivo de alimentos e/ou criação de animais de forma intercalada ou sob os painéis. O sombreamento causado pelas placas solares, permite a criação de um microclima que favorece tanto as plantas da perda de água por evapotranspiração quanto as placas devido a um superaquecimento. Tanto as culturas quanto os módulos solares possuem um certo limite para recebimento de calor, o excesso causa queimadura ou morte das folhas. As altas temperaturas causam perda de umidade do solo, erosão, morte de animais e condições severas de saúde para os trabalhadores. Foi comprovado que cada grau Celsius acima de 25°C causa perda de eficiência energética entre 0,1% a 0,5% em diversos tipos de módulos solares. A transpiração das plantas permite um resfriamento das placas, o que é favorável em diversos casos (Dinesh, Pearce 2015).

Devido sua estrutura e inclinação, as placas conseguem conter a água da chuva, diminuindo a necessidade de irrigação frequente, além de proteger contra geadas e granizo. Em muitas culturas, devido a capacidade de adaptação das folhas ao sombreamento, é notado o aumento da produtividade pois as folhas crescem em tamanho para captar a luz solar (Dinesh, Pearce, 2015). O que é particularmente ainda mais interessante para o plantio de hortaliças. Segundo Dinesh (2015), em culturas que não respondem tão bem ao sombreamento causado pelos painéis, pode-se utilizar placas semi-transparentes ou com densidades menores, diminuindo a sombra em 50% ou mais.

O setor produtivo do agronegócio pode se beneficiar economicamente com este sistema ao alugar o espaço para empresas de energia. Assim, favorece a ampliação desta fonte limpa, renovável e sustentável, sem a necessidade da ocupação exclusiva da terra por grandes usinas solares. O inverso também pode ser benéfico, pois ao cultivar nos espaços de usina/fazendas solares, o produtor não fica tão suscetível às flutuações do mercado quanto ao preço das terras ou dependente da reforma agrária para tirar seu sustento. Além do fator comercial e econômico, um sistema agrofotovoltaico, contribui também para a independência das empresas de energia, pois descentraliza o poder da geração e distribuição. Particularmente em regiões rurais mais afastadas, a autonomia é vantajosa, além de movimentar a economia local com a produção de alimentos sustentáveis, a geração de energia renovável evita conflitos com o poder público quanto a assistência à infraestrutura básica.

O Japão foi um dos precursores ao instalar esse sistema voltado à agricultura familiar na cidade de Chiba em 2004. Atualmente, 120 tipos de culturas agrícolas são cultivados sob

painéis solares que geram anualmente cerca de 600.000 MWh (*Megawatts-hora*¹) e ocupam 560 ha do território japonês (Vitotto et al., 2024). A primeira fazenda agrovoltáica foi instalada em 2013 em Montpellier, França (Dinesh, Pearce 2015). O país possui hoje 200 projetos agrovoltáicos, gerando 80MW (*Megawatts*) apenas no ano de 2023.

Essa tecnologia tem crescido de forma exponencial em todo o mundo desde 2012, saltando de 5MWp para 2,8 GWp. A China tem liderado os sistemas agrovoltáicos com mais de 500 projetos em plantações, estufas, criação de gado e até mesmo com aquicultura-fotovoltaica. Os painéis solares instalados acima de tanques de camarão e pepinos-do-mar gerou desde 2021, 260GWh de energia, o suficiente para abastecer 113 mil residências. As placas servem para manter a temperatura da água entre 2 a 3° C mais fria que o normal sem os painéis, contribuindo para o aumento da produtividade em até 50%. A maior parcela de projetos agrovoltáicos foram instalados em 2021, e atingem uma capacidade de 1900MW sendo que 700 MW são gerados sobre goji berries (*Lycium barbarum*) cultivados à beira do deserto de Gobi.

O primeiro projeto agrovoltáico da América Latina foi realizado nos arredores de Santiago no Chile, em 2017, e são três sistemas com capacidade de 13 kWp (*kilowatt-pico*²). O país tem sofrido com intensos processos de desertificação e erosão causados pelas mudanças climáticas e práticas agrícolas inadequadas. Além da seca e intensa radiação solar, o clima tem se tornado imprevisível causando geadas e tempestades de granizo em diversas localidades. Os trabalhadores têm procurado locais de sombra para proteger suas culturas e a si mesmos (Vitotto et al., 2024).

O Brasil possui um imenso potencial de geração de energia solar/agrovoltáica devido à alta incidência de radiação solar, diversidade climática e de culturas. O primeiro projeto brasileiro bem-sucedido nesse aspecto foi realizado no semiárido nordestino, na cidade de Ibimirim, PE, em 2019. O sistema conhecido como Ecolume foi realizado por pesquisadores da região com o apoio da Fundação Getúlio Vargas (FGV). É voltado para os agricultores familiares e necessitou de um investimento de R\$ 20.000,00. O modelo usado propôs a integração entre geração de energia, produção de 17 tipos de vegetais, peixes em tanques e criação de aves. O projeto tem demonstrado um potencial de geração de 4.800 kWh/ano de energia, 130 kg de peixe, 730 ovos caipira, 336 kg de vegetais e 200 unidades de mudas de plantas nativas. Essa produção geraria uma receita total anual de cerca de R\$ 10.900,00.

Ainda em Pernambuco, outro projeto foi realizado na Comunidade Indígena Pankará, em dezembro de 2020, contribuindo para o abastecimento de água potável e cultivo de hortaliças. Nesta região de Caatinga, as altas temperaturas acabam por prejudicar o cultivo de certas espécies, e consequentemente a produtividade e oferta de alimentos. Com este sistema, 150 famílias foram assistidas. No Pará, um projeto que combinou a plantação de

¹ Megawatts, Kilowatts e Gigawatts são unidades de medida reconhecida pelo Sistema Internacional de Unidade e se referem à quantidade de energia gerada ou consumida por um sistema. Quilowatt (kW) corresponde a mil watts, Megawatt (MW) corresponde a um milhão de watts, Gigawatt (GW): corresponde a um bilhão de watts.

² Busca medir os picos de desempenho na geração de energia considerando fatores climáticos e até a geografia do local. (Portal Solar, 2022)

pimentão, couve, coentro e cebolinha com energia foi realizado em 2023 em parceria com a Confederação Alemã de Cooperativas (DGRV) e a cooperativa CCampo.

Ainda que muito recente, essa tecnologia se revela promissora no Brasil. A necessidade de preservar nossa rica biodiversidade frente aos gradativos avanços da agropecuária, otimizar os espaços e promover a melhoria da qualidade de vida dos habitantes, coloca em xeque a capacidade de adaptação e inovação.

Caracterização do espaço brasileiro

O Brasil possui 851 milhões de hectares de extensão territorial, sendo que 282,5 milhões de hectares são destinados à agropecuária, dos quais 164,3 milhões de hectares são apenas para pastagem, conforme os dados do MAPBIOMAS de 2022. Cerca de 64% são áreas de florestas nativas e 2,2% são corpos d'água. Há 7 milhões de hectares de áreas urbanizadas e não vegetadas, o que equivale a 0,8% do território. Dentre as porções de vegetação nativa, nota-se que o bioma que mais tem apresentado degradação é a Mata Atlântica devido ao desmatamento e expansão urbana que há séculos se repete devido sua presença próxima às zonas costeiras. Em seguida, o Cerrado se constitui com a maior degradação absoluta devido a expansão da agropecuária, e o Pantanal devido a utilização imprópria do fogo.

O Brasil é responsável por boa parte da produção de soja, café, suco de laranja e carne consumidas no mundo. Em relatório recente realizado pela BTG Pactual, a produção de grãos subiu de 47 milhões de toneladas em 1977 para 312 milhões de toneladas em 2023. A produção agrícola hoje consegue suprir a necessidade de 900 milhões de pessoas, cerca de 11% da população mundial. A Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) elencam a soja como o produto agrícola que mais movimentou o mercado nas últimas décadas, sendo o principal bem produzido e exportado. A soja fechou o ano de 2023 com um faturamento de US\$ 63 bilhões, seguido pela carne bovina com US\$33 bilhões e o milho com US\$26 bilhões. Conforme aponta o CNA, “o Brasil é hoje o maior exportador de açúcar, café, suco de laranja e soja em grãos; e o segundo maior em carnes bovina e de frango. É também o maior produtor mundial de soja em grãos, café, suco de laranja e açúcar; o segundo de carnes bovina e terceiro de frango” (TradeMap, ITC, CNA 2023, BTG, 2024).

Para prevenir e combater a degradação desenfreada causada principalmente pela agropecuária, além de preservar os remanescentes florestais e seus diversos processos ecológicos e ecossistêmicos, criou-se as Unidades de Conservação (UCs). Conforme aponta o Ministério do Meio Ambiente:

“Englobam as Unidades de Conservação (UCs), mosaicos e corredores ecológicos, espaços considerados essenciais, do ponto de vista econômico, por conservarem a sociobiodiversidade, além de serem provedores de serviços ambientais e geradores de oportunidades de negócios (MMA)”.

As UCs ficam sob responsabilidade de diversos órgãos a nível federal, estadual ou municipal, podendo também serem integrados em diferentes níveis, até mesmo sob

administração privada. Outras áreas protegidas e restritas ao uso, ocupação ou exploração seriam áreas indígenas e quilombolas e outras áreas de valor cultural e/ou histórico.

Cerca de 30% do território continental equivale a áreas protegidas como unidades de conservação florestal, áreas indígenas e quilombolas (UNEP, 2022). A categoria de Unidades de Conservação (UCs) de Uso Sustentável é a mais impactada por diferentes níveis de degradação ambiental devido à natureza "flexível" de suas restrições de uso. Embora desempenhem um papel significativo na proteção ambiental, certas lacunas na legislação permitem a implementação de cultivos agrícolas dentro dessas UCs. Muitas vezes, esses cultivos são monoculturas altamente rentáveis para os produtores. De acordo com a Lei 9985/2000 que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC, as UCs de uso sustentável têm como objetivo “compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais”. As APAS, UCs desta categoria é definida como:

A Área de Proteção Ambiental é uma área em geral extensa, com um certo grau de ocupação humana, dotada de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais especialmente importantes para a qualidade de vida e o bem-estar das populações humanas, e tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais.

Sendo assim, a permissão do “certo grau de ocupação humana” faz com que essas áreas sejam as unidades mais degradadas de todas. Permite indiretamente que agricultores continuem usando estes espaços não apenas como forma de auto sustento, mas com valor comercial, inserindo monoculturas de alto rendimento como soja, milho e arroz. Tais culturas quando cultivadas em larga escala, prejudicam o equilíbrio ecológico ao reduzir a biodiversidade local.

Com base nas informações da Associação Brasileira de Energia Fotovoltaica (Absolar, 2024), o Brasil atingiu o marco de 41,1 GW (*Gigawatts*) de potência operacional de energia fotovoltaica, o que corresponde a 18% da matriz energética do país. A energia solar, fica atrás apenas das usinas hidrelétricas com capacidade de 109 GW de energia e a frente da energia eólica com 13% da matriz, ou 29 GW. A distribuição deste tipo de energia se dá principalmente em termos residenciais, comerciais e rurais com 48%, 28% e 14% da capacidade instalada, respectivamente. Desde 2012, este ramo já trouxe para o país R\$195,2 bilhões de novos investimentos e R\$ 61,3 bilhões aos cofres públicos, além de ter gerado 1,2 milhões de novos empregos.

O cultivo da soja no Brasil

Atualmente, o Brasil é o maior produtor de soja do mundo com 154.566,3 milhões de toneladas produzidas apenas na safra de 2022/2023 ocupando uma área de 44.062,6 milhões de hectares (Portal Embrapa). Seu crescimento foi gradual desde a década de 40 quando ainda a China e os Estados Unidos lideravam o setor.

O cultivo da soja se deu primeiramente na região sul do país, devido às altas temperaturas das regiões mais próximas à linha do equador resultarem em um florescimento precoce. Na época, este servia para produção de biomassa, sobretudo para alimentação de bovinos e

suínos. Aos poucos a cultura foi se expandindo para outras regiões devido a adaptação climática dos grãos, melhoria das técnicas de manejo dos produtores, políticas públicas de incentivo à produção e aumento da competitividade mundial deste setor. Sobretudo no bioma Cerrado, as extensas áreas planas, bem drenadas de fácil manejo atraíram muitos produtores que compraram terras a preços bem abaixo do mercado. No início, o solo não se mostrava tão fértil quando as encontradas na região sul, em função da acidez e insuficiência de nutrientes. Entretanto, o regime regular de chuvas entre setembro e abril, permitiu que o cultivo precoce da soja seja seguido do milho ou algodão. Ou seja, a viabilidade do plantio direto de ambas as culturas evita atrasos de semeadura, perda de umidade do solo e, consequentemente, aumento de produtividade (Cattelan, 2018).

A soja, que antes era uma das menores culturas, teve seu *boom* na década de 70 quando atingiu seu maior valor na história com US \$ 474.00/t, equivalente a US \$ 1249.00/t nos dias atuais segundo o Chicago Board of Trade – CBOT. Juntamente com o milho, a soja teve um crescimento de produtividade de 313% entre 1990-2017 e correspondem a uma área de 80% dos plantios e 85% da produção de grãos do país.

Ao propor o mapeamento das áreas potenciais, este trabalho desconsidera fatores como regulamentação local vigente, políticas públicas de investimento ou viabilidade econômica dos produtores e setores administrativos para implementação do projeto. Além de descartar tipos de materiais mais apropriados a serem utilizados nas placas voltaicas ou infraestrutura, e se há mão de obra especializada acessível. Acredita-se que o conhecimento das áreas fomenta discussões acerca de atração de investimentos neste tipo de projeto. Este trabalho também não propõe tamanhos específicos de infraestrutura a serem construídos, como se fosse direcionado apenas a grandes fazendas ou pequenos produtores de agricultura familiar.

Mesmo sendo um sistema sustentável, como forma de respeitar a legislação vigente, a metodologia também desconsidera áreas agricultáveis que se encontram irregulares em áreas restritas como UCs, APPs, Reserva Legal, sítios arqueológicos, terrenos indígenas ou quilombolas. Foram utilizados apenas os polígonos das UCs com registro ativo no Cadastro Nacional de Unidades de Conservação - CNUC como base para descartar as áreas irregulares. Exclui-se também a área da Amazônia legal, sabendo que, mesmo com os diversos benefícios ecológicos, particularidades legais e acesso a dados confiáveis podem dificultar as análises. Espera-se que ao analisar certas culturas, o sistema possa ser reproduzido em pequena escala, respeitando as especificidades.

No Brasil, apesar de não haver uma lei em vigor especificamente referente aos projetos agrovoltaicos, considera-se algumas normas para sistemas de geração de energia solar. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), possui algumas resoluções normativas “para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica”. A Resolução Normativa ANEEL nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, revoga a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, ainda muito utilizada em projetos fotovoltaicos, e altera as seguintes resoluções: nº 920, de 23 de fevereiro de 2021, nº 956, de 7 de dezembro de 2021, e nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, além de outras providências. A ABNT também possui uma série de normas, como a NBR 5410:2004, que estabelece critérios para instalações elétricas de baixa tensão e tem como norma complementar a ABNT NBR 16690:2018. Já a NBR 16274:2014 dispõe sobre

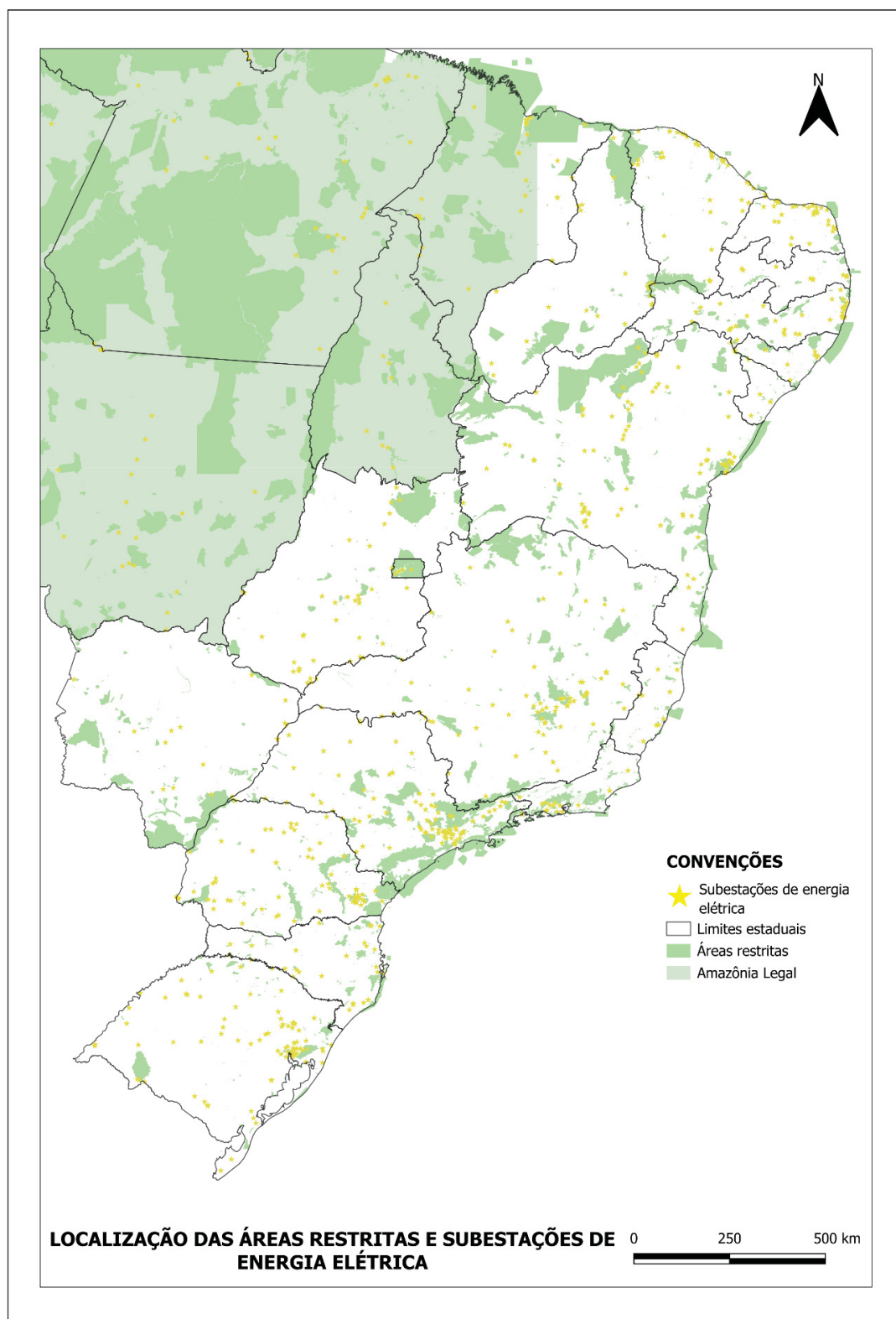
sistemas fotovoltaicos conectados à rede estabelecendo “requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho”.

A maioria dos sistemas agrovoltáticos vigentes no mundo hoje são conhecidos como *on-grid*. Isso quer dizer que são conectados à rede elétrica pública e a energia gerada que não é utilizada no local, volta à rede. Esse tipo geralmente não necessita de baterias, que podem ser bem custosas, principalmente nas fases iniciais de instalação, além de terem baixa manutenção e maior estabilidade. Os sistemas *off-grid* são os que exigem baterias e são excelentes para áreas mais remotas longe de linhas de transmissão, apesar do alto custo inicial, propicia maior independência. Mesmo havendo discussões a respeito da sobrecarga na rede elétrica, entende-se que os sistemas *on-grid* são mais viáveis pelo custo-benefício, se tornando mais aceitos devido a facilidade de instalação e manuseio. Com base nos projetos existentes no Brasil e no mundo e nas normas de segurança para operação de projetos fotovoltaicos, considerou-se para este trabalho as áreas que estejam a uma distância máxima de 10 km e no mínimo 30 metros das subestações de energia elétrica e linhas de transmissão.

Uma subestação é essencial no sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica tendo como função transformar e regular a tensão (voltagem) e distribuir a energia para as áreas ou consumidores. Entende-se que o tipo e extensão de cabeamento, medidores, regulamentações locais e permissão da concessionária de energia são fatores de responsabilidade de cada produtor. Mas que a proximidade com as subestações são de extrema importância em sistemas *on-grid* devido ao menor custo com o projeto e estabilidade, como já citado.

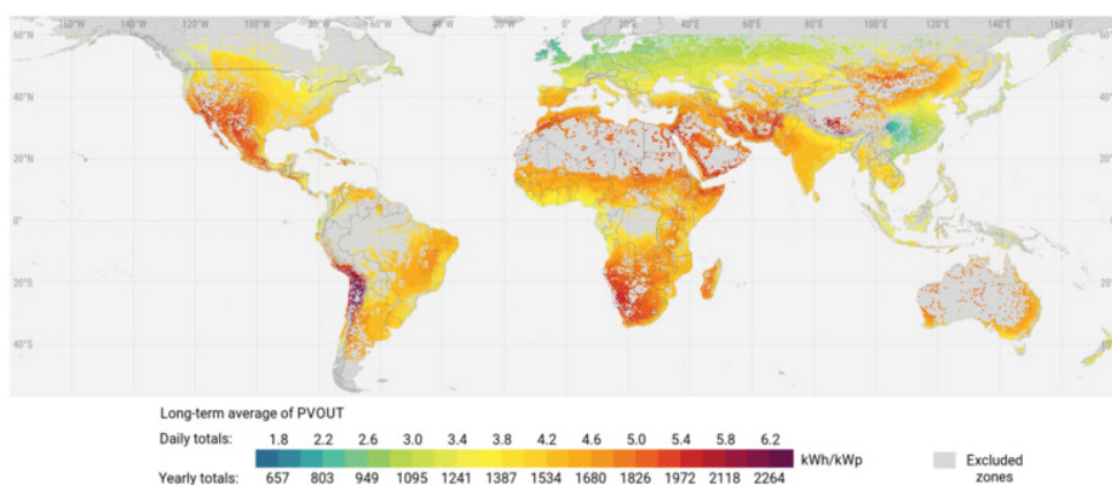
A Figura 1 evidencia as áreas restritas/protegidas que foram utilizadas como base para exclusão dos polígonos de agropecuária, bem como a localização das subestações de energia. O recorte do mapa possui a finalidade de foco nas áreas fora da Amazônia Legal.

Figura 1. Áreas restritas e subestações de energia.



O estudo "Global Photovoltaic Power Potential by Country" publicado pelo *World Bank*³, fornece uma visão detalhada sobre os recursos solares e o potencial para o desenvolvimento de usinas fotovoltaicas em escala utilitária, considerando variáveis como a irradiância solar, temperatura do ar, sombreamento, inclinação ideal dos módulos, e restrições de uso do solo. Utilizando dados consistentes e de alta resolução, o estudo classifica os países de acordo com o potencial fotovoltaico (PVOUT) considerando diferentes níveis de restrições (físicas, técnicas e regulatórias). Esse mapeamento já integra essas variáveis, possibilitando uma análise direta do potencial para instalação dos sistemas, dispensando a necessidade de reclassificações adicionais no QGIS. Com base nesse mapeamento, foi recortado o dado raster com o *shapefile* processado com as outras variáveis dentro da plataforma Google Earth Engine em linguagem *JavaScript*. A Figura 2. Ilustra o mapeamento global apresentado do estudo

Figura 2. Potencial Fotovoltaico



Practical photovoltaic power potential (PVOUT) at Level 1: Long-term yearly average of daily and yearly totals

Fonte. Bank World, Global Solar Atlas.

Os valores do potencial de energia fotovoltaica (PVOUT) vão de 0.55 a 7 kWh/kWp, de acordo com os valores de referência. A reclassificação seguiu o Quadro 1, conforme a rampa de cores do dado original. O agrupamento dos valores, ou seja, reclassificação, possibilita uma interpretação mais didática do dado.

Quadro 1. Reclassificação do dado PVOUT

Valores mín e máx	Nova classe de potencial
0,55 - 2,0	Baixo
2,0 - 4,0	Médio
4,0 - 5,0	Alto
5,0 - 7,0	Muito alto

³ O estudo faz parte do relatório e mapeamento disponibilizado pela Global Solar Atlas. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study>

Tais variáveis utilizadas podem ser encontradas no Quadro 2. Estes dados são informações mapeadas e disponibilizadas em formato *shapefile* ou *raster* nos sites oficiais. Eles foram processados no *software* de geoprocessamento QGIS 3.36 e na plataforma Google Earth Engine.

Quadro 2. Variáveis consideradas no cruzamento de dados

Tipo de variável	Fonte/Ano
Áreas agricultáveis	MAPBIOMAS 2022 (Coleção 8.0)
Irradiação solar normal Direta	Global Solar Atlas (GSA)
Inclinação ideal dos módulos fotovoltaicos	Global Solar Atlas
Linhas de Transmissão e Subestações de energia elétrica	MapBiomass/EPE, 2022
Áreas protegidas	MMA, 2024, FUNAI, SICAR, INCRA
Elevação do terreno	Global Solar Atlas
Temperatura do ar	Global Solar Atlas
Umidade	Global Solar Atlas
Temperatura do solo	Global Solar Atlas

Todas as variáveis utilizadas são com base nos aspectos físicos, limites administrativos/legais, e estruturas que são necessárias para o bom funcionamento do sistema. Sabe-se que é necessária uma boa conectividade com as torres de energia para a distribuição elétrica, fácil acesso por estradas às áreas agricultáveis para possíveis manutenções ou fiscalizações e condições climáticas favoráveis. O embasamento na literatura ou em projetos anteriores bem-sucedidos com características ambientais parecidas, confirmam a capacidade de adaptação das culturas (Quadro 3).

Quadro 3. Cultivos encontrados na literatura

Tipos de Cultivos encontrados na literatura	Vantagens ou desvantagens adquirida no sistema agrovoltáico	Referência
Alface	o alface consegue se adaptar ao sombreamento aumentando a área de suas	Harshavardhan Dinesh a , Joshua M. Pearce

	folhas para maximizar sua capacidade de aproveitar o reduzido nível de radiação solar....consegue suportar um sombreamento de até 30%	
Trigo	redução de 51% no rendimento	Harshavardhan Dinesh a , Joshua M. Pearce
amendoim, inhame, alfaça, batata doce e mandioca	há experimentos bem sucedidos com essas culturas por serem bem tolerantes ao sombreamento, mesmo não sendo cultivadas em larga escala	Harshavardhan Dinesh a , Joshua M. Pearce
Hortaliças	Resultados promissores no aumento da produtividade (ainda que em fase inicial no Brasil)	Projeto Pankará, Ecolume
Criação de gado, ovelha e galináceos	Redução do estresse térmico	Ecolume, projetos na China, EUA e França
Brócolis, repolho, arroz, batatas, cebola, cevada, feijão, alho, alface, verde cebola.	Reduções da taxa de colheita são inferiores a 20% em todos os projetos de pesquisa [com essas culturas na Coreia do Sul]	CHAE <i>et al</i> , 2022

RESULTADOS

As áreas agricultáveis do MAPBIOMAS são de plantação de arroz, café, soja, citrus, algodão, cana de açúcar e pastagem. O mapeamento também considera Mosaico de usos como locais em que não foi possível distinguir entre agricultura e pastagem. Lavouras temporárias são aquelas com cultivos de curta e média duração, como o milho e o feijão e Lavouras Perenes são as com ciclo vegetativo mais longo, neste caso abrange sobretudo áreas de plantação de caju no Nordeste. A Figura 3 ilustra o mapeamento das áreas agrícolas que se encontram em um raio de até 10km das subestações de energia e fora das áreas protegidas.

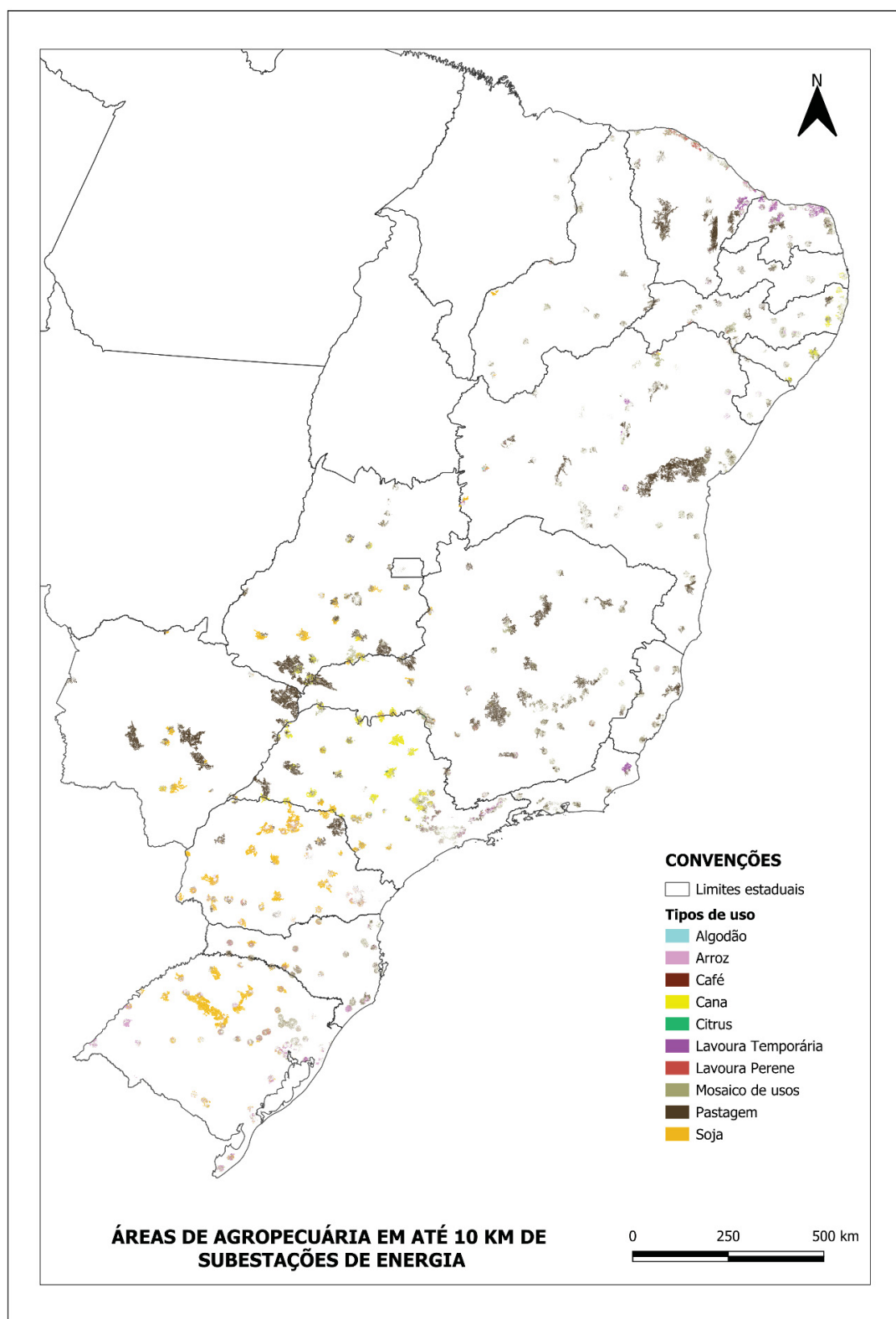
Durante o período de execução deste trabalho, o site do SICAR apresentou erros ao realizar o *download* dos arquivos vetoriais, com isso, não foi possível fazer as análises das Áreas de Preservação Permanentes (APP) e Reserva Legal. Consequentemente, o mapeamento final inclui tais áreas restritas.

Foram identificadas 1.984.314.403 hectares de plantio de soja, 5.893.394.125 de hectares de pastagem e 133.617.922 hectares de arroz próximas às subestações. Os valores completos das outras culturas estão no Quadro 4.

Quadro 4. Área dos tipos de cultivos em um raio de 10 km das subestações de energia elétrica pública

Cultura	Área em hectares
Algodão	6.356.734
Arroz	133.617.922
Café	22.738.542
Cana de açúcar	665.296.291
Citrus	6.894.801
Lavouras temporárias	484.384.591
Lavoura Perene	81.671.217
Mosaico de usos	2.067.110.339
Pastagem	5.893.394.125
Soja	1.984.314.403

Figura 3. Áreas de agropecuária em um raio de 10 km das subestações de energia e fora das áreas restritas.



A Figura 4 apresenta o mapa final das áreas agropecuárias potenciais para instalação de sistemas agrovoltáicos no Brasil. Como se sabe, áreas que possuem maior influência de ventos alísios, chuvas orográficas, sombreamento e inclinação mais elevada como encontrada nas zonas mais costeiras, apresentam potencial médio para instalação e geração de energia solar. A cadeia montanhosa da Serra do Mar é muito provavelmente a responsável pelo resultado mostrado no mapa. Obteve-se uma área de 19.800,00 hectares no extremo norte entre o Ceará e o Rio Grande do Norte com muito alto potencial. O dado também mostra que 4.392.381,00 hectares possuem potencial médio e 39.461.387,00 hectares possuem potencial alto para instalação, ou seja, cerca de 90% da área total mapeada.

Com o intuito de providenciar um mapeamento mais detalhado, considerando o grau de relevância do setor no Brasil, a figura 5 apresenta o potencial de instalação do sistema apenas nas áreas de plantio de soja. Todas as áreas se encontram num intervalo de 4 a 5 kWh, segundo o dado base PVOUT, ou seja, potencial alto para instalação (Tabela 1). Os decimais de diferença são melhor visualizados na rampa de cores.

Figura 4. Áreas com potencial para o sistema agrovoltaico.

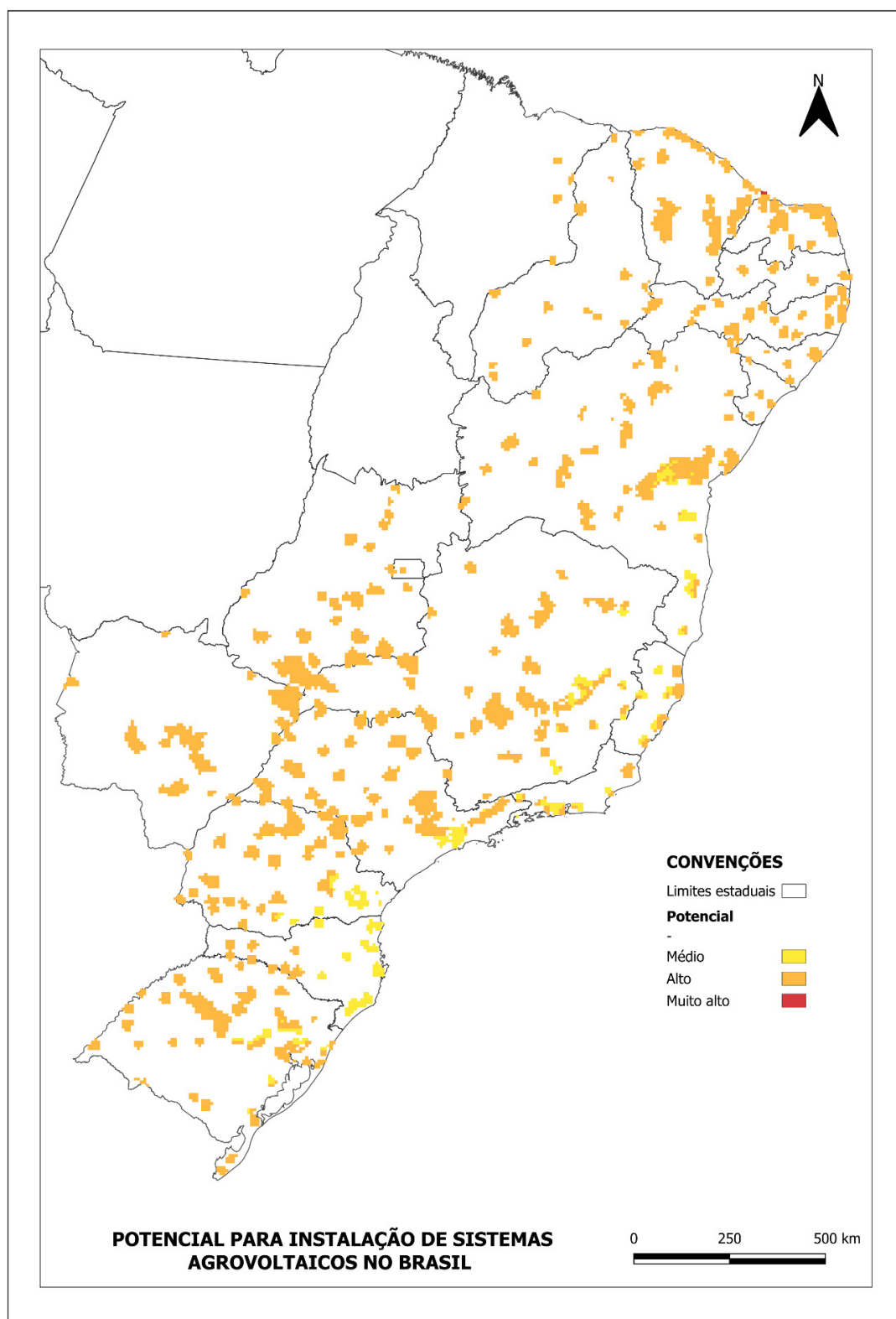
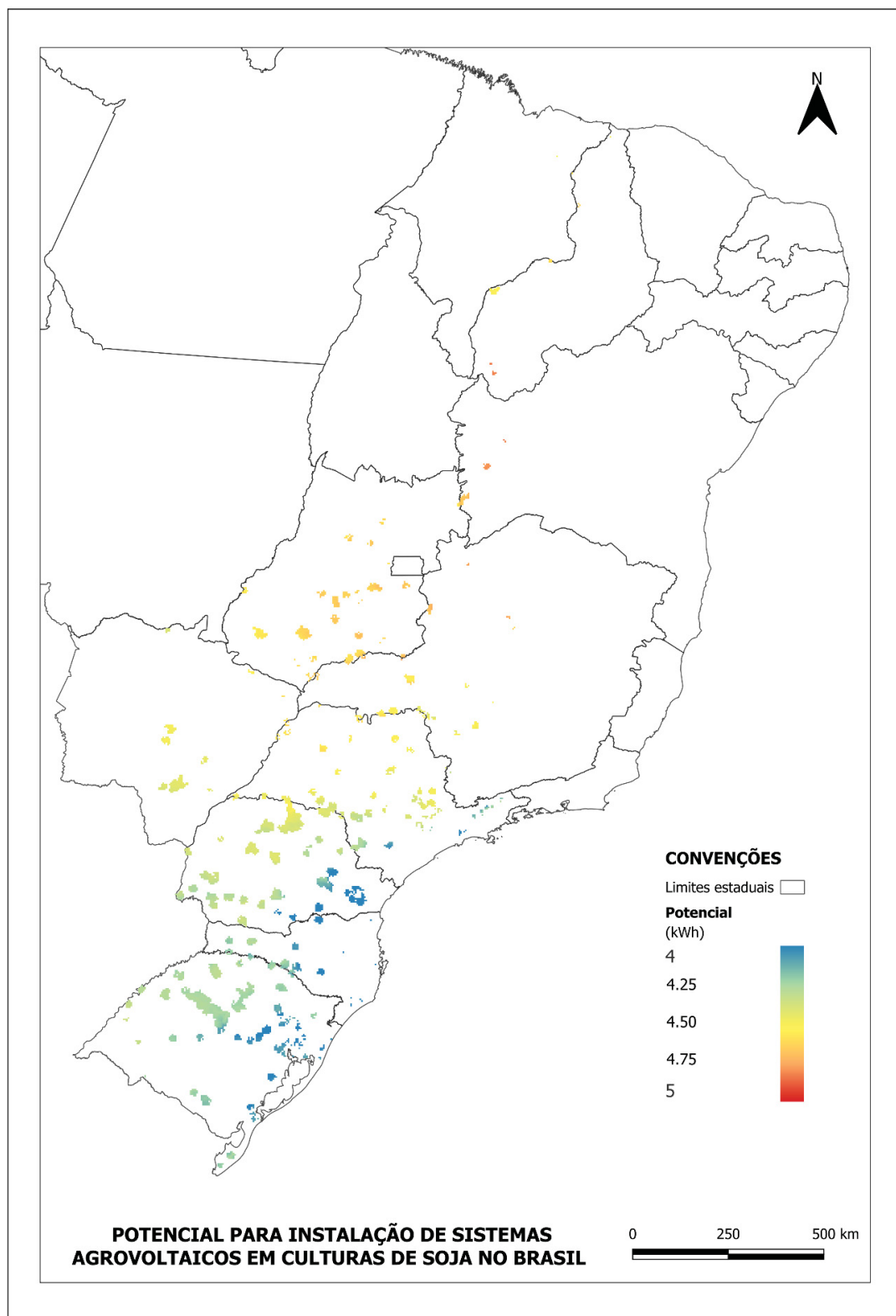


Figura 5. Áreas de cultivo de soja com potencial para os sistemas agrovoltaicos.



CONCLUSÃO

As análises deste trabalho foram bem-sucedidas ao pontuar áreas potenciais para a instalação do sistema agrovoltáico em todos os estados brasileiros, próximos à infraestruturas básicas e fora de áreas restritas. Isso demonstra a necessidade de não só investimentos públicos financeiros ou na qualificação de mão de obra, mas sobretudo a criação de regulamentações legais para embasamento e orientação aos produtores. É de suma importância normas claras municipais, estaduais e federais para evitar sobrecarga dos sistemas operacionais por geração excedente de energia e regulamentar o uso da terra.

Além dos investimentos públicos diretos, políticas públicas de concessão de créditos, subsídios e financiamentos devem ser incentivadas para uma maior adoção dos sistemas. Possivelmente, muitas culturas podem se enquadrar na política de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA). Estudos mais detalhados dos impactos nas comunidades e meio ambiente ao redor devem ser realizados ressaltando a geração de emprego, a segurança alimentar promovida e a inserção tecnológica em áreas rurais.

Sugere-se, em trabalhos futuros, um refinamento do dado final excluindo as áreas de APP e Reserva Legal que não foram possíveis de analisar neste trabalho. Isso dará mais precisão das áreas legais para instalação do sistema. Com base neste dado, pode-se também realizar análises do potencial de geração de energia por fazenda solar ou estado, além do retorno econômico, ao produtor, pela instalação. Testes em campo necessitam ser feitos para confirmação da capacidade de adaptação das culturas listadas e mapeadas, mesmo que haja embasamento teórico-científico para isso. Assim, a reprodução em larga escala poderá ser mais amplamente considerada futuramente.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 8 fev. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 abr. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5410:2004: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16274:2014: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16690:2018: Instalações elétricas de sistemas fotovoltaicos (FV). Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AL MAMUN, Mohammad Abdullah et al. A review of research on agrivoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 161, p. 112351, 2022.

ÁREA DE AGROPECUÁRIA NO BRASIL CRESCEU 50% NOS ÚLTIMOS 38 ANOS. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2023/10/06/area-de-agropecuaria-no-brasil-cresceu-50-nos-ultimos-38-anos/#:~:text=Em%20quase%204%20d%C3%A9cad%20essa.%20C3%20milh%C3%B5es%20de%20hectares>. Acesso em: julho de 2024.

ÁREAS PROTEGIDAS. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas.html>. Acesso em: julho de 2024.

BRASIL. Lei n. 9.985, de 18 de julho de 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: julho de 2024.

CATTELAN, Alexandre José; DALL'AGNOL, Amélio. The rapid soybean growth in Brazil. OCL, v. 25, n. 1, p. D102, 2018.

CHAE, S. H.; KIM, H. J.; MOON, H. W.; KIM, Y. H.; KU, K. M. Agrivoltaic systems enhance farmers' profits through broccoli visual quality and electricity production without dramatic changes in yield, antioxidant capacity, and glucosinolates. Agronomy, v. 12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061415>. Acesso em: set. 2024.

CNN Brasil. Brasil virou celeiro do mundo e já lidera exportações mundiais de sete alimentos, diz BTG. 04 mar 2024.. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/brasil-virou-celeiro-do-mundo-e-ja-lidera-exportacoes-mundiais-de-sete-alimentos-diz-btg/>. Acesso em agosto de 2024.

DINESH, Harshavardhan; PEARCE, Joshua M. The potential of agrivoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 54, p. 299-308, 2016..

PANORAMA DO AGRO. CNA Brasil. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro#:~:text=Atualmente%2C%20o%20Brasil%20%C3%A9%20o,TradeMap%2C%20ITC%2C%202023>. Acesso em: julho de 2024.

PANORAMA OF SOLAR PHOTOVOLTAIC IN BRAZIL AND IN THE WORLD. ABSOLAR. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/en/market/infographic>. Acesso em: julho de 2024.

PORTAL SOLAR. Watt: o que é e quais as unidades de potência elétrica? 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/curiosidades/watt-unidades-de-potencia-eletrica>. Acesso em: set. 2024.

SALES, Alice. Tecnologia reúne segurança hídrica, produção de alimentos e geração de energia no NE. Disponível em: <https://agenciaeconordeste.com.br/tecnologia-reune-seguranca-hidrica-producao-de-alimentos-e-geracao-de-energia-no-ne/>. Acesso em: julho de 2024.

SISTEMAS AGRIVOLTAICOS UNEM AGRICULTURA E PAINÉIS SOLARES. Disponível em: <https://www2.energia.coop/brasil/blog/sistemas-agrivoltaicos-unem-agricultura-e-paineis-solares-e-sa-o-uma-oportunidade-para-a-energia-cooperativa/>. Acesso em: julho de 2024.

UNEP-WCMC. Protected Area Profile for Brazil from the World Database on Protected Areas, November 2022. Disponível em: <https://www.protectedplanet.net/country/BRA>. Acesso em: julho de 2024.

VIDOTTO, Laís Cassanta et al. An evaluation of the potential of agrivoltaic systems in Brazil. Applied Energy, v. 360, p. 122782, 2024.