

Identificação de áreas potenciais para Pagamento por Serviço Ambiental (PSA) no bioma Amazônia sobre o estado do Maranhão

Isadora Haddad Ruiz¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Avenida dos Astronautas, 1.758, CEP: 12227-010, São José dos Campos - SP, Brasil, isadora.ruiz@inpe.br

Resumo:

A elevada capacidade de captar carbono pela vegetação secundária surge como uma alternativa natural para a prestação de serviço ambiental de sequestro de carbono. O estado do Maranhão detém 4,31% dos remanescentes de vegetação secundária do bioma Amazônia, porém não se sabe quais as áreas com potencial para a introdução de incentivos econômicos que preservem esses renascentes e suas funções ecossistemas. Diante disso, esse trabalho buscou identificar áreas de vegetação secundária potenciais para o recebimento de Pagamento por Serviço Ambiental (PSA) de sequestro de carbono. A técnica de Inferência Booleana foi empregada para verificar o potencial para PSA de sequestro de carbono como alto, médio e baixo, tendo como base os dados de declividade, fertilidade do solo, uso e cobertura do solo e a vegetação secundária. Os resultados apontam que cerca de 15% da área possui alto e 70% médio potencial para o sequestro de carbono a partir de Recomposição Florestal. Para a tipologia de Sistemas Produtivos Sustentáveis 30,19% da área é de médio potencial e apenas 1,07% de alto. A metodologia empregada pode auxiliar a definição de áreas prioritárias a introdução de PSA e nortear a elaboração de políticas públicas estaduais.

Palavras-chave: Carbono; Inferência booleana; SAFs; Vegetação secundária.

Abstract:

The high capacity of secondary vegetation to capture carbon emerges as a natural alternative for providing the environmental service of carbon sequestration. The state of Maranhão has 4.31% of the remnants of secondary vegetation of the Amazon biome, but it is not known which areas have potential for the introduction of economic incentives to preserve these renaissances and their ecosystem functions. In view of this, this work aimed at identify areas of secondary vegetation with potential to receive Payment for Environmental Service (PES) for carbon sequestration. The Boolean Inference technique was employed to verify the potential for PES for carbon sequestration as high, medium and low, based on slope data, soil fertility, use and cover land, and secondary vegetation. The results indicate that about 15% of the area has high and 70% medium potential for carbon sequestration from Forest Recomposition. For the Sustainable Production Systems typology 30.19% of the area has medium potential and only 1.07% has high potential. The methodology employed can help define priority areas for the introduction of PES and guide the development of state public policies.

Keywords: Carbon; Boolean inference; SAFs; Secondary vegetation.

1. INTRODUÇÃO

O avanço do desmatamento sobre o bioma Amazônia tem alertado a comunidade científica acerca de regiões que podem estar perdendo a capacidade de atuar como sumidouro de Carbono (C) e transacionando para fonte de emissão (GATTI et al., 2021; ASSIS et al., 2022). Esse resultado embasou o mais recente relatório do IPCC (2022) em alertar para a emergência em utilizar tecnologias baseadas na natureza para mitigar as mudanças climáticas. Entre as estratégias apresentadas está a preservação da floresta primária e a regeneração natural dos sistemas florestais secundários, a partir de incentivos como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) (IPCC, 2022).

A regeneração natural das áreas de floresta que foram desmatadas, consiste na recuperação espontânea das espécies nativas que se estabelecem ao longo do tempo nas áreas afetadas por ações antrópicas ou perturbações naturais (CROUZEILLES et al., 2017). Esses sistemas que se restabelecem possuem elevada capacidade em ganho de biomassa e, conseqüentemente, em sequestrar C, podendo chegar a 11 vezes mais sequestro de C que as florestas primárias (HEINRICH et al., 2021) ao longo do avanço dos estágios sucessionais. Complementar a isso, a regeneração natural pode apresentar redução de custos entre 56% e 74% com o tamanho do aumento dos fragmentos, em relação a restauração ativa (STRASSBURG et al., 2019), revelando-se uma tecnologia baseada na natureza potencial para sequestrar C.

Segundo Scarano (2017), para que os objetivos estabelecidos nas Contribuições Determinadas Nacionalmente (NDC) pelo Brasil, como a meta de restaurar 12 milhões de hectares de terra degradada até 2030, é necessário que tenham incentivos em diferentes níveis nacionais. O instrumento de PSA aplicado a níveis subnacionais pode ser uma alternativa (SCARANO, 2017). Na Costa Rica, um PSA voltado a conservação da biodiversidade promoveu a redução das taxas de desmatamento a quase zero, aumentou a vegetação em 10% de 1997 a 2010 e beneficiou mais de 10 mil agricultores, indígenas, empresas e cooperativas de atividade florestal (PERALTA 2014). No Brasil, o PSA de Extrema (Minas Gerais) que visa a conservação de água e mais atualmente o sequestro de carbono, em 10 anos restaurou 6523 há de Mata Atlântica. Entre as iniciativas nacionais para incentivar ações de PSA está a recente Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (Lei nº 14.119 de 2021).

Diante disso, áreas que foram fortemente afetadas pelo desmatamento como a região conhecida como “arco do desmatamento”, devem ser avaliadas quanto a

disponibilidade de remanescentes de vegetação secundária para a definição de PSAs. O bioma Amazônia sobre o estado do Maranhão (MA), por exemplo, perdeu 35% da cobertura florestal entre 1985 e 2017, com acentuado aumento na fragmentação (SILVA-JUNIOR et al., 2022). Em relação ao total de vegetação secundária no bioma Amazônia, o estado de MA possui cerca de 4% dos remanescentes (SILVA-JUNIOR et al., 2020) o que deve ser visto como uma oportunidade para introdução de sistemas de PSA. No entanto, ainda não foram exploradas metodologias que deem suporte para definição da potencialidade dos sistemas de vegetação secundária para a introdução de PSA por sequestro de C, o que pode auxiliar na definição de políticas subnacionais.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi identificar regiões potenciais a PSA para sequestro de C no ano de 2020, em áreas de vegetação secundária no bioma Amazônia sobre o estado do Maranhão a partir dos objetivos específicos: 1) Definir tipologias de ecossistemas a partir da capacidade em prover serviços ecossistêmicos; e 2) Evidenciar regiões estratégicas para introdução de PSA para o sequestro de C, com base nas tipologias definidas. Para isso, foram utilizados dados de aptidão agrícola, uso e cobertura do solo e vegetação secundária, integrados a partir da inferência Booleana. Os resultados obtidos poderão contribuir para o alcance do Objetivo de Desenvolvimento do Milênio (ODM) 15, de proteger a vida terrestre a partir de ações de restauração e proteção das florestas, os quais apresentam alta sinergia para mitigação das mudanças climáticas como sequestro de C pela agricultura, redução da conversão de florestas e outros ecossistemas (IPCC, 2022).

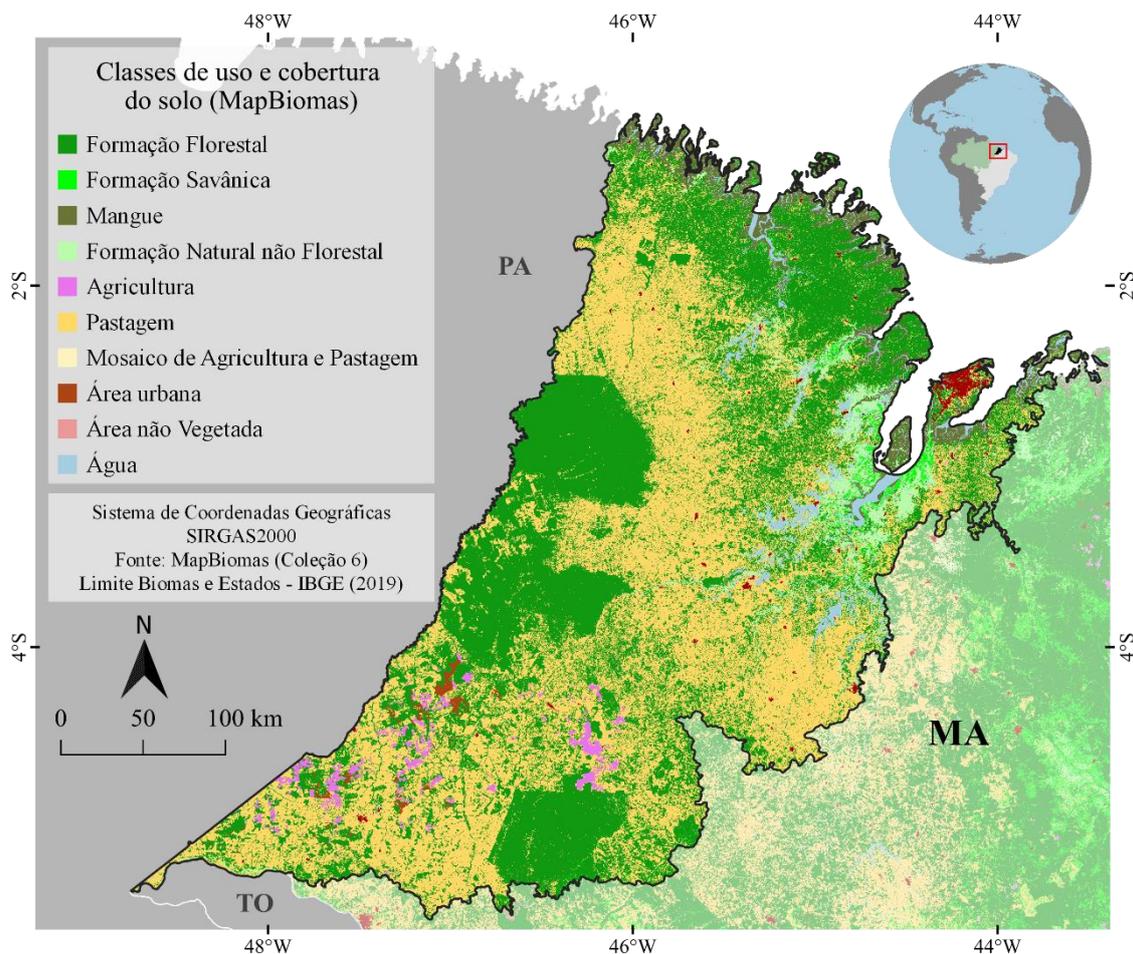
2. ÁREA DE ESTUDO

O bioma Amazônia é o maior bioma do Brasil (50% do território) e está localizado na região norte do país. Com área de 4.2 milhões de km², o bioma se concentra sobre os estados do Mato Grosso, Pará (PA), Maranhão (MA), Rondônia, Acre, Amazonas, Amapá e Roraima. Composto por florestas do tipo Ombrófila Densa, Ombrófila Aberta, Estacional Sempre-Verde e Capinarana, o bioma compreende a maior floresta tropical do planeta, exerce expressiva atuação no ciclo do carbono, captação, armazenamento e ciclagem de nutrientes, ciclo da água, regulação do clima e distribuição de chuvas no Brasil. De acordo com a classificação de Koppen e Geiger (1928), o clima da região é tropical e ocorrem os subtipos: floresta tropical (Af), tropical de monção (Am) e tropical seco e úmido (Aw). A temperatura e precipitação média anual é de 25°C e 2.000 mm,

respectivamente, onde a estação chuvosa ocorre de janeiro a junho e a estação seca de julho a dezembro.

Na região nordeste e extremo leste do bioma, o estado de MA se encontra na região denominada “arco do desmatamento”, nome atribuído a fronteira cujo a atividade de desmatamento é intensa (SHIMABUKURO et al., 2020). O estado do MA possui área de 329.651,496 km² (IBGE, 2020), sendo que o bioma Amazônia ocorre em cerca de 34% (cerca de 112.396 km²) do território do estado (MMA, 2020). De acordo com dados do Prodes-INPE (INPE, 2021), no período de 2008 a 2021 foi registrada uma área de supressão da vegetação na ordem de 3049,7 km² no MA. Diante disso, a área de abrangência do bioma Amazônia sobre o estado do MA (Figura 1) foi selecionada para análise.

Figura 1. Localização da área de estudo com a respectiva abrangência do bioma Amazônia sobre o estado do Maranhão e uso e cobertura do solo em 2020.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na fronteira entre os biomas Cerrado e Amazônia, o estado de MA possui cobertura vegetal composta por florestas tropicais, caatingas e cerrado. Os usos e

cobertura da terra predominantes, segundo MapBiomias (2021), são: formação florestal (17%), formação savânica (13%) e pastagem (11%). No estado a abrangência do bioma Amazônia ocorre sobre os domínios climáticos Am (tropical úmido) e Aw (tropical com inverno seco). Para assegurar o cálculo mais preciso de áreas e distância neste trabalho foi padronizado o uso da projeção Albers (*Albers Conical Equal Area Brazil*).

3. DEFINIÇÕES CONCEITUAIS

Para consenso geral dos termos utilizados nesse trabalho foram definidos os principais conceitos empregados, a partir de definições contidas na legislação nacional vigente e documentos internacionais.

Floresta primária: Terra com cobertura de copa com mais de 10 por cento da área e uma superfície superior a 0,5 hectares (ha), com árvores de altura mínima de 5 metros. Incluem-se apenas talhões naturais, ou seja, não plantados pelo homem (FAO, 1998).

Vegetação secundária: Terra coberta por vegetação em diferentes fases de reconstituição com recrescimento natural resultante da exploração de florestas primárias, anteriormente desmatadas (FAO, 1998).

Restauração: Restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais próximo da sua condição original (Lei nº 9.985/2000).

Serviços ambientais: Atividades individuais ou coletivas que favorecem a manutenção, a recuperação ou a melhoria dos serviços ecossistêmicos (Lei nº 14.119/2021).

Serviços ecossistêmicos: Benefícios relevantes para a sociedade gerados pelos ecossistemas, em termos de manutenção, recuperação ou melhoria das condições ambientais (Serviços de Provisão, Serviços de Regulação, Serviços de Suporte, Serviços Culturais) (Lei nº 14.119/2021).

Serviços de Regulação: Os que ocorrem para a manutenção da estabilidade dos processos ecossistêmicos, tais como o sequestro de carbono, a purificação do ar, a moderação de eventos climáticos extremos, a manutenção do equilíbrio do ciclo hidrológico, a minimização de enchentes e secas e o controle dos processos críticos de erosão e de deslizamento de encostas (Lei nº 14.119/2021).

Pagamento por Serviços Ambientais (PSA): Transação de natureza voluntária, mediante a qual um pagador de serviços ambientais transfere a um provedor desses serviços

recursos financeiros ou outra forma de remuneração, nas condições acertadas, respeitadas as disposições legais e regulamentares pertinentes (Lei nº 14.119/2021).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

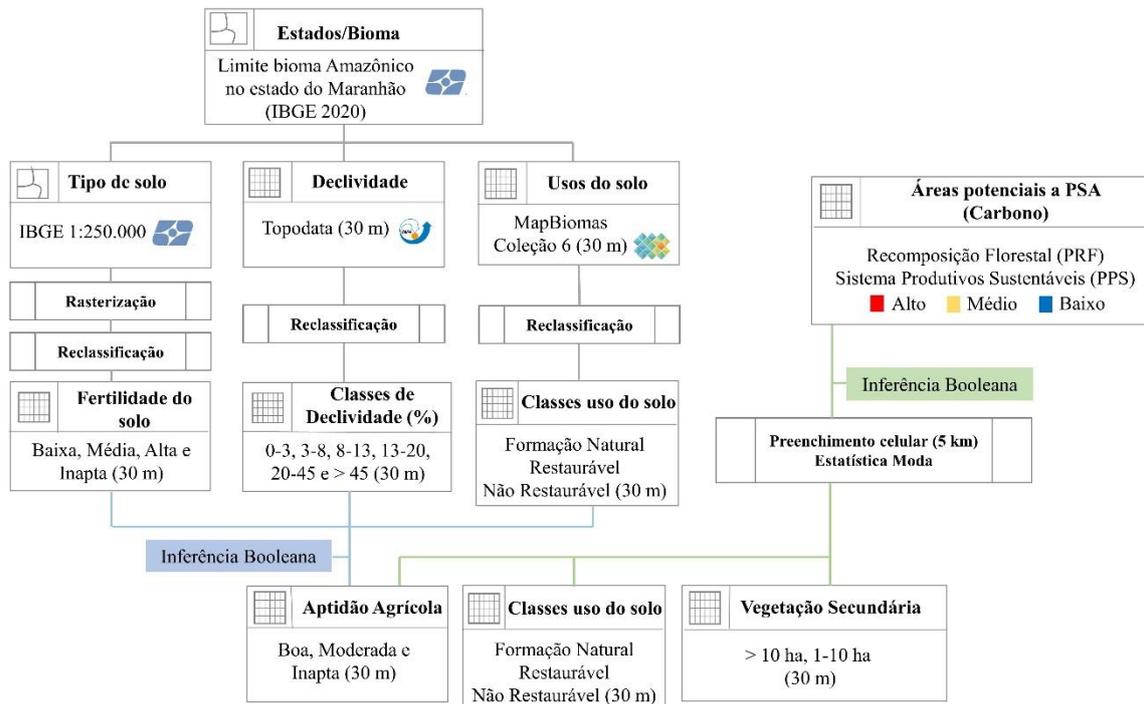
A base de dados utilizadas nesse trabalho é apresentada na Tabela 1, a qual reúne as especificações acerca da fonte de aquisição, ano de elaboração, assim como escala, resolução espacial e tipo de dado. A Figura 2, contém o diagrama *Object Modeling Technique for Geographic Applications* (OMT-G) com as etapas utilizadas para a identificação de áreas potenciais à PSA no bioma Amazônia, sobre o estado do MA no ano de 2020. Os procedimentos adotados basearam-se na coleta de dados referente a unidades de análise, posteriormente as transformações necessárias foram aplicadas. Nos tópicos seguintes, mais detalhes sobre os materiais e métodos são apresentados.

Tabela 1. Base de dados e fonte primária de aquisição com seu respectivo ano de elaboração e demais especificações.

Dado	Representação	Fonte	Nível de detalhamento	Ano
Pedologia	Vetorial	IBGE/ RADAM	1:250.000	2001
Declividade	Matricial	TopoData	30 m	2000
Vegetação secundária	Matricial	MapBiomas/ Silva-Junior et al. (2020)	30 m	2020
Usos do solo	Matricial	MapBiomas	30 m	2020

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 2. Diagrama OMT-G com o relacionamento e operações entre os dados para o alcance do objetivo proposto.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1 Aptidão agrícola

A camada de aptidão agrícola foi obtida a partir da aplicação de um método generalista de intersecção entre camadas com base na álgebra Booleana, sendo os mapas utilizados: fertilidade do solo e declividade (Anexo 1-A e B, respectivamente). Como pode ser observado na Tabela 2, a aptidão agrícola foi definida como boa, moderada e inapta a partir dos valores de cada atributo utilizado.

A classe “Boa” refere-se as áreas cujo a introdução de culturas agrícolas é apropriada e demanda baixo ou nenhum recurso orçamentário, pois as condições do meio físico são favoráveis. A classe “Moderada” apresenta boas condições físicas, porém têm baixa ou média demanda orçamentária para preparar o terreno. A classe “Inapta” corresponde a restrição instituída pela Lei de Proteção da Vegetação Nativa (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) em relação ao percentual de declividade superior a 45°. Adicionalmente áreas com a presença da cobertura do solo do tipo Formação Florestal, Savânica e Mangue também foram definidas como Inapta, para fins de conservação das formações naturais. Outros fatores como clima, hidrografia e adequação a legislação vigente (Área de Preservação Permanente – APP; e Reserva Legal - RL) também devem ser considerados, mas não foram incluídos nessa análise preliminar.

Tabela 2. Classes de Aptidão Agrícola e respectivos limiares dos atributos.

Atributos	Classes de Aptidão Agrícola		
	<i>Boa</i>	<i>Regular</i>	<i>Restrita</i>
<i>Fertilidade do solo</i>	Boa	Moderada	Inapta
<i>Declividade (%)</i>	0%-20%	20%-45%	> 45%

Fonte: Adaptado de Martini (2015)

4.1.1 Fertilidade do solo

De acordo com Valladares et al. (2007) e segundo o mapa pedológico do RADAM/IBGE os principais tipos de solos que ocorrem sobre o estado do MA são: Argissolos, Cambissolos, Gleissolos, Latossolos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Litólicos, Neossolos Quartzarênicos, Nitossolos, Planossolos, Plintossolos, Vertissolos e solos indiscriminados de mangues com a classe de Latossolos sendo predominante. Com base nisso, a camada de informação contendo a fertilidade do solo (Anexo 1-A) foi elaborada de acordo com potencial químico natural (baixo, médio e alto) em viabilizar o desenvolvimento de uma planta em cada tipo de solo. A classificação adotada foi apresentada por Martini (2015). O mapa pedológico na escala 1:250.000 utilizado é oriundo do mapeamento do Projeto RADAMBRASIL e foi classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. A camada contendo as informações pedológicas é disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2001)

(https://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/versao_2021/). Ao final, a camada vetorial foi transformada em matricial para fins de padronização dos dados, tendo como camada de referência o raster de vegetação secundária com 30 metros de resolução espacial.

4.1.2 Declividade

O dado de declividade consiste em uma derivação do Modelo Digital de Elevação (MDE) elaborado a partir de dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e possui resolução espacial de 30 metros (VALERIANO; ROSSETI, 2012). Disponível no projeto Topodata (<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>), as folhas topográficas sobre a área de estudo foram adquiridas e processadas quanto a geração de um mosaico único sobre a área. Posteriormente, a declividade em unidade de porcentagem foi submetida ao fatiamento para definição das classes: Plano (0-3%), Suave Ondulado (3-8%),

Moderadamente Ondulado (8-13%), Ondulado (13-20%), Forte Ondulado (20-45%) e Montanhoso ou Escarpado (> 45%) (VALLADARES et al., 2007). A camada de declividade com as respectivas classes pode ser consultada no Anexo 1-B, sendo essa gerada em formato matricial.

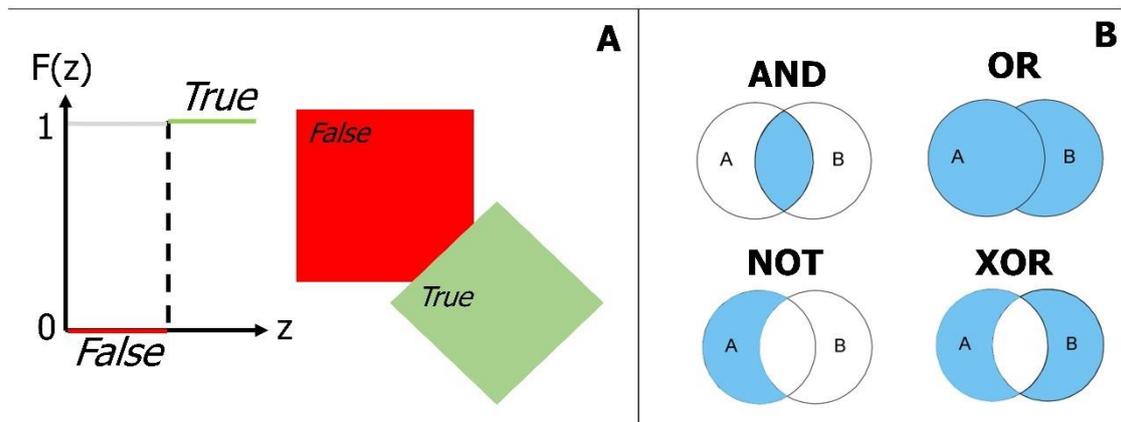
4.3 Reclassificação usos do solo e vegetação secundária

O dado de uso e cobertura da terra do MapBiomas Coleção 6 (2020) com resolução espacial de 30 metros foi adquirido por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE) e, posteriormente, as classes de uso e cobertura da terra foram reagrupadas para as classes Formação Natural, Restaurável e Não restaurável, de acordo com o agrupamento proposto por Strassburg et. al. (2022). A partir da classe de floresta a metodologia proposta por Silva-Junior et. al, (2020) permitiu a definição das áreas de vegetação secundária, cujo processamento e aquisição foram realizados pelo GEE. A vegetação secundária foi reagrupada a partir do tamanho dos fragmentos menor que 1 ha, entre 1-10 ha e maior que 10 ha, uma vez que fragmentos maiores que 10 ha possuem maior potencial em sequestro de carbono (STRASSBURG, et. al., 2018).

4.4 Inferência Booleana

A inferência Booleana foi utilizada para verificar o atendimento das condições estabelecidas para definição das áreas potenciais para PSA de sequestro de C em remanescentes de vegetação secundária. A lógica empregada é binária podendo assumir valores de 0 e 1 (Figura 3-A) a partir do atendimento de lógicas estabelecidas por operadores algébricos condicionais (Figura 3-B), que comparam campos quantitativos e qualitativos (CÂMARA et. al., 2001). A diferença entre a inferência Booleana e as demais, consiste na definição de limites rígidos (bordas) entre as classes, onde essas mesmas classes assumem valores igual a 1 ou 0. O operador “and” foi utilizado para verificar a interseção entre dois ou mais conjuntos, o “or” a união dos conjuntos, “not” para operar diferenças (ex: pertencente ao conjunto A mas não ao B) e “xor” para recuperar a área pertencente a um conjunto e ao outro, mas não a interseção dos conjuntos. Outros operadores e maiores informações sobre a lógica Booleana são encontrados em Câmara et. al. (2001).

Figura 3 – Inferência Booleana. A) Lógica binária de atendimento das condições, em vermelho consta a representação das áreas que não atendem a condição (0) e em verde as áreas que atendem (1); B) Operadores de comparação dos campos quantitativos e qualitativos.



Fonte: Adaptado de Câmara et. al. (2001)

4.5 Análise dos dados

Como unidade de análise e aplicação da inferência Booleana uma grade celular de dimensão 5 x 5 km foi estabelecida. O tamanho de cada célula foi determinado com base na camada de vegetação secundária, objeto de interesse dessa pesquisa. Buscou-se observar a grade que melhor pudesse capturar a ocorrência de vegetação secundária em cada célula, de forma a ser compatível com os demais planos de informação utilizados. Foram testadas células de tamanho 1 x 1 km, 5 x 5 km e 10 x 10 km (Anexo 2-B). Visto que cerca de 30% dos fragmentos de vegetação secundária possuem um tamanho de 10 ha (Anexo 2-A), optou-se pela grade de 5 x 5 km (Anexo 2-B). As estatísticas utilizadas no procedimento de preenchimento das células são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Preenchimento celular com atributos empregados na inferência Booleana.

Atributo	Classe	Estatística
Aptidão Agrícola	1 = Boa 2 = Moderada 3 = Inapta	Moda
Reclassificação uso do solo	1 = Formação Natural 2 = Restaurável 3 = Não Restaurável	Moda
Vegetação secundária	1 = >10 ha 2 = 1-10 há 3 = < 1 ha	Moda

Fonte: Elaborada pela autora.

4.6 Área potenciais para PSA de fixação de C

Para definição das áreas potenciais foram estabelecidas duas tipologias: Recomposição Florestal (PRF) e Sistemas Produtivos Sustentáveis (PPS). Tendo como foco o tamanho dos remanescentes de vegetação secundária, as demais camadas foram relacionadas envolvendo os operadores Booleanos para alcance das classes potenciais alto, médio e baixo de PRF (Tabela 4) e PPS (Tabela 5). A tipologia PRF visou detectar áreas para fins de conservação, possível expansão de Áreas de Preservação Permanente (APP), Reservas Legais (RL) e definição de novas unidades de conservação como Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN). Para isso, a vegetação secundária deveria ocorrer em áreas superiores a 10 ha em regiões com predominância de Formação Natural ou Restauráveis, para assim ser classificada com alto potencial. Para a classe de médio e baixo houve apenas a variação do tamanho do fragmento de vegetação secundária, de 1 a 10 ha e menor que 1 ha, respectivamente. O potencial da tipologia PPS foi definido seguindo a mesma lógica de tamanho dos fragmentos, sobre áreas de formação natural ou restauráveis com variação da aptidão agrícola, onde boa (alto potencial), moderada (médio potencial) e boa ou moderada (baixo potencial).

Tabela 4 – Estrutura lógica inferência Booleana para definição do Potencial para Recomposição Florestal (PRF).

Classes	Vegetação secundária (Tamanho do fragmento)		Reclassificação uso do solo
Alto	> 10 ha		
Médio	1 – 10 ha	AND	Formação natural OR Restaurável
Baixo	< 1 ha		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5 – Estrutura lógica inferência Booleana para definição do Potencial para Sistemas Produtivos Sustentáveis (PPS).

Classes	Vegetação secundária (Tamanho do fragmento)		Reclassificação uso do solo	Aptidão Agrícola
Alto	> 10 ha	AND	AND	Boa

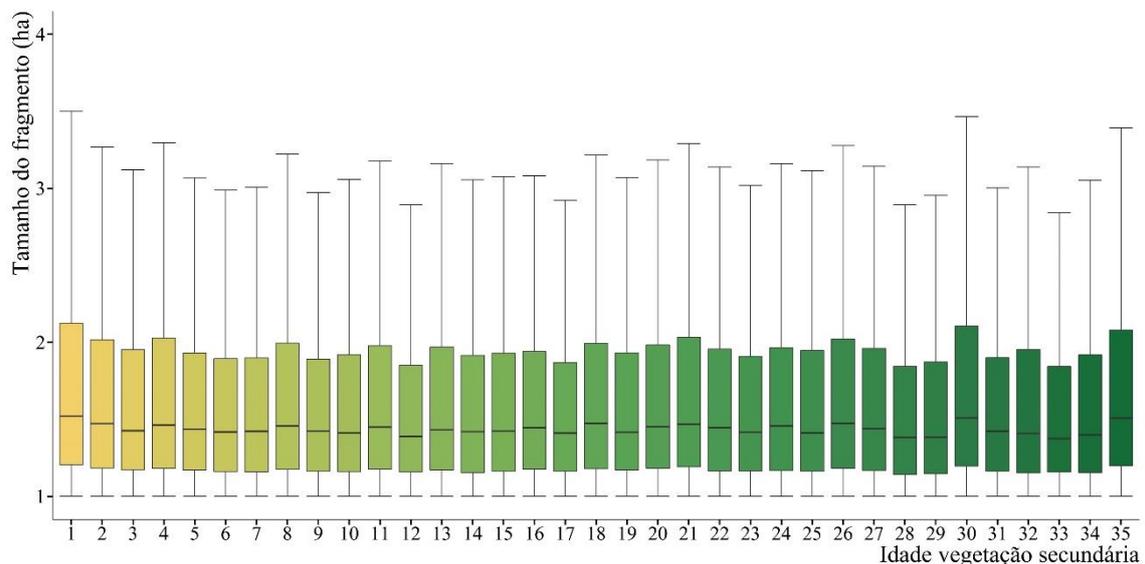
Médio	1 – 10 ha	Formação natural	Moderada
Baixo	< 1 ha	OR Restaurável	Boa OR Moderada

Fonte: Elaborado pela autora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise preliminar sobre o tamanho dos fragmentos de vegetação secundária no bioma Amazônia sobre o estado do Maranhão, revelou que fragmentos com tamanho médio de 300 ha predominam-se em idades entre 1 a 6 anos, enquanto fragmentos menores que 4 ha ocorrem com maior frequência (Anexo 2-A) e independem da idade (Figura 4). Esse resultado pode estar relacionado com o recente aumento na taxa de desmatamento no bioma Amazônia desde 2017/2018. Diante disso, fica evidente a emergência em se preservar os remanescentes de floresta primária para serrar o avanço do desmatamento e as áreas onde a vegetação está se recompondo, a fim de potencializar o sequestro e estoque de carbono pela vegetação antes que essas passem pelo processo de supressão novamente.

Figura 4 – Boxplot com a variação do tamanho dos fragmentos de vegetação secundária menores que 4 ha por idade.



Fonte: Elaborada pela autora.

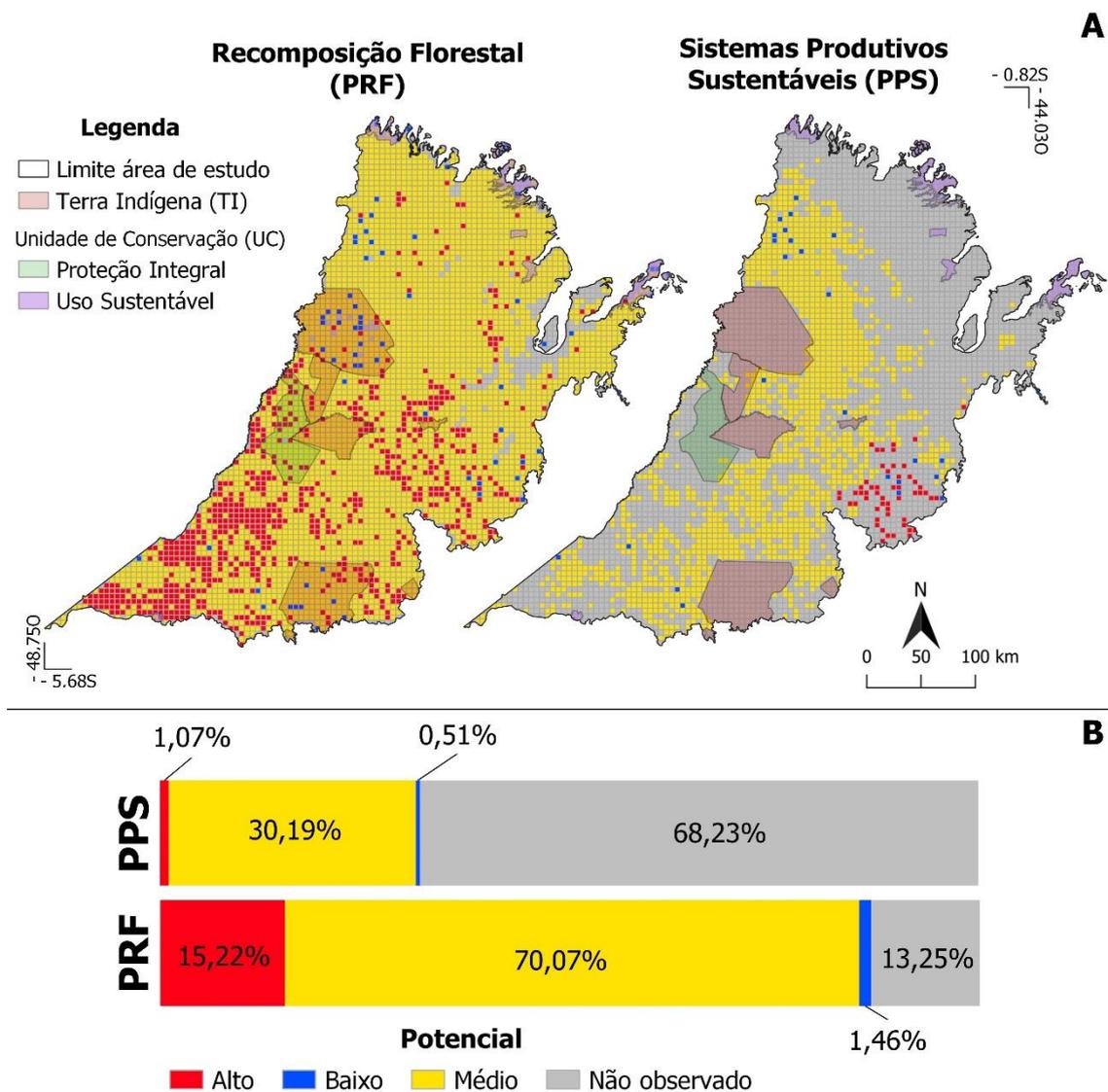
A definição das classes potenciais baseadas no tamanho dos fragmentos foi eficiente na detecção de áreas com alto, médio e baixo potencial para ambas as tipologias (PRF e PPS). Como pode ser observado na Figura 5-A, houve uma concentração de áreas

com alto potencial de PRF na região sudoeste da área de estudo, entre UC de Proteção Integral (PI) e Terras Indígenas (TIs). Essa concentração pode indicar uma região com elevado potencial para definição de RPPNs, novas UCs e a promoção de conectividade entre os fragmentos de vegetação secundária, APPs, RLs e floresta primária. Essa iniciativa pode atuar no fortalecimento de proteção dos territórios com a introdução do instrumento de PSA fundamentado em medidas e metas de regulação e controle das áreas a serem conservadas.

Ainda na tipologia PRF foi verificado uma predominância da classe de potencial médio em 70,07% da área (Figura 5-B) e, em menor quantidade, a classe de baixo potencial (1,46%). Esse resultado corrobora com a análise apresentada na Figura 4, a qual apresenta que os fragmentos de vegetação secundária, em sua maioria, são de tamanho entre 1 ha e 4 ha. Sendo assim, é possível constatar que os fragmentos de vegetação secundária devem ser submetidos a uma análise mais específica da perspectiva da paisagem, com a finalidade de potencializar a recuperação, conexão e expansão dessas áreas, visando o adensamento de vazios não regenerados em prol do sequestro de carbono. As áreas com baixo potencial foram pouco expressivas (1,46%) e ocorreram sobre algumas TIs. A análise visual baseada em imagem PlanetScope (mosaicos mensais para os trópicos) de setembro de 2020 foi utilizada para verificar alguns equívocos na classe de baixo potencial PRF. Entre as possíveis causas de erro está a alta incidência de nuvens sobre áreas de floresta, que durante a classificação do dado de uso e cobertura do solo MapBiomas pode ter influenciado na classificação.

Em relação a tipologia PPS, a classe predominante foi não observado (68,23%), seguido de médio potencial (30,19%) (Figura 5-B). Especialmente, as áreas de médio potencial ocorrem na região central da área de estudo, indo da parte inferior sul até noroeste. Essa região é marcada pela intensa atividade agropecuária, o que pode ter condicionado a configuração de fragmentos entre 1 ha e 10 ha nessas áreas. A classe de alto potencial concentrou-se à nordeste mais ao centro da área, onde ocorrem fragmentos maiores que 10 ha e aptidão agrícola boa, porém representa apenas 1,07% das células. Outra classe com pouca ocorrência é a de baixo potencial, representando apenas 0,51%. As áreas cujo a classe foi definida como não observado representam regiões com predomínio da classe formação natural e, portanto, são indicadas para preservação da floresta e outras formações que correm na região.

Figura 5 – Áreas potenciais para Pagamento por Serviços Ambientais de sequestro de Carbono. A) Sistemas de Recomposição Florestal (a esquerda) e Sistemas Produtivos Sustentáveis (a direita) com respectivas unidades de conservação e terras indígenas no bioma Amazônia sobre o estado do Maranhão; e B) Percentual de células classificadas com as respectivas classes de potencial nos sistemas PRF e PPS.



Fonte: Elaborado pela autora.

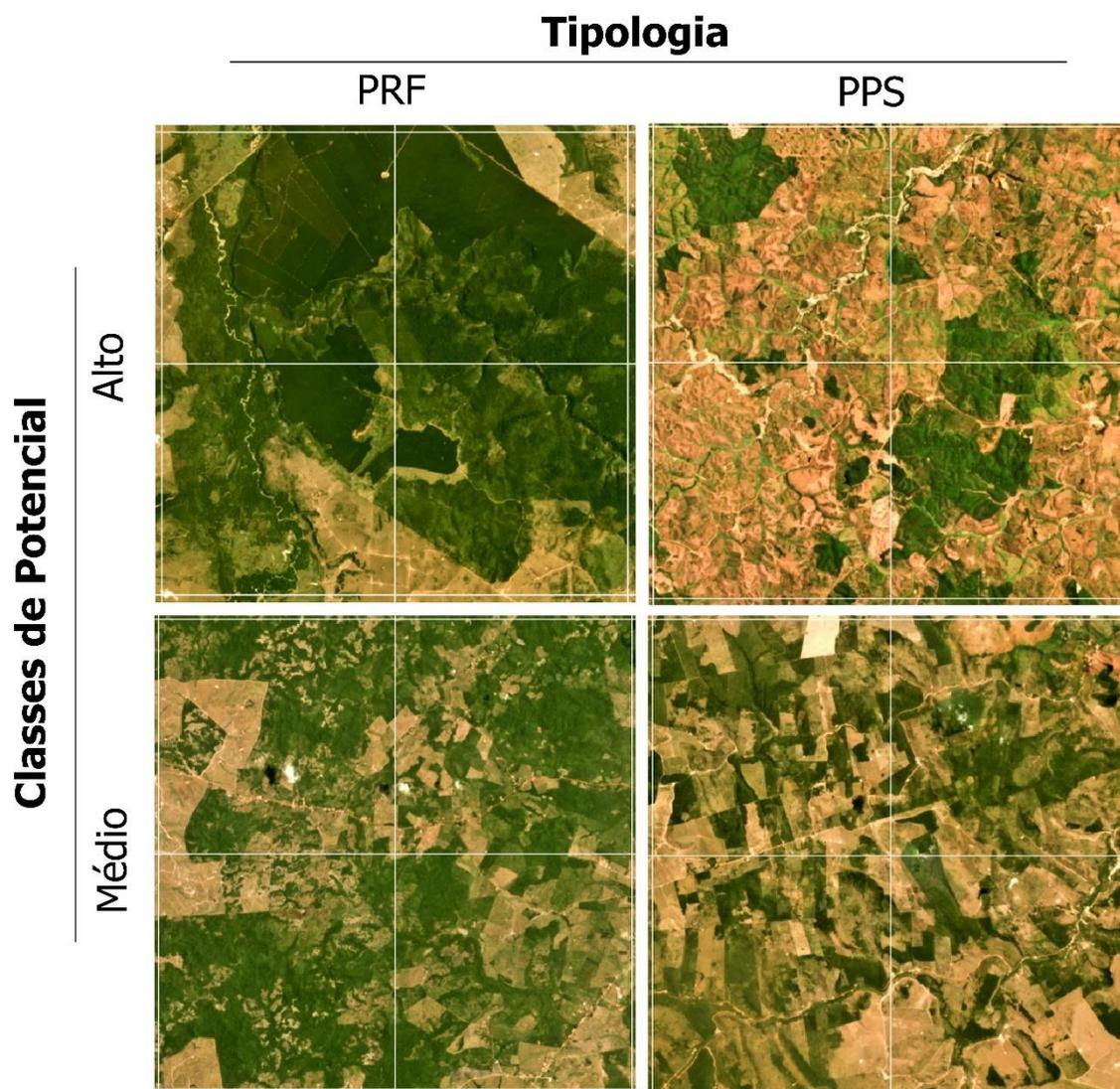
A identificação dessas classes potenciais para PPS pode basear a elaboração de políticas públicas a nível estadual. Para isso é recomendado uma avaliação de custo de oportunidade da terra para definir o valor a ser pago por hectare dedicado para PSA de sequestro de carbono. Outra potencialidade dessa estratégia é otimizar a avaliação e análise da adequabilidade das propriedades rurais no MA, a partir da legislação vigente.

Somadas, as ações podem contribuir para regularização do Cadastro Ambiental Rural e execução da recente lei de PSA instituída em 2021.

Como a metodologia e análise aqui apresentada foram pouco exploradas na literatura, para fins de verificação dos resultados sem dados de campo, foi realizada uma verificação remota (Figura 6). A classe de potencial alto na tipologia PRF reflete bem as áreas com fragmentos de floresta secundária maiores que 10 ha e predomínio de formação natural. Em comparação a classe de potencial médio na mesma tipologia, são observados fragmentos menores e mais dispersos na paisagem, no entanto ainda há predomínio de vegetação. Quando comparada a classe de potencial alto da tipologia PPS, foi verificado uma paisagem com predominância de uso agropecuário com a presença de fragmentos de vegetação secundária maiores que 10 ha, enquanto na classe de médio potencial o uso predominante novamente é agropecuário com fragmentos menores de vegetação secundária dispersos na paisagem.

Por fim, algumas melhorias devem ser implementadas para elevar a capacidade da metodologia e incluir diferentes aspectos necessários para definir as áreas com maior risco como o histórico de transformação das áreas, os distúrbios que ocorreram e a caracterização de variáveis climáticas. Essas melhorias podem contribuir para o estabelecimento de áreas com maior viabilidade de restauração e recuperação do serviço ecossistêmico de sequestro de Carbono. Ademais, uma análise sobre os remanescentes na paisagem e inclusão de dados socioeconômicos é recomendada para uma avaliação acerca da viabilidade de PSAs na região. Em relação aos dados empregados, foram testados dados de degradação das pastagens e florestas, porém para inclusão da álgebra Booleana envolveu uma maior complexidade e os resultados alcançados não foram satisfatórios. O dado de vegetação secundário também deve ser usado com atenção, pois foi verificado a inclusão de sistemas de florestas plantadas comerciais como formação natural. Esse aspecto está sendo trabalhado pelo projeto MapBiomass, mas também são necessários esforços para o mapeamento de sistemas produtivos florestais como silvicultura e outros que ocorrem com maior frequência na região norte do país.

Figura 6 – Verificação remota da atribuição de classes potenciais (alto e médio) nas tipologias PRF e PPS a partir de imagens PlanetScope Mosaico mensal referente ao mês de setembro de 2020.



Fonte: Elaborada pela autora.

6. CONCLUSÃO

A metodologia empregada possibilitou a identificação de áreas com diferentes níveis de potencialidades a definição de PSA para sequestro de carbono. As tipologias estabelecidas foram eficientes para diferenciar áreas potenciais a PRF e PPS com objetivo de potencializar a capacidade dos renascentes de vegetação secundária para sequestrar e estocar carbono. Entre as classes potenciais foi verificado que a área em análise apresenta em maior proporção médio potencial para sistemas PPS e PRF, sendo que a classe de alto

potencial para PRF foi a segunda em maior proporção. Os resultados aqui apresentados podem basear trabalhos futuros que devem considerar aspectos climáticos, socioeconômicos e análise da paisagem para ampliar a capacidade desses sistemas se estabelecerem ao longo do tempo como sistemas sustentáveis e/ou regenerados que provém o serviço de sequestro de carbono. Ademais, o uso de novos dados que tragam informações acerca do histórico das áreas como degradação, mudança de uso da terra, recorrência de queimadas e melhoria na acurácia do produto de vegetação secundária devem ser considerados, para uma melhor compreensão da viabilidade dos sistemas.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, T.O. et al. Projections of future forest degradation and CO2 emissions for the Brazilian Amazon. **Science Advances**, v. 8, eabj3309, 2022. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abj3309>
- BRASIL, Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Dispõe sobre: Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2019-2022/2021/Lei/L14119.htm. Acesso em: 25 de maio de 2022.
- BRASIL, Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Dispõe sobre: Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm. Acesso em: 25 de maio de 2022.
- CÂMARA, G. et al.. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos, INPE, 2001 (on-line, 2a. edição, revista e ampliada). Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 19 de maio de 2022.
- CROUZEILLES, R. et al. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. **Science Advances**, 3, 11, 1701345, 2017. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701345>
- FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação. Termos e definições, 1998. Disponível em: <https://www.fao.org/forestry/4222-0dd83a652d950f2fcd7d74272ecdb39db.pdf>. Acesso em: 25 de maio de 2022.
- GATTI, L.V. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, 595, p. 388-398, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- HEINRICH, V.H.A. et al. Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature Communication**, 12, 1785, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22050-1>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Banco de dados: Projeto RADAMBRASIL. 2001. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/bases-referenciais/bases-cartograficas/cartas>>. Acesso em: 30 abril 2022.

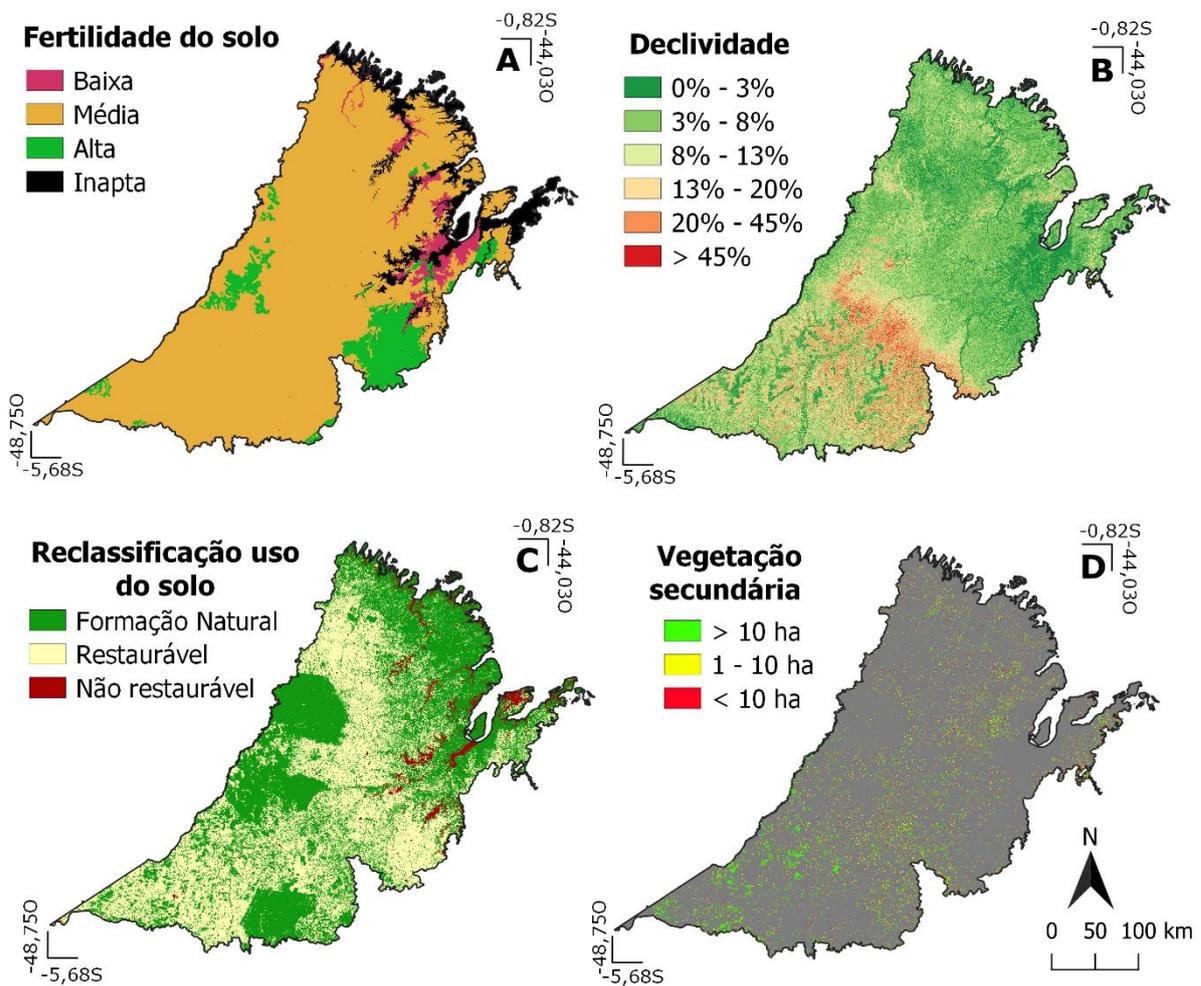
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Cidades e Estados: Maranhão. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma/.html>. Acesso em: 30 de abril de 2022.
- INPE—Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Coordenação Geral de Observação da Terra. Programa de Monitoramento da Amazônia e Demais Biomas. Desmatamento—Amazônia. 2021. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>. Acessado em: 15 Abril de 2022.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Impacts, Adaptation and Vulnerability. 6ed. 2022.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.
- MMA—Ministério do Meio Ambiente Amazônia. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biomas/amazônia>. Acesso em: 30 de abril de 2022.
- PERALTA, C.E. O Pagamento por Serviços Ambientais como Instrumento para orientar a Sustentabilidade Ambiental. In: LAVRATTI, Paula; TEJEIRO, Guillermo (organizadores)..(Org.). Direito e mudanças climáticas 7: Pagamento por Serviços Ambientais: experiências locais e latino- americanas. 1ed., 2014.
- SCARANO, F.R. Ecosystem-based adaptation to climate change: concept, scalability and a role for conservation Science. **Perspectives in ecology and conservation**, 15, 65-73, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2017.05.003>
- SHIMABUKURO, Y.E. et al. Mapping burned areas of Mato Grosso State Brazilian Amazon Using Multisensor Datasets. **Remote Sensing**, 12, 22, 3827, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12223827>
- SILVA-JUNIOR, C.H.L. et al. Forest fragmentation and fires in the Eastern Brazilian Amazon-Maranhão State, Brazil. **Fire**, v. 5, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.3390/fire5030077>
- SILVA-JUNIOR, C.H.L. et al. Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. **Scientific Data**. 7, 269, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00600-4>
- SOUZA, C.M.J. et. al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, 12, 17, 2735, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- STRASSBURG, B. B. N. et al. Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains halve costs. **Nature Ecology & Evolution**, 3, p. 62-70, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0743-8>
- STRASSBURG, B. B. N. et al. Identificando áreas prioritárias para restauração: Bioma Amazônia. Ficha Técnica, 2022, 66p. Disponível em: <https://www.iisrio.org/wp-content/uploads/2022/02/A%CC%81reas-Prioritaria%CC%81tias-Amazo%CC%82nia-AMZ-2030.pdf>
- STRASSBURG et al. Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains and halve costs. **Nature Ecology & Evolution**, 3, 62-70, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0743-8>

VALERIANO, M.M.; ROSSETI, D.F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. *Applied Geography*, 32, 2, 300-309, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004>

VALLADARES et al. Mapeamento da Aptidão Agrícola das Terras do Estado do Maranhão. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 6, 25p. 2007. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/94819/1/ID-27998.pdf> Acesso em: 25 de junho de 2022.

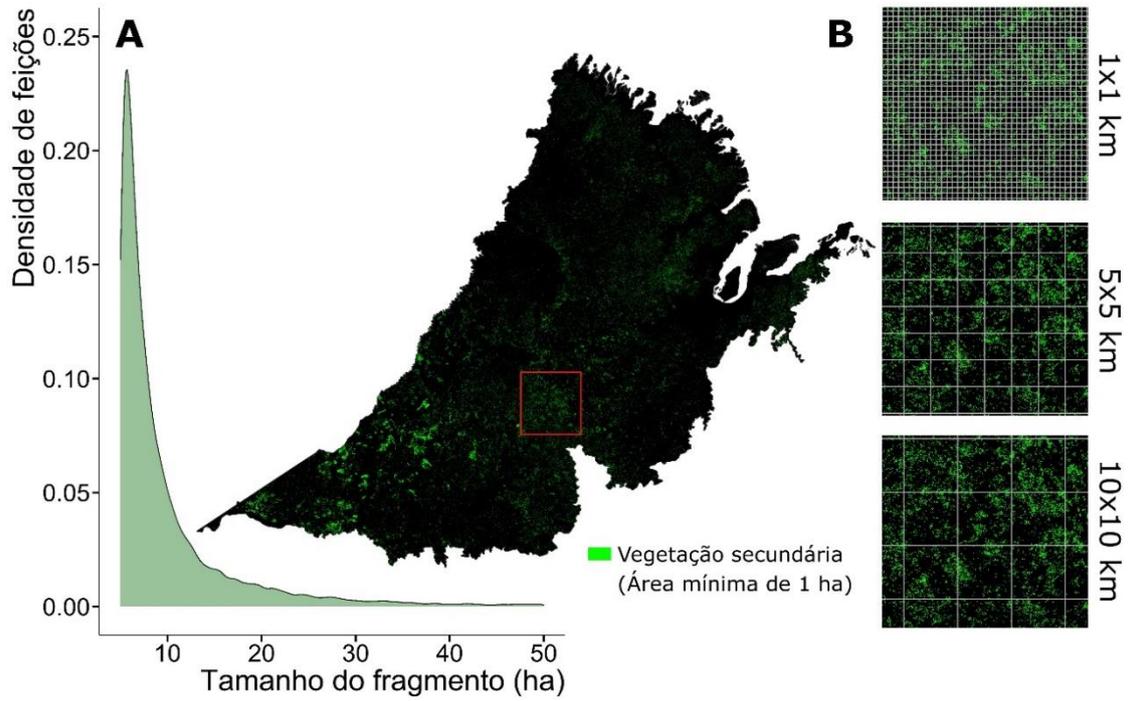
ANEXOS

Anexo 1. Dados utilizados para produção da camada de Aptidão Agrícola e Potencial para PSA. A) Classes de Fertilidade do Solo; B) Classes de Declividade; C) Reclassificação do uso do solo; D) Vegetação secundária.



Fonte: Elaborado pela autora.

Anexo Z – Dimensionamento da grade celular; A) Densidade de feiçoes a partir do tamanho do fragmento (ha); B) Diferentes dimensões de grades celulares testadas.



Fonte: Elaborada pela autora.