

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - DEA

RAIMUNDO MATOS PEREIRA NETO

**QUANTIFICAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NA AMAZÔNIA MARANHENSE
EM DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA DA TERRA**

São Luís

2022

RAIMUNDO MATOS PEREIRA NETO

**QUANTIFICAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NA AMAZÔNIA MARANHENSE
EM DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA DA TERRA**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia Bacharelado do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva Junior

São Luís

2022

Pereira Neto, Raimundo Matos.

Quantificação do estoque de carbono na Amazônia maranhense em diferentes tipos de cobertura da terra / Raimundo Matos Pereira Neto. – São Luís, 2022.

32 f

Monografia (Graduação) – Curso de Agronomia Bacharelado, Universidade Estadual do Maranhão, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva Júnior.

1.Estoque de carbono. 2.Floresta. 3.Maranhão. I.Título.

CDU: 630*5(812.1

Elaborado por Giselle Frazão Tavares - CRB 13/665

RAIMUNDO MATOS PEREIRA NETO

**QUANTIFICAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NA AMAZÔNIA MARANHENSE
EM DIFERENTES TIPOS DE COBERTURA DA TERRA**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia
Bacharelado do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Estadual do Maranhão, para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado em: 02 / 08 / 22

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Celso Henrique Leite Silva Junior (Orientador)
Doutor em Sensoriamento Remoto
Universidade Estadual do Maranhão



Profa. Dra. Camila Valeria de Jesus Silva
Doutora em Geografia
Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia



Profa. Dra. Sonaira Souza da Silva
Doutora em Ciências de Florestas Tropicais
Universidade Federal do Acre

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus, mais que agradeço, dou a Ele toda honra e glória dessa graduação, pois Dele veio a força para militar por todos esses anos. Ele que opera o querer e o realizar, operou em minha vida tanto para desejar essa conquista como para que ela fosse concluída.

Agradeço aos meus pais, Jocundo Ferreira Franco Filho e Jurema Pereira Franco, que acreditaram no poder da educação, e como ela poderia me transformar, melhorando a minha vida, e para tanto, por vezes arriscaram a sua segurança alimentar para bancar minha instrução, deixaram de construir patrimônio, já que o processo educacional é oneroso e trabalharam muito, se desgastaram muito, e se dedicaram até o limiar de suas forças para ver esse momento. Sei que jamais irei paga-los, mas espero honra-los por seus esforços.

Agradeço a minha esposa, Irnis Maria Pereira Matos, cuidou tanto de mim como dos meus dois filhos, João Marcos Pereira Matos e Daniel Lucas Pereira Matos, que são fontes de motivação para eu procurar melhorar e buscar mais conquistas. Cuidados pelos quais sem eles impossibilitariam a conclusão desse curso, dessa forma considero-a como proprietária também desse diploma.

Agradeço a minha irmã, Marcela Mayana Pereira Franco Cavassana, que me ensinou por meio de exemplos, me apoiou durante toda vida e me ajudou no trabalho de conclusão de curso. Assim como meu cunhado, Marcio Cavassana Costa, pelos incentivos e por compartilhar seus conhecimentos agrários.

Agradeço meu irmão, Jucicláudio Silva Oliveira, por me ajudar a colocar meus conhecimentos teóricos em prática, com sua força e boa vontade me ajudando a ter conhecimento e a crescer dentro da área das agrárias.

Agradeço a Maria Leal Brandão, que cuidou de mim igual uma mãe cuida e contribui de forma significativa para todas as realizações que consegui conquistar.

Agradeço a todos os meus professores, pois ninguém chega a lugar algum sozinho, e foi sobre os ombros desses homens e mulheres que caminhei para chegar ao final desse curso.

Agradeço ao professor Dr^o Celso Henrique Leite Silva Júnior, meu orientador, que compartilhou o seu conhecimento e mesmo em meio a trabalho e projetos pessoais, dedicou tempo e atenção no trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

O Carbono é um elemento que participa na formação dos principais gases de efeito estufa presentes na atmosfera, o metano e gás carbônico. Importante na manutenção da vida no planeta, o efeito estufa, potencializado por ações antrópicas tem efeitos prejudiciais por impactarem negativamente as mudanças climáticas. A manutenção correta de florestas é uma forma eficaz de mitigar os danos causados pelas emissões de gases de efeito estufa. Os produtos florestais acumulam grande quantidade de Carbono, e por retirarem esse elemento da atmosfera, diminuem sua concentração e reduzem seus efeitos. A quantificação dos estoques de Carbono por meio de Sensoriamento Remoto é uma forma precisa e conservadora de saber o real estado das florestas e direcionar políticas públicas para conservação florestal. O presente trabalho objetivou quantificar os estoques de carbono florestal da Amazônia maranhense para o ano de 2019 através de dados e técnicas de sensoriamento remoto, usando o software QGIS e a plataforma Google Earth Engine, a partir de dados de altura do dossel da vegetação, floresta de terra firme madura, floresta de terra firme secundária, florestas de mangue e delimitação de áreas legalmente protegidas. Utilizando o método proposto por Longo et al. (2016), a primeira etapa de processamento contou da produção do mapa de estoques de carbono para a Amazônia maranhense. Após a produção do mapa dos estoques de carbono para a Amazônia maranhense, esse mapa foi sobreposto os mapas de floresta e delimitação das áreas legalmente protegidas para fim de quantificação e comparações. Nossa abordagem de sensoriamento remoto revelou que em 2019, as florestas da Amazônia Maranhense estocavam cerca de 279 milhões de toneladas de CO₂ em sua biomassa. Do montante de estoques de CO₂, 78% estavam em florestas maduras, 17% em florestas de crescimento secundário e 5% em florestas de mangue. Os maiores estoques de carbono estavam em unidades de conservação de proteção integral, tanto em florestas degradadas quanto nas não-degradadas e os menores nas áreas não-protegidas. Os estoques de florestas em áreas não protegidas, são entre dois e quatro vezes menores se comparados as áreas protegidas.

Palavras Chaves: Estoque de Carbono; Floresta; Maranhão.

ABSTRACT

Carbon is an element that participates in the formation of the main greenhouse gases present in the atmosphere, methane and carbon dioxide. Important in the maintenance of life on the planet, the greenhouse effect, potentiated by human actions, has harmful effects by negatively impacting climate change. Maintaining forests correctly is an effective way of mitigating the damage caused by greenhouse gas emissions. Forest products accumulate large amounts of carbon, and by removing this element from the atmosphere, they reduce its concentration and reduce its effects. The quantification of carbon stocks through Remote Sensing is an accurate and conservative way of knowing the real state of forests and directing public policies for forest conservation. The present work aimed to quantify the forest carbon stocks of the Maranhão Amazon for the year 2019 through data and remote sensing techniques, using QGIS software and the Google Earth Engine platform, from vegetation canopy height data, forest mature solid ground forest, secondary solid ground forest, mangrove forests and delimitation of legally protected areas. Using the method proposed by Longo et al. (2016), the first processing step involved the production of a map of carbon stocks for the Maranhão Amazon. After the production of the map of carbon stocks for the Amazon of Maranhão, this map was superimposed on the forest maps and delimitation of legally protected areas for the purpose of quantification and comparisons. Our remote sensing approach revealed that in 2019, Amazon forests in Maranhão stored around 279 million tons of CO₂ in their biomass. Of the amount of CO₂ stocks, 78% were in mature forests, 17% in secondary growth forests and 5% in mangrove forests. The largest carbon stocks were in integral protection conservation units, both in degraded and non-degraded forests, and the smallest in non-protected areas. Forest stocks in non-protected areas are between two and four times smaller compared to protected areas.

Keywords: Carbon Stock; Forest; Maranhão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da Área de Estudo	19
Figura 2 - Mapa de estoques de carbono (a) e de CO ₂ (b) para a Amazonia Maranhense	21
Figura 3 - Distribuição por diferentes compartimento e tipos de florestas dos estoques de CO ₂ na Amazonia	22
Figura 4 - Comparação da densidade dos estoques de carbono para diferentes tipos de florestas em diferentes compartimentos na Amazonia Maranhense	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1	Sensoriamento Remoto	11
2.2	Google Earth Engine	12
2.3	Satélite Landsat	12
2.4	Vegetação e os Sensores Remotos	13
2.5	Estoque de Carbono	14
2.6	Métodos de Estimativa de Carbono	15
2.6.1	Métodos Direto	15
2.6.2	Método Indireto	15
2.7	Ciclo do Carbono	16
3	OBJETIVOS	18
3.1	Objetivo Geral	18
3.2	Objetivos Específicos	18
4	MATERIAL E MÉTODO	19
4.1	Área de Estudo	19
4.2	Conjunto de Dados	20
4.3	Processamento dos Dados	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
6	CONCLUSÃO	26
	REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

O carbono é fundamental para a manutenção da vida na Terra, a sua propriedade de formar até 4 ligações covalentes possibilita participar como elemento estrutural dos compostos essenciais (proteínas, carboidratos, lipídeos, pigmentos etc.). Além disso, é responsável por não permitir o planeta congelar, logo que o efeito estufa gerado pelas concentrações dos gases dióxido de carbono (CO₂) e de metano (CH₄), na atmosfera, conserva a temperatura em que vivemos (SOUZA *et al.*, 2006). Com a produção em escala industrial, iniciada no fim do século XVIII, houve emissões de gases de efeito estufa (GEE) em escala capaz de provocar mudanças climáticas, associada também com queimadas, desmatamento e decomposição de lixo, fez com que as décadas de 1990 e 2000 fossem as mais quentes do milênio (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2021).

No Brasil, conforme o segundo inventário de emissões dos gases causadores de efeito estufa do Brasil (BRASIL, 2010), o desmatamento junto com a agropecuária possui as maiores emissões de GEE. Por outro lado, a grande extensão do bioma amazônico impacta no controle das mudanças climáticas globais, seja pela capacidade de emitir gases do efeito estufa para a atmosfera, por queimadas ou desmatamentos, ou por absorver carbono da atmosfera por meio do crescimento e povoamento de espécie vegetais.

Acrescenta-se que a floresta amazônica nas suas muitas relações entre elementos bióticos e abióticos, acumula uma gama de ecossistemas complexos e de equilíbrio ecológico tênue dentro da maior biodiversidade vegetal natural já encontrada (OLIVEIRA; AMARAL, 2004). O uso não sustentável da floresta Amazônica é caracterizado pela perda da cobertura vegetal e sua diversidade, antes mesmo que se tenha o conhecimento pleno dessa riqueza (SOUZA *et al.*, 2006). O conhecimento da dinâmica e riqueza biológica amazônica é necessário para desenvolver ações de manejo, conservação e restauração deste bioma.

O Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2007) mostrou que na área florestal, podem ser realizadas quatro atividades para reduzir o impacto das mudanças climáticas: manejo florestal, redução do desmatamento, sendo essas duas opções com maior efeito em curto prazo e florestamento e reflorestamento, com efeitos a longo prazo.

Segundo Santos (1996), o manejo de áreas florestais quando feito de maneira adequada promove dois benefícios para que a área seja uma sequestradora de carbono, há estocagem de carbono quando o gás atmosférico é transformado em madeira e o segundo é evitar emissão de carbono por meio de desmatamento e queimadas.

Estudos mostram a área de floresta, ou como fonte, ou como sumidouro de carbono. Durante a fotossíntese o excesso de carbono é estocado na forma de biomassa (MALHI *et al.*,

1998; PHILLIPS *et al.*, 1998; NOBRE *et al.*, 2001), porém a diminuição da produtividade florestal e aumento de mortalidade decorrentes de mudanças climáticas (CLARK, 2004), ou devido ao desmatamento, tornam a floresta fonte de carbono para a atmosfera. (FEARNSIDE 1997; HOUGHTON *et al.*, 2000).

As florestas da Amazônia maranhense sofreram durante décadas com o desmatamento predatório que levou à uma redução de 76% da sua cobertura original (SILVA JUNIOR *et al.*, 2020). Além do desmatamento, a região é impactada por degradação florestal (incêndios florestais e extração seletiva de madeira), que pode levar à redução dos estoques de carbono dessas florestas (SILVA JUNIOR *et al.*, 2020). Além disso, extensas áreas de florestas secundárias cresceram nas áreas anteriormente desmatadas e foram abandonadas (SILVA JUNIOR *et al.*, 2020).

Dessa forma, quantificar o estoque de carbono no Bioma Amazônia no estado do Maranhão é de suma importância para conhecer a quantidade de carbono presente, o seu estado de conservação e estabelecer a sua relevância para o estado, através da valoração. Portanto, a partir do conhecimento a ser gerado, políticas públicas adequadas podem ser propostas. Diante do exposto o objetivo principal deste trabalho foi quantificar os estoques de carbono florestal da Amazônia maranhense no ano de 2019 através de dados e técnicas de sensoriamento remoto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sensoriamento Remoto

As tecnologias que fazem o processamento e análise de dados com referência geográfica são denominadas Geotecnologias. Com aplicabilidade na gestão territorial, as geotecnologias elevam a produtividade rural e provocam melhoria de custo-benefício. O Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) são exemplos de Geotecnologias (ROSA, 2005).

O Sensoriamento Remoto observa a superfície a partir das respostas de seus elementos presentes a uma radiação eletromagnética. É uma técnica que utiliza de forma conjunta, sensores e equipamentos para processamento e transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas. Tem a finalidade de estudar fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e das substâncias que a compõem sua superfície em suas mais diversas manifestações (NOVO, 2010). Dessa forma, imagens e outros dados de superfície são capturados através dos diversos sensores acoplados em diferentes plataformas, ampliando a percepção humana, oferecendo imagens de qualidade e o seu histórico de área, com alvos facilmente identificados devido ao tratamento digital oferecido pelos sensores. (FLORENZANO, 2011).

Para Lü (2019), o Sensoriamento Remoto ganhou maior amplitude em suas análises com o avanço das tecnologias da informação e dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG). Fitz (2008), conceitua o SIG como um conjunto de softwares que integram dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecidas.

Denomina-se cobertura do solo todos os elementos que estão acima do solo, de vegetação nativas a edificações antrópicas. (DUHAMEL, 2011). Apesar de apresentar efeitos negativos, alterações na cobertura nativas são necessárias para o desenvolvimento econômico e social (TORRES, 2011). Neste cenário, o estudo das alterações do uso do solo tem por objetivo guiar políticas sócio ambientais para mitigar os impactos causados pela modificação da cobertura. (ARAÚJO FILHO; MENESES; SANO, 2007).

A obtenção de informações detalhadas e precisas sobre o espaço geográfico é uma condição necessária para as atividades de planejamento e tomada de decisões. Os mapas de uso e cobertura da terra são instrumentos que se constituem em mecanismos adequados para

promoverem o desenvolvimento sustentável e são imprescindíveis para o planejamento regional ou local do espaço geográfico (ARAÚJO FILHO; MENESES; SANO, 2007).

2.2 Google Earth Engine

A plataforma Google Earth Engine é baseada em nuvem para processamento computacional de dados geoespaciais em grande escala. Esta plataforma consiste em um catálogo de vários petabytes de dados acessível gratuitamente que incluem todo o catálogo Landsat (USGS/NASA), vários conjuntos de dados MODIS, dados das missões Sentinel 1 a 5, dados de precipitação, temperatura do ar e mar, dados climáticos e dados de elevação do terreno (GOOGLE EARTH ENGINE, 2020). A capacidade de processamento, a alta disponibilidade de dados, e a gratuidade de acesso contrapõe os conceitos expostos por Kumar *et al.* (2005), que afirma que o processamento de grandes áreas é oneroso por exigir grande volume de dados e capacidade de processamento, limitando o uso de dados de alta resolução espacial a pequenas áreas.

A Interface de Programação de Aplicação (API, sigla em inglês) da plataforma do Google Earth Engine é acessada através de navegadores web em um Ambiente de Desenvolvimento Interativo (IDE, sigla em inglês), que proporciona ao usuário desenvolver protótipos e obter resultados, mesmo sem o conhecimento de programação web ou desenvolvimento de software. Esta plataforma apresenta vasto catálogo de dados geoespaciais atualizados, recursos computacionais robustos, dados socioambientais como desmatamentos, secas, desastres, doenças, segurança alimentar, gestão de água, monitoramento do clima e proteção ambiental. (GORELICK *et al.*, 2017). O projeto MapBiomas que tem abrangência nacional, já utiliza a plataforma do Google Earth Engine, gerando uma série histórica de mapas de uso e cobertura de solo (MAPBIOMAS, 2020), mostrando-se uma ferramenta valiosa para identificar potencialidades e fragilidades ambientais.

A plataforma do Google Earth Engine, para o processamento de informações geoespaciais na nuvem, é o que se tem de ponta tecnológica (GOOGLE INC., 2016). O uso dessa ferramenta permite analisar longas séries temporais em pouco tempo, processando Gigabites de dados em tempo quase real, disponibilizando aos usuários a estrutura de processamento dos seus servidores. (BOURSCHEIDT, 2017)

2.3 Satélite Landsat

O programa de imagens Landsat é de origem Norte Americana, se iniciou na segunda metade da década de 60, a partir de um projeto desenvolvido pela Administração

Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), observando exclusivamente recursos naturais terrestres. Inicialmente denominado ERTS (Earth Resources Technology Satellite) e, posteriormente, em 1975 passou a se denominar LANDSAT. Foi o primeiro satélite de sensoriamento remoto no mundo, equipado com duas câmeras RBV e MSS. Ele operou por cinco anos, registrando 300.000 imagens de séries da cobertura de todo o planeta Terra (INPE,2022).

Desde o ano de seu lançamento, foram lançados 8 satélites da série, todos utilizam o princípio de imagem multiespectral. INPE disponibiliza em seus catálogos imagens do Multiespectral Scanner Sensor (MSS) com 80m de resolução espacial, para os satélites LANDSAT 1,2 e 3 (1972-1992); do sensor Thematic Mapper (TM) de 30m resolução espacial, nos satélites LANDSAT-5 (1984-2011), e o sensor LANDSAT Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +) de 15 a 30 m de resolução, no satélite LANDSAT-7 (desde 1999) e; do sensor OLI (Operational Terra Imager) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) 15 a 30 metros de dados multiespectrais do LANDSAT-8 (Desde 2013) (INPE, 2022). As imagens destes satélites estão entre as mais trabalhadas no sensoriamento remoto.

2.4 Vegetação e os Sensores Remotos

Para Melo (2016) a vegetação por refletir a luz se torna passível de ser captadas por sensores remotos, por isso, entender como ocorre a interação da vegetação com o fluxo de radiação é necessário para estimar o quantitativo de biomassa e carbono acima do solo.

Os pigmentos presentes na clorofila “a” e “b” tem o comprimento de onda respectivamente de 680 nm e 480 nm. Eles são responsáveis por refletir a maior parte da radiação solar que incide sobre o dossel das plantas. Sendo assim, a estrutura foliar é responsável por interagir com essa radiação eletromagnética-REM (MOREIRA, 2012).

Absorção da radiação incidente pelos pigmentos da planta nos comprimentos de onda 0,48 μ m (carotenoides) e 0,62 μ m (clorofila), proporciona um acréscimo no coeficiente de reflectância em 0,56 μ m, gerando a cor verde da vegetação. (ASSUNÇÃO; FORMAGGIO, 1989)

Assunção e Formaggio (1989), afirma que os pigmentos dos cloroplastos que as folhas possuem dominam a assinatura espectral na região do visível (04 μ m a 0,7 μ m). Myneni *et al.* (1995) explica que por meio dessa assinatura espectral da vegetação é possível definir qual fase de desenvolvimento encontra-se a vegetação e fazer uma estimativa da quantidade de gás carbônico retirada da atmosfera.

2.5 Estoques de Carbono

Watzlawick *et al.* (2002) apontou uma variação positiva na temperatura atmosférica de 1,5°C a 4,5°C até o ano 2050, o que afetará processos de crescimento e desenvolvimento das plantas e o desenvolvimento de povoamentos florestais. Campos (2001), relaciona a concentração de dióxido de carbono (CO₂) com a temperatura da atmosfera, aumentando a preocupação de que o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera provoque mudanças climáticas, como alterações dos ciclos hidrológicos em nível regional, intensificando a ocorrência de eventos extremos (tornados, ressacas). O IPCC (2001) mostrou que os impactos gerados pela alteração na temperatura extrapolarão a área ambiental e atingirão negativamente a economia e o equilíbrio social em escala global.

Para mitigar esses impactos a forma mais atrativa é o sequestro de carbono pelas florestas, já que reduzir a queima de combustível fóssil significa retração econômica para países desenvolvidos, e a abertura de fronteiras dificilmente deixarão de acontecer, o plantio de florestas se torna uma alternativa atrativa economicamente, desde que seja ambientalmente correta. (SOARES; LEITE; GORGENS, 2005). Para Smith, Heath e Woodbury (2004) a importância do sequestro de carbono está na validação de uma floresta como recurso natural, assim como também na relação entre mudanças climáticas e o acúmulo de GEE, pois as florestas removem o dióxido de carbono, estocando-o organicamente.

As florestas são os maiores acumuladores de biomassa, por isso a sociedade civil organizada e a mídia buscam com insistência a geração de informações e conhecimentos florestais que contribuam na redução dos riscos ambientais. Dentre essas informações, a biomassa se destaca pois precisa ser estimada de forma confiável, caso contrário não haverá consistência na quantificação do carbono fixado nos ecossistemas florestais (SANQUETTA, 2002). Wang *et al.* (1995) reforça dizendo que o estoque de carbono nas florestas é um ponto chave para conhecer a sua relação com a atmosfera e um dado essencial na estimativa da absorção e emissão desse elemento por esses ambientes.

Higuchi e Carvalho Jr. (1994) nos mostra que a concentração de carbono da biomassa está em torno de 48%, valor este que está dentro dos limites de concentrações em florestas tropicais (entre 46 e 52%). Dessa forma, Higuchi *et al.* (2004) fez a estimativa do estoque de carbono através do produto da biomassa florestal pela concentração de carbono. Segundo Schneider *et al.* (2004), a variação desse teor de carbono é existente, porém com pouca variação.

Estimar a biomassa acima do nível do solo e obter as estimativas confiáveis de taxas de desmatamento e de estoques de carbono da são fatores fundamentais para quantificar o estoque e a emissão dentro de uma área em um determinado tempo. (HIGUCHI *et al.*, 2004).

2.6 Métodos de Estimativa de Carbono

2.6.1 Método Direto

Higuchi e Carvalho Júnior (1994), nos mostraram duas formas para quantificação de biomassa florestal, podendo ocorrer por métodos diretos (ou determinação) e métodos indiretos (ou estimativas). Métodos diretos ou Determinação a medição real é feita diretamente na biomassa, processo em que temos a derrubada e retirada de todas as árvores de uma parcela, feitas as aferições necessárias e depois ocorre a extrapolação para toda a área avaliada. Cassol (2013), afirmou que esse processo demanda tempo e é oneroso, motivo pelo qual deve ser mais bem avaliado em sua aplicação.

2.6.2 Método Indireto

A estimativa de biomassa aérea pelo método indireto consiste em correlacioná-la com alguma variável de fácil obtenção e que não requeira a destruição do material vegetal. As estimativas do método indireto provem de dados de inventários florestais, ou imagens de Sensoriamento Remoto utilizando-se uma base de dados em um sistema de informação geográfica (GIS), e aplicando modelos matemáticos a esses dados. (HIGUCHI; CARVALHO JÚNIOR, 1994). O sensoriamento remoto se utiliza de técnicas efetivas na análise da cobertura vegetal, que monitoram as contínuas mudanças no crescimento, acúmulo de biomassa e carbono dentro de ecossistema florestal. (HENTZ *et al.*, 2014). Para Matos e Kirchner (2008) o sensoriamento remoto aparece como protagonista na quantificação das áreas e na estimativa indireta de biomassa.

Por meio das técnicas de sensoriamento remoto é possível estimar pelas propriedades espectrais dos componentes da vegetação (troncos, galhos, folhas etc.), quantidade de biomassa, carbono e volume de madeira, o que promove a ampla utilização na área florestal. Para florestas heterogêneas com diversidade florística e de fisionomia essa técnica se torna mais complexa. Cenário diverso encontrado em florestas implantadas, devido, geralmente, apresentar homogeneidade e serem inventariadas periodicamente, esse trabalho com Sensoriamento Remoto se torna mais fácil e confiável (SOUZA; PONZONI, 1998). Para Silveira (2008), para fazer as estimativas de biomassa com o uso de Sensoriamento Remoto

deve-se ter uma ampla base de dados e mapas digitais de inventário, população, clima, vegetação, solos e de topografia.

A estimativa da biomassa por meio de sensores remotos aparece como alternativa interessante, já que apresenta facilidade da aplicação, custos reduzidos e menos tempo desperdiçado com inventários florestais (LE MAIRE *et al.*, 2011). Watzlawick, Kirchner e Sanquetta (2009) atribuem ao aprimoramento no processamento das imagens a recorrente utilização desses métodos para estudar a estrutura das florestas assim como sua biomassa e carbono estocado.

Melo (2016, p.17), faz uma análise da estimativa indireta da seguinte forma:

(...) Estimar biomassa de forma indireta significa um avanço sem precedentes, uma vez que o habitat permanece intacto, sem sequer possuir interferência humana. Apenas conhecendo-se dados presentes na vegetação, a partir de instrumentos que os coletam à distância, é possível realizar estimativas cada vez mais precisas, com margens de erros mais reduzidas

2.7 Ciclo do Carbono

A biogeoquímica integra biologia, geologia e química com o objetivo de entender mecanismo dos elementos na natureza (SCHLESINGER; BERNHARDT, 2013). Ciclos biogeoquímicos são processos naturais que reciclam diversos elementos químicos do meio ambiente para os organismos, e o movimento contrário, dos organismos para o meio ambiente (KHAN ACADEMY, 2021).

Os ciclos possuem uma grande quantidade de matéria e energia nos seus processos e isso se torna fundamental para a manutenção da vida. Compreender cada ciclo separadamente junto com as atividades antropomórficas torna-se vital, já que isso tem impactado na dinâmica química da Terra ocasionando mudanças para a própria humanidade (ODUM; BARRETT, 2007; SCHLESINGER; BERNHARDT, 2013).

Há quatro depósitos de carbono: oceanos, atmosfera, formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral e ecossistemas terrestre. Na atmosfera encontra-se o dióxido de carbono (CO₂), um gás que, nas condições naturais de temperatura e pressão é inodoro e incolor. (DIAS FILHO, 2006). O dióxido de carbono (CO₂) atmosférico origina-se das reações químicas que ocorrem nos oceanos, da respiração e decomposição de animais e vegetais e da queima dos resíduos orgânicos (ROSENDO; ROSA, 2012). Removido da atmosfera pela fotossíntese, o carbono do CO₂ incorpora-se aos seres vivos por meio compostos orgânicos, que fornecerão energia aos seres vivos e se transformarão em biomassa (ROSA *et al.*, 2013). Todo o Carbono dessa biomassa ou voltará a atmosfera pela sua decomposição na forma de por exemplo CO₂ e CH₄, ou se transformará em combustível fóssil. A queima desses combustíveis

devolve carbono para atmosfera na forma de CO_2 (BLEI, 2006). A biomassa serve de alimento para os animais herbívoros e carnívoros que depois de mortos, tanto os animais quanto os vegetais sofrem a ação dos decompositores (HALL, 1989; FRIEDLINGSTEIN, 2006).

Na camada sólida da Terra o carbono se movimenta entre rochas, minerais, águas interiores e sedimentos marinhos, interagindo com a atmosfera (FRIEDLINGSTEIN, 2006). Processos como vulcanismo, desgaseificação de magma formado na crosta e no manto, podem devolver o carbono das rochas para a atmosfera (KHALIL; RASMUSSEN, 1989). O CO_2 atmosférico reage com a água pluviais formando ácido carbônico (H_2CO_3), contribuindo para a erosão de rochas silicatas, liberando mais H_2CO_3 e cálcio que é levado aos oceanos proporcionando aos organismos marinhos material para conchas carbonadas, que podem se acumular ao fim da vida desses organismos e ao serem levadas para uma região que proporcione temperatura adequada ou pressão, podem liberar CO_2 para atmosfera. (KHALIL; RASMUSSEN, 1989; BLEI, 2006).

A queima de combustíveis fósseis e a produção de cimento liberaram 5,5 Giga toneladas (Gt) de carbono por ano, elevando sua concentração na atmosfera, das quais 3,3 Gt não são absorvidas pelos ecossistemas terrestres (BAIRD, 2002).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Quantificar os estoques de carbono florestal da Amazônia maranhense para o ano de 2019 através de dados e técnicas de sensoriamento remoto.

3.2 Objetivos Específicos

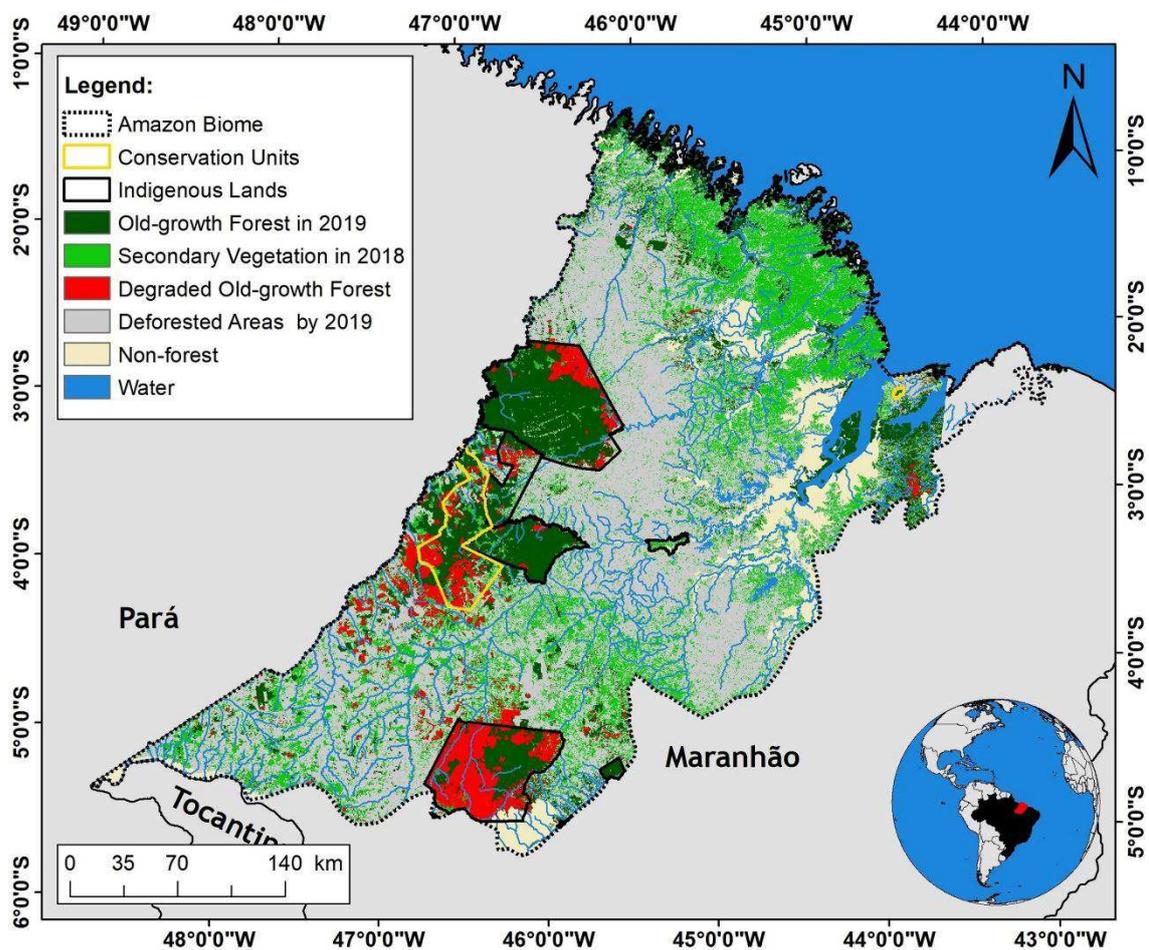
- a) Quantificar e comparar os estoques de carbono em florestas maduras de terra firme, florestas secundarias de terra firme e florestas de mangue;
- b) Comparar os estoques de carbono em florestas maduras de terra firme entre unidades de conservação, terras indígenas, e áreas não protegidas;
- c) Avaliar o impacto da degradação nos estoques de carbono das florestas maduras de terra firme.

4 MATERIAL E MÉTODO

4.1 Área de Estudo

A Amazônia no estado do Maranhão ocupa cerca de 34% do território, o equivalente a 81.208 km², engloba 62 municípios do estado, um prolongamento que parte do Rio Gurupi, nas cidades de Carutapera chega em São Luís, passa por Santa Inês, Formosa da Barra Negra e alcança a cidade Carolina (MARANHÃO, 2021). Além disso, a região possui em média 570 árvores por hectare de pelo menos 100 espécies da flora nacional já foram catalogadas mais de 109 espécies de peixes, 124 de mamíferos e 503 de aves (MARANHÃO, 2021).

Figura 1 - Localização da Área de Estudo



Fonte: Silva Junior *et al.* (2020)

4.2 Conjunto de Dados

Para atingir os objetivos propostos, o presente trabalho utilizou dados de sensoriamento remoto recém-lançados e disponíveis livremente. Os dados contaram de: altura do dossel da vegetação, floresta de terra firme madura, floresta de terra firme secundária, florestas de mangue e delimitação de áreas legalmente protegidas.

Dado de altura do dossel da vegetação: trata-se de um mapa de altura da vegetação em 30 metros de resolução espacial, desenvolvido por Potapov et al. (2021) através da integração de dados do *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI/NASA) e imagens do satélite Landsat-8. O GEDI da NASA é um instrumento de Lidar (Light Detection And Ranging) espacial que opera a bordo da Estação Espacial Internacional desde abril de 2019.

Dados de floresta de terra firme madura e mangue: os mapas com resolução espacial de 30 metros serão obtidos a partir do mapeamento feito pelo Projeto MapBiomass Brasil (MAPBIOMAS, 2020). Para garantir que somente as áreas de floresta madura de terra firme sejam consideradas, as áreas de floresta secundárias foram excluídas.

Dado de florestas secundária: o mapa da extensão total de floresta secundária na resolução espacial de 30 metros será obtida do trabalho desenvolvido por Silva Junior *et al.* (2020b).

Dados de degradação florestal: os mapas de degradação florestal (fogo e corte seletivo de madeira) foram obtidos a partir do trabalho de Silva Junior *et al.* (2020). A partir desse mesmo trabalho, foram obtidas as delimitações das unidades de conservação e terras indígenas localizadas na área de estudo. Além disso, foram acrescentadas as florestas degradadas por fogo a partir dos dados gerados pelo projeto MapBiomass Fogo (MAPBIOMAS, 2020).

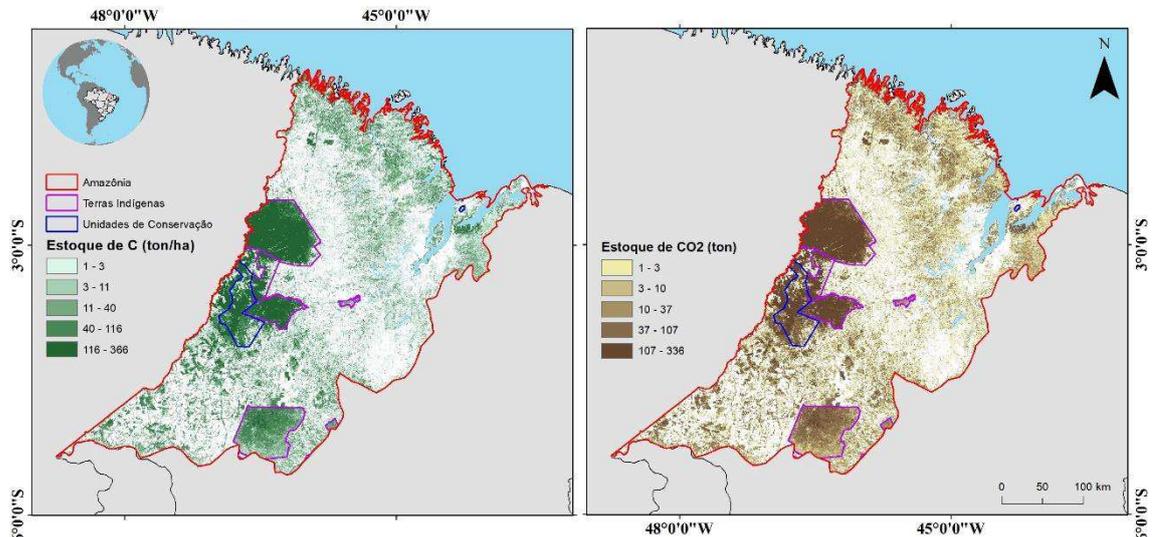
4.3 Processamento dos Dados

Os dados listados anteriormente foram coletados e armazenados em um banco de dados georreferenciado para serem posteriormente manipulados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foram adotados o software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017) e a plataforma Google Earth Engine – GEE (GORELICK *et al.*, 2017).

A primeira etapa de processamento contou com a produção do mapa de estoques de carbono para a Amazônia maranhense. Para isso, foi utilizado o método proposto por Longo *et al.* (2016). Para atender a esse método, o mapa de altura da vegetação foi reamostrado da resolução espacial original em 30 metros para uma resolução de 50 metros, utilizando-se a média dos valores dos pixels originais (Figura 2); em seguida foi aplicada a Equação 1

utilizando a calculadora raster do software QGIS. Quantificamos também o carbono em termos de CO₂ total em cada pixel; consideramos que cada tonelada de carbono equivale a 3,667 toneladas de CO₂ (ARAGÃO *et al.*, 2018) (Figura 2).

Figura 2 - Mapa de estoques de carbono (a) e de CO₂ (b) para a Amazonia Maranhense



Fonte: O autor (2022)

Equação 1:

$$C_{estoque} = 10 \cdot 0,025 \cdot AV_{50m}^{1,99}$$

Onde, $C_{estoque}$ e o estoque de carbono para cada pixel dado em toneladas de carbono por hectare (ton ha^{-1}), 10 e o fator para converter os estoques de kg m^{-2} para ton ha^{-1} e AV_{50m} e o valor da altura da vegetação em cada pixel com resolução de 50 metros. A equação tem um R² ajustado de 0,68 e um erro médio quadrático de 4.33 kg C m^{-2} .

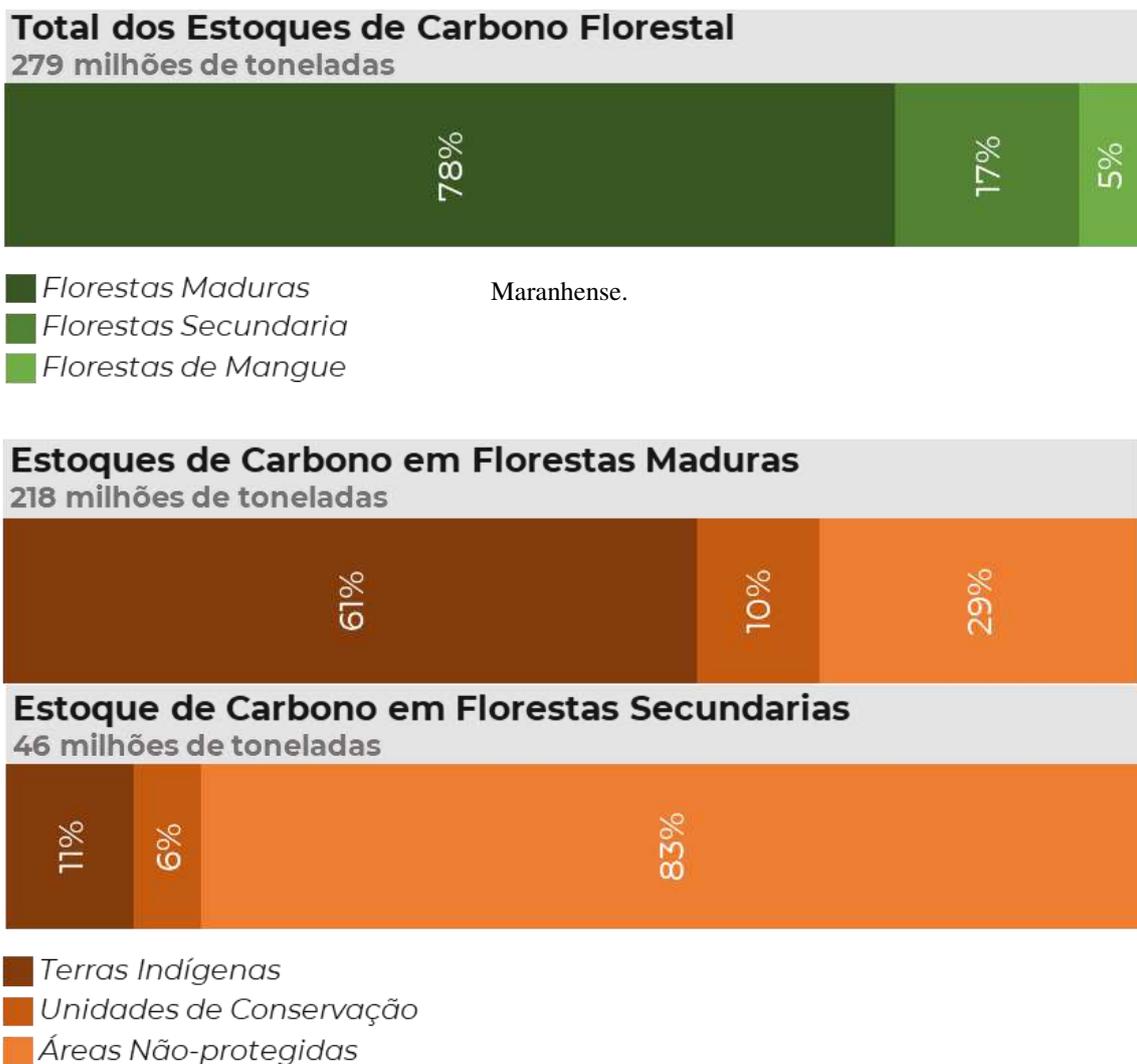
Após a produção do mapa dos estoques de carbono para a Amazônia maranhense, esse mapa foi sobreposto os mapas de floresta e delimitação das áreas legalmente protegidas para fim de quantificação e comparações. Testes estatísticos não paramétricos (nível de significância de 95%) foram utilizados para comparar os estoques de carbono no software R (R CORE TEAM, 2020). Para a comparação de dois grupos, adotamos o teste de *Wilcoxon* e para três grupos o teste de *Kruskal-Wallis* (HETTMANSPERGER; MCKEAN, 2010).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nossa abordagem de sensoriamento remoto revelou que em 2019, as florestas da Amazonia Maranhense estocavam cerca de 279 milhões de toneladas de CO₂ em sua biomassa (Figura 3); o valor equivale a aproximadamente 10% das emissões de CO₂ no estado do Maranhão para o período de 1990 a 2016 considerando o setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (BRASIL, 2022). Do montante de estoques de CO₂, 78% estavam em florestas maduras, 17% em florestas de crescimento secundário e 5% em florestas de mangue (Figura 3).

Figura 3 - Distribuição por diferentes compartimento e tipos de florestas dos estoques de CO₂ na Amazonia

Estoques de Carbono na Amazônia Maranhense



Fonte: O autor (2022)

Focando nas florestas de terra firme e na estrutura de unidades de conservação de proteção integral do estado do Maranhão, descobrimos contrastes na distribuição dos estoques de CO₂ em florestas maduras e secundárias. Primeiramente, descobrimos que os estoques das florestas secundárias (46 milhões de toneladas) em 2019 eram o equivalente a aproximadamente 21% dos estoques das florestas maduras (218 milhões de toneladas). Enquanto 71% os estoques das florestas maduras estão em áreas protegidas (61% em terras indígenas e 10 em unidades de conservação de proteção integral), 83% dos estoques das florestas secundárias estão em áreas não protegidas. Esse fato é relevância do ponto de vista de políticas públicas; proteger as florestas secundárias (HEINRICH *et al.*, 2021; SILVA JUNIOR *et al.*, 2020) e uma solução baseada na natureza eficaz para manter estocado o CO₂ sequestrado provenientes das emissões atmosféricas históricas (SILVA JUNIOR *et al.*, 2020).

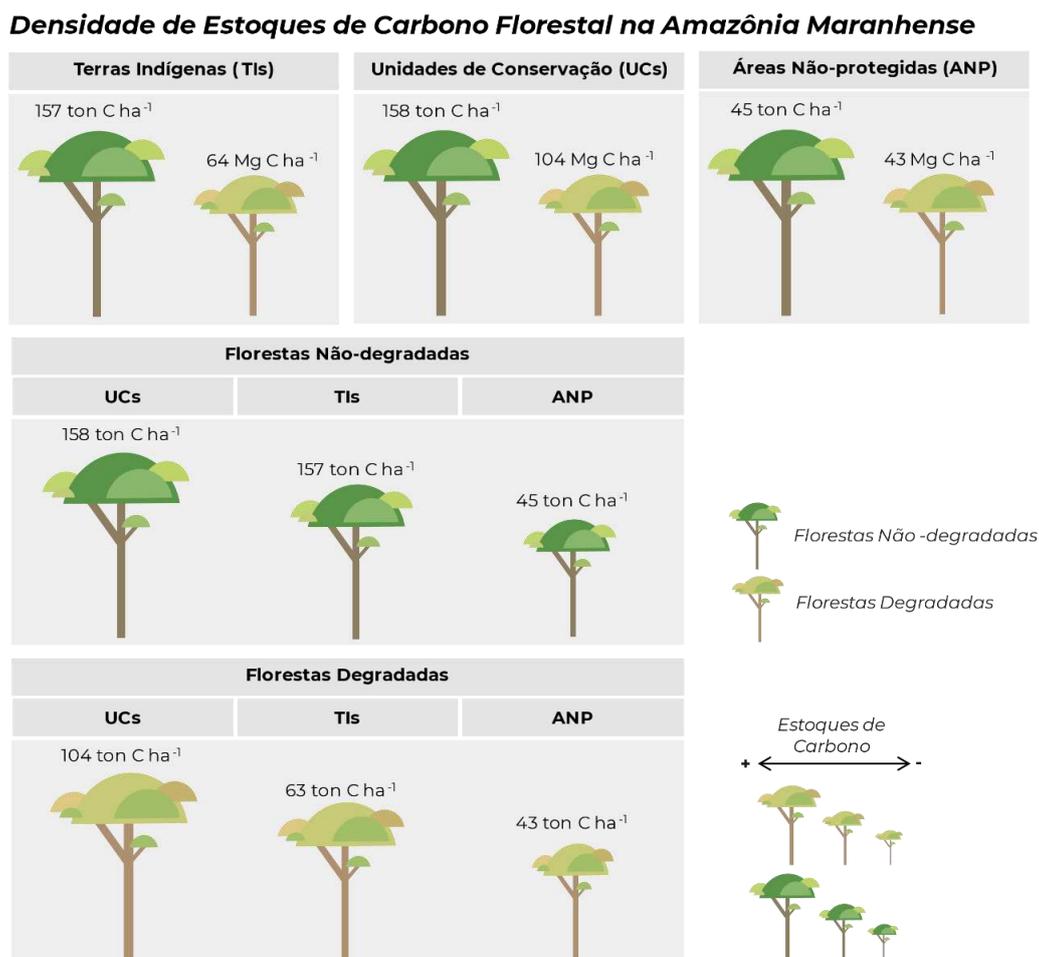
Para quantificar em termos econômicos a importância de se manter em pé e restaurar os ecossistemas florestais da Amazonia Maranhense, nós estimamos o valor dessas florestas em termos de Custo Social do Carbono - CSC (RICKE *et al.*, 2018). Nós encontramos que as florestas em pé no ano de 2019 teriam um valor médio de 19,19 bilhões de dólares para as florestas maduras, 4,03 bilhões de dólares para as florestas secundárias e 1,32 bilhões de dólares para as florestas de mangue, totalizando um montante de 24,54 bilhões de dólares.

No entanto, parte desse ativo está em perigo. Por exemplo, em 2019 as florestas maduras dentro de áreas protegidas (terras indígenas e unidades de conservação de proteção integral) estocavam o equivalente a 13,64 bilhões de dólares, enquanto as florestas secundárias fora de áreas protegidas estocavam o equivalente a 3,33 bilhões de dólares. Isso reforça a necessidade de proteger as florestas secundárias da Amazonia Maranhense para garantir o contínuo sequestro de CO₂ da atmosfera (HEINRICH *et al.*, 2021) e recuperação da biodiversidade (POORTER *et al.*, 2021). No estado do Maranhão, em especial, ainda não existe uma política pública direcionada a proteger as florestas secundárias; por outro lado, um retrocesso ambiental recente no estado pode causar a perda em massa dessas florestas. No final de 2019, a Assembleia Legislativa do Maranhão aprovou, em regime de urgência, a Lei nº 11.269 que instituiu o Zoneamento Econômico Ecológico do Bioma Amazônico do Estado do Maranhão (ZEE-MA); no entanto esse instrumento legal flexibiliza a área de reserva legal na região que pode passar de 80% para 50% de vegetação nativa protegida nas propriedades rurais, podendo levar a perda em larga escala de florestas secundárias (SILVA JUNIOR *et al.*, 2020).

Além de estar ameaçada pelo desmatamento legal e ilegal (SILVA JUNIOR *et al.*, 2022; SILVA JUNIOR *et al.*, 2020), a Amazônia Maranhense foi impactada durante décadas, negativamente e por diferentes distúrbios (incluindo fogo, corte seletivo e efeito de borda) que

levaram a degradação dos remanescentes de floresta madura da região (SILVA JUNIOR *et al.*, 2022; SILVA JUNIOR *et al.*, 2020). Através do teste de *Wilcoxon* nos encontramos que existiu uma diferença significativa (p -valor $< 0,01$) na densidade de estoques de carbono entre as florestas maduras degradadas e não-degradadas (em florestas maduras) independentemente de estarem em áreas protegidas ou não-protegidas (Figura 4). Nas terras indígenas, os estoques eram em média 59% menores em florestas degradadas (64 ton C ha^{-1}) em comparação as florestas não-degradadas ($157 \text{ ton C ha}^{-1}$); e em unidades de conservação de proteção integral, os estoques eram em média 34% menores em florestas degradadas ($104 \text{ ton C ha}^{-1}$) em comparação as florestas não-degradadas ($158 \text{ ton C ha}^{-1}$). Esse maior impacto sobre os estoques observados em terras indígenas é reflexo da pressão que essas áreas tem sofrido a décadas, principalmente no estado do Maranhão, incluindo incêndios florestais e corte seletivo de madeira (CELENTANO *et al.*, 2017, 2018).

Figura 4 - Comparação da densidade dos estoques de carbono para diferentes tipos de florestas em diferentes compartimentos na Amazonia Maranhense.



Fonte: O autor (2022)

O teste de *Kruskal-Wallis* mostrou que existia uma diferença significativa (p-valor < 0,01) entre os estoques de carbono de florestas maduras degradadas e não-degradadas quando comparadas entre si em áreas protegidas e não-protegidas. Os maiores estoques de carbono estavam em unidades de conservação de proteção integral, tanto em florestas degradadas quanto nas não-degradadas e os menores nas áreas não-protegidas. Embora, o teste de *Wilcoxon* tenha mostrado existir uma diferença significativa (p-valor < 0,01) entre os estoques de florestas degradadas e não-degradadas em áreas não protegidas, eles são entre dois e quatro vezes menores se comparados as áreas protegidas. Esse fato pode ser explicado pela alta fragmentação dos remanescentes florestais fora de áreas protegidas na região amazônica do estado do Maranhão (SILVA-JUNIOR *et al.*, 2022; VEDOVATO *et al.*, 2016). A fragmentação leva ao efeito de borda, incluindo o escape do fogo e alteração microclimática (LAURANCE *et al.*, 2018; SILVA JUNIOR *et al.*, 2022), que leva ao aumento da mortalidade de árvores (LAURANCE *et al.*, 2018; PONTES-LOPES *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2018) e consequentemente a redução dos estoques de carbono.

6 CONCLUSÃO

O método de estimativa indireta, por meio de sensoriamento remoto, utilizado nesse trabalho, se mostrou eficiente na quantificação dos estoques de carbono na Amazônia Maranhense, pois foi capaz de mostrar a distribuição e distribuição dos estoques de Carbono. Além de produzir mapas que ilustram a quantificação realizada.

O estoque de Carbono totalizou uma quantidade de 279 milhões de toneladas de CO₂ em sua biomassa, representando aproximadamente 10% das emissões de CO₂ no estado do Maranhão em 26 anos (1990 a 2016). Do montante de estoques de CO₂, 78% estavam em florestas maduras, 17% em florestas de crescimento secundário e 5% em florestas de mangue.

Se tratando de floresta de terra firme, observamos que 71% das florestas maduras estão em área protegida, e 83% de florestas secundárias estão em áreas não protegidas. Dados que nos mostram a importância de direcionar políticas públicas tanto para cuidar e manter as áreas protegidas, assim como para conservar a florestas secundárias presentes fora dessas áreas. Uma importância ignorada pelo poder público, já que se mostrou flexível a uma redução de área de florestas nativas dentro do propriedades rurais por meio da lei nº 11.269 que instituiu o Zoneamento Econômico Ecológico do Bioma Amazônico do Estado do Maranhão (ZEE-MA).

Incêndios e corte seletivo de madeira são os principais responsáveis pela diferença encontrada na densidade de concentração de carbono, tanto em áreas protegidas e áreas não protegidas.

O presente trabalho mostrou a floresta como um importante ativo econômico para o Estado do Maranhão, com um estoque de Carbono avaliado em 24,54 bilhões de dólares. O trabalho também revelou que as políticas públicas caminham em direção contrária a preservação desse ativo, já que aprovam leis que reduzem áreas florestais. A importância das áreas de preservação ficou evidente, necessitando de atenção na sua conservação e preservação.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 536, 2018. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s41467-017-02771-y>.
- ARAÚJO FILHO, M. da C.; MENESES, P. R.; SANO, E. E. Sistema de classificação de uso e cobertura da Terra na análise de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 2, n. 59, p. 171-179, 2007.
- ASSUNÇÃO, G. V.; FORMAGGIO, A. R. **O Sensoriamento remoto na agricultura: conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos: INPE, 1989. 217 p.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- BLEI, I. **General, Organic, and Biochemistry: connecting chemistry to your life**, 2. ed. Nova Iorque: W.H. Freenman and Company, 2006.
- BOURSCHEIDT, Vandoir. Análise de tendência da temperatura de superfície a partir de imagens Landsat 5: contribuições da plataforma Google Earth Engine. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos. **Anais...** Santos: INPE, 2017.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Sumário de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases de efeito estufa por gás**. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima. p. 139-152. 2010.
- BRASIL. Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações. **Painel de dados por Unidade Federativa do setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF)**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/painel-de-dados-por-uf-do-setor-lulucf>. Acesso em: 26 abr. 2022.
- CAMPOS, C. P. de. **A conservação das florestas no Brasil, mudança do clima e o mecanismo de desenvolvimento limpo no Protocolo de Quioto**. 169 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Estratégico) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- CASSOL, H. L. G. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista com uso dados ópticos de sensores remotos**. 2013. 143 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- CELENTANO, D. *et al.* Desmatamento, degradação e violência no “Mosaico Gurupi”: a região mais ameaçada da Amazônia. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 32, n. 92, 2018. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/0103-4014.20180021>.
- CELENTANO, D. *et al.* Towards zero deforestation and forest restoration in the Amazon region of Maranhão state, Brazil. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 68, p. 692–698, 2017. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264837717302296>.

CLARK, D. A. **Sources or sinks? The responses of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition.** The Royal Society, v. 359, n. 1443, 2004.

DIAS FILHO, Moacyr Bernardino. **A fotossíntese e o aquecimento global.** Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E), 2006.

DUHAMEL, C. Land use and land cover, including their classification. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS-UNESCO)**, v. 1, p. 1-9, 2011. Disponível em: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c19/E1-05-01-01.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2022.

FANG, J. Y.; WANG, Z. M. Forest biomass estimation at regional and global levels, with special adaptation, and vulnerability: contribution of working group II to the third assessment report of the reference to China's forest biomass. **Ecological Research**, Tsukuda, n. 16, p. 587-592, 2001.

FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. **Climatic Change**, v. 35, n. 3, p. 321 - 360, 1997.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

FRIEDLINGSTEIN, P. Climate-carbon cycle feedback analysis, results from the C4MIP model intercomparison. **J. Climate**, v. 19, p. 3337-3353, 2006.

GOOGLE EARTH ENGINE. **What is Earth Engine?** 2020. Disponível em: <https://earthengine.google.com/faq/>. Acesso em: 23 dez. 2020.

GOOGLE INC. **Google Earth Engine API.** 2016. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 202, p. 18–27, 2017. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425717302900>.

HALL, D. O. *et al.* Carbon flows in the biosphere: present and future. **Journal Of The Geological Society**, [s.l.], v. 146, n. 1, p.175-181, fev. 1989.

HEINRICH, V. H. A. *et al.* Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature Communications**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 1785, 2021. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s41467-021-22050-1>.

HENTZ, A. M. K. *et al.* Técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa em ambientes florestais. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 10, n.18, 2014.

HETTMANSPERGER, T. P.; MCKEAN, J. W. **Robust Nonparametric Statistical Methods.** 2. ed. [s. l.]: CRC Press, 2010.

HIGUCHI, Niro *et al.* Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 295-304, 2004.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JUNIOR., J. A fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂ – UMA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, **Anais...** Rio de Janeiro: CVRD. p. 125-153. 1994.

HOUGHTON, R. A. *et al.* Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, v. 403: 301 - 304, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2021. Disponível em: <http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>, acessado em: 24 set. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2022. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat>, Acesso em: 24 mar. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2001: impacts**, intergovernmental panel on climate change. 2001.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.** 2007

KHALIL, M. A. K.; RASMUSSEN, R. A. Climate-induced feedbacks for the global cycles of methane and nitrous oxide. **Tellus B**, v. 41, p. 554–559, 1989.

KHAN ACADEMY, 2021. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/Science/biology/ecology/biogeochemical-cycles/a/introduction-to-biogeochemical-cycles>, acessado em 24 set. 2021.

KURAMOTO, K.; T. M. Partitioning of H and C between the mantle and core during the core formation in the Earth: Its implications for the atmospheric evolution and redox state of early mantle. **J. Geophys. Res.**, v. 101, n. 14, p. 909-932, 1996.

LAURANCE, W. F. *et al.* An Amazonian rainforest and its fragments as a laboratory of global change. **Biological Reviews**, [s. l.], v. 93, n. 1, p. 223–247, 2018. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/brv.12343>.

LE MAIRE, G. *et al.* MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 10, p. 2613 - 2625, 2011.

LONGO, Marcos *et al.* Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 11, p. 1639-1660, 2016.

LU, G. Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective. **International Journal of Geographical Information Science**. v. 33, n. 2, p. 346-367, 2019.

MALHI, Y. *et al.* Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v. 103, p. 31593 - 31612, 1998.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. 2020. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 24 dez. 2020.

MARANHÃO. Secretaria de Turismo. **Amazônia Maranhense**. 2021. Disponível em: <https://www.turismo.ma.gov.br/amazonia-maranhense>. Acesso em: 20 nov. 2021.

MATOS, F. D. A.; KIRCHNER, F. F. Estimativa da floresta ombrófila densa de terra firme na Amazônia central com o satélite Ikonos II. **FLORESTA**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 157 - 171. 2008.

MELO, Carlos Antônio Avelar de. **Modelo para estimativa de biomassa de vegetação em áreas de manguezais por técnicas de sensoriamento remoto**. 2016. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

MOREIRA, M. A. de. **Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias da aplicação**. Viçosa: UFV, 2012.

MYNENI, R. B. *et al.* The interpretation of spectral vegetation indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 33, p. 481-486, 1995.

NOBRE, Carlos A. *et al.* Amazônia: fonte ou sumidouro de carbono. In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia**, Rio de Janeiro. 2001.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

ODUM, E. P.; BARRETT, G. W. **Fundamentos de Ecologia**. Tradução da 5. ed. norte-americana. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

OLIVEIRA, A. N.; AMARAL, I. L. Florística de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Revista Acta Amazônica**. v. 34, n.1, p. 21-34, 2004.

PHILLIPS, O. L. *et al.* Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. **Science**, v. 282, p. 439 - 442, 1998.

PONTES-LOPES, A. *et al.* Drought-driven wildfire impacts on structure and dynamics in a wet Central Amazonian forest. **The Royal Society**, [s. l.], v. 288, n. 1951, p. 20210094, 2021. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2021.0094>.

POORTER, L. *et al.* Multidimensional tropical forest recovery. **Science**, [s. l.], v. 374, n. 6573, p. 1370–1376, 2021.

POTAPOV, Peter *et al.* Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. **Remote Sensing of Environment**, v. 253, p. 112-165, 2021.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>.

R CORE TEAM. R. A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 22 jun. 2020.

RICKE, K. *et al.* Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 895–900, 2018. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s41558-018-0282-y>.

ROSA, R. Geotecnologias na Geografia Aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81-90, 2005.

ROSA, Rogério da Silva; MESSIAS, Rossine Amorim; AMBROZINI, Beatriz. **Importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável**. 2013

ROSENDO, J. S.; ROSA, R. Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de Cerrado. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 2, 359-376, 2012.

SANTOS, J. **Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

SCHNEIDER, P. R. *et al.* Método de derivação do volume em biomassa e carbono: uma aplicação em *Platanus x acerifolia* (AITON) WILD. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 3., Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, RS: UFSM, 2004.

SCHLESINGER, W. H.; BERNHARDT, E. S. **Biogeochemistry an Analysis of Global Change**. 3. ed. Kidlington, Elsevier, p. 665, 2013.

SILVA, C. V. J. *et al.* Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics. **The Royal Society**, [s. l.], v. 373, n. 1760, p. 20180043, 2018. Disponível em: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/lookup/doi/10.1098/rstb.2018.0043>.

SILVA JUNIOR, C. H. L. *et al.* Amazon forest on the edge of collapse in the Maranhão State, Brazil. **Land use policy**, v. 97, p. 104-806, 2020.

SILVA JUNIOR, C. H. L. *et al.* Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. **Scientific data**, v. 7, n. 1, p. 1-9, 2021.

SILVA JUNIOR, C. H. L. *et al.* Forest Fragmentation and Fires in the Eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil. **Fire**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 77, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/5/3/77>.

SILVA JUNIOR, Celso H. L. *et al.* Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. **Scientific Data**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 269, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3928660>. Acesso em: 8 jul. 2020.

SILVA JUNIOR, Celso H. L. *et al.* Amazon forest on the edge of collapse in the Maranhão State, Brazil. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 97, p. 104806, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264837720301071>.

SILVEIRA, Péricles *et al.* O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, 2008.

SMITH, J. E.; HEATH, L. H.; WOODBURY, P. B. How to estimate forest carbon for large areas from inventory data. **Journal of Forestry**. Washington, DC, p. 25-31, jul./aug., 2004.

SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; GORGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. i-f., out. 2005.

SOUZA, R. S. *et al.* Análise estrutural em Floresta Ombrófila Densa de terra firme não explorada, Amazônia Oriental. **Rev. Árvore**. v. 30, p. 75-87, 2006.

SOUZA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/LANDSAT para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de Pinus spp. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., Santos. **Anais...** Santos: INPE, 1998.

TORRES, D. R. **Análise Multitemporal do Uso da Terra e Cobertura Florestal com dados dos satélites Landsat e Alos**. 197p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. 2011,

VEDOVATO, L. B. *et al.* The extent of 2014 forest fragmentation in the Brazilian Amazon. **Regional Environmental Change**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 2485–2490, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10113-016-1067-3>.

WATZLAWICK, L. F. *et al.* O papel do sensoriamento remoto nos estudos de carbono. In: SANQUETA, C. R. *et al.* (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], p. 215-235. 2002.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com Araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.