



BIOTA SÍNTESE

Análise de mapeamento de biomassa e carbono
no estado de São Paulo

NOTA TÉCNICA

São Paulo, agosto de 2023

Nathália C.C. Nascimento, Rafael B. Chaves, Pedro H.S. Brancalion

Parceria:



Apoio:



Sumário

Apresentação	3
Do contexto.....	3
Nota Técnica	6
Análise de mapeamento de biomassa e carbono no estado de São Paulo.....	6
Introdução	6
Cenário Biomassa, Carbono e Carbono equivalente	7
Mapeamento de biomassa	9
Estimativa de potencial de estoque de carbono	11
Análises.....	12
Seleção de mapa.....	12
Análise de padrões espaciais	18
Mapeamento de potencial de estoque de biomassa acima do solo (AGB)	21
Análise multiescala	24
Análise por fitofisionomia.....	25
Análise por Classes de uso da terra	26
Análise por Unidade de Gestão de Recursos Hídricos (UGRHI).....	27
Limitações.....	33
Considerações finais.....	34
Referências	36

Como citar esta publicação:

Nascimento NCC; Chaves, RB; Brancalion, PHS. Análise de mapeamento de biomassa e carbono no estado de São Paulo. IEA e SEMIL: São Paulo, 2023.

Apresentação

Esta Nota Técnica apresenta os resultados preliminares do mapeamento da biomassa acima do solo e do potencial de aumento da biomassa no futuro no estado de São Paulo. O objetivo principal desta nota é auxiliar o governo do estado de São Paulo, parceiro institucional do projeto, a planejar ações estratégicas e o desenvolvimento de políticas públicas relacionadas ao carbono no estado. Isso envolve considerar tanto o potencial de sequestro e o estoque de carbono existente na biomassa atual do estado, quanto os possíveis ganhos de biomassa por meio de iniciativas de restauração de ecossistemas. Adicionalmente, a nota pretende informar a sociedade, de forma mais ampla, sobre a importância deste assunto, que vem ganhando maior atenção não só do poder público e das universidades, mas também da sociedade civil e do setor privado.

A nota foi elaborada em colaboração entre pesquisadores associados ao projeto Biota Síntese e representante da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo (SEMIL-SP). Trata-se de um levantamento e análise dos mapeamentos de biomassa existentes e utilizados por governos e pela comunidade científica em análises relacionadas ao carbono. Espera-se que esta nota contribua para alavancar iniciativas em diversas esferas de negociações sobre o carbono, além de embasar discussões e ações de restauração no estado de São Paulo. Isso, por sua vez, irá contribuir para o cumprimento das metas alinhadas com programas como o Refloresta-SP e o Plano de Ação Climática de SP.

Do contexto

Coordenação do Biota Síntese:

Jean Paul Metzger, Rafael B. Chaves, Gerd Sparovek, Carlos Alfredo Joly

Em julho de 2022, o projeto [Biota Síntese – Núcleo de Análise e Síntese de Soluções Baseadas na Natureza](#), financiado pela [FAPESP](#) e coordenado por USP em parceria com a SEMIL e em colaboração com diversas instituições, lançou o documento [“Contribuições ao Plano de Ação Climática do Estado de São Paulo \(PAC\)”](#). Trata-se de contribuições

vindas de um conjunto relevante de agentes públicos do estado de São Paulo, pesquisadores, representantes de instituições técnico-científicas e de instituições da sociedade civil, que se reuniram em sessões de síntese no Instituto de Estudos Avançados da USP no período de maio e junho de 2022.

O documento elencou sete prioridades estratégicas como recomendações para a consecução do PAC 2050, com repercussões no Programa Refloresta-SP da SEMIL e no Programa Agro Legal da SAA. Trata-se de diretrizes fundamentais para o efetivo atingimento da meta estadual de restaurar 1,5 milhão de hectares de vegetação nativa no território paulista.

- (i) **Estratégia 1.** Atuar de forma dinâmica e interdisciplinar na concepção e implementação das ações, valorizando tanto processos ambientais, quanto processos socioeconômicos, assim como os atores
- (ii) **Estratégia 2.** Fomentar a restauração com retorno econômico e cadeias comerciais de produtos de restauração.
- (iii) **Estratégia 3.** Fomentar o mercado de carbono e outros serviços ambientais.
- (iv) **Estratégia 4.** Otimizar a relação custo-benefício da restauração fomentando arranjos econômicos inovadores.
- (v) **Estratégia 5.** Adotar estratégias específicas de restauração obrigatória de pequenos, médios e grandes déficits alinhados ao perfil dos proprietários, à sua distribuição geográfica e aos benefícios ambientais.
- (vi) **Estratégia 6.** Engajar os municípios no compromisso pela restauração.
- (vii) **Estratégia 7.** Fomentar novas oportunidades de restauração com foco em adaptação climática em áreas periurbanas.

A **Estratégia 3** destacou três produtos cruciais, coproduzidos por agentes da academia e governo, com o objetivo de auxiliar o governo do estado de São Paulo a fomentar negociações sobre o carbono no estado: a) criar territórios certificados para a emissão de créditos de carbono; b) criar uma Vitrine Estadual de Carbono Certificado (Compradores

e Vendedores), juntando empresas que querem neutralizar seu carbono e fornecedores de carbono certificado da restauração ecológica; e c) Desenvolver mecanismo de certificação de carbono em escala estadual a partir da aplicação do art. 12 do Decreto do Refloresta-SP (66.650/2022).

Nesse contexto, uma etapa fundamental desse processo consiste no mapeamento de áreas que apresentam maior estoque atual de biomassa e de áreas com maior potencial de ganho de biomassa ao longo do tempo. Tal mapeamento pode nortear o governo na identificação de remanescentes de vegetação nativa que podem ter sua conservação intensificada através do suporte financeiro obtido pela negociação de estoque de carbono. De mesmo modo, áreas com grande potencial para incremento da estocagem de carbono podem receber iniciativas de restauração florestal, visando não apenas o carbono mas também a provisão de outros serviços ecossistêmicos, resultando em ganhos ecológicos e econômicos para toda a sociedade.

Nota Técnica

Análise de mapeamento de biomassa e carbono no estado de São Paulo

Nathália C. C. Nascimento (Pós doutorando – IEA/USP)

Desenvolvimento da nota técnica e levantamento, análise e mapeamento de dados

Rafael B. Chaves (SEMIL – SP)

Desenvolvimento e revisão da nota técnica

Pedro H. S. Brancalion (ESALQ/USP)

Supervisão e desenvolvimento da nota técnica e análise metodológica

Introdução

A mudança no clima é uma realidade que tem afetado populações humanas em diversas partes do mundo (IPCC, 2018). Eventos climáticos extremos, como intensificação das tempestades e secas, ilhas de calor, quedas bruscas de temperatura e mudanças nos regimes de chuva têm impactado diversos setores da sociedade, especialmente o da produção de alimentos e a geração de energia (IPCC, 2022). Em 2015, com o objetivo de criar e fortalecer estratégias para limitar o aquecimento global a menos de 1,5° C acima dos níveis pré-industriais, países reunidos na Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP21) em Paris, assinaram um grande tratado onde se comprometeram a reduzir suas respectivas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e criar estratégias de mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças no clima. Como signatário do acordo, o Brasil estabeleceu como meta a redução de suas emissões de GEE em 37% até 2025 e 43% até 2030, tendo como referência as emissões do ano de 2005. O país também adotou como estratégia de mitigação das mudanças no clima a restauração de 12 milhões de hectares de florestas até 2030.

Nesse contexto, o estado de São Paulo desempenha um relevante papel como estado brasileiro que ocupa a quarta posição entre os estados com maior emissão de gases de

efeito estufa do país (SEEG, 2019). Mais da metade dessas emissões são oriundas do setor de produção de energia direcionada para o transporte de cargas e pessoas, produção de combustível e para as atividades industriais, conferindo ao estado de São Paulo não só a posição de potência em emissão de GEE, mas também a condição de estado suscetível aos efeitos das mudanças no clima. Por outro lado, o estado de São Paulo ainda detém mais de 2 milhões de hectares de florestas remanescentes (SOSMA & INPE, 2021) e se comprometeu com a restauração de ecossistemas em 1,5 milhão de hectares a serem monitoradas pelo programa Reflorestas. Tal compromisso sinaliza a inserção do estado em relevantes estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, valendo-se de mecanismos associados ao mercado de carbono.

Com o objetivo de fornecer subsídios à discussão no âmbito do governo do estado de São Paulo acerca das potencialidades de armazenamento e sequestro de carbono por meio dos remanescentes de vegetação nativa e das iniciativas de restauração de ecossistemas no território estadual, o presente relatório apresenta resultados provenientes de uma análise comparativa entre distintos mapeamentos da biomassa acima do solo (AGB, do inglês Aboveground Biomass) e do potencial de estocagem de carbono para o estado. Foram criteriosamente avaliados diversos métodos empregados em três mapeamentos globais de biomassa, levando-se em conta suas limitações intrínsecas e potencialidades de contribuir para mapeamentos detalhados no futuro. Além disso, serão expostas as áreas que ostentam um estoque de carbono mais expressivo, bem como as regiões que se mostram promissoras em relação ao potencial de estocagem de carbono advindo da prática da restauração florestal. Ao término deste relatório, almeja-se contribuir para a discussão e a formulação de políticas públicas destinadas ao mercado de carbono no âmbito estadual de São Paulo.

Cenário

Biomassa, Carbono e Carbono equivalente

As metas nacionais e as negociações de crédito de carbono pautam-se no conceito de carbono equivalente, que difere dos conceitos de carbono e de biomassa. Neste

relatório, nos pautamos na análise de mapeamento de biomassa, que é uma etapa preliminar da quantificação de carbono. De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), biomassa se refere à massa total de matéria orgânica produzida por um ecossistema ou população em um determinado momento, incluindo plantas, animais e microrganismos. Ela é uma importante fonte de energia renovável e pode ser convertida em biocombustíveis. O carbono, por sua vez, é um elemento químico presente na biomassa e em outras formas de matéria orgânica. Ele é essencial para a vida na Terra, onde desempenha um papel importante no ciclo global do carbono.

O carbono equivalente é uma medida utilizada para expressar a quantidade de gases de efeito estufa emitidos por um determinado setor ou atividade, como a queima de combustíveis fósseis. Ele leva em consideração não apenas a emissão de dióxido de carbono (CO₂), mas também de outros gases de efeito estufa, como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), que têm um potencial de aquecimento global (GWP) diferente do CO₂. No cálculo e negociação de crédito de carbono, geralmente é considerado o carbono equivalente, que é a medida utilizada para quantificar a contribuição de diferentes gases de efeito estufa para o aquecimento global, levando em conta seu potencial de aquecimento global relativo ao dióxido de carbono. Isso é importante porque diferentes gases têm diferentes potenciais de aquecimento global, ou seja, alguns gases são mais potentes do que outros em termos de sua capacidade de reter o calor na atmosfera.

A conversão de crescimento potencial de biomassa em carbono equivalente é feita usando o fator de conversão biomassa-carbono, que é uma relação estabelecida entre a quantidade de biomassa e a quantidade de carbono contida nessa biomassa. Essa quantidade pode variar de acordo com o tipo de vegetação e as características do local em que se encontra. Por exemplo, em florestas tropicais úmidas, o fator de conversão geralmente adotado está entre 0,47 e 0,50 o que significa que 1 tonelada de biomassa corresponde a 0,47 ou 0,50 toneladas de carbono. Em regiões de cerrado, esse fator de conversão pode ser de 0,42 (Brown et al. 2005; IPCC, 2006; Saatchi et al., 2011).

Mapeamento de biomassa

O mapeamento da biomassa acima do solo é um elemento crucial para nortear decisões, programas e políticas públicas que envolvam carbono no contexto das mudanças climáticas. Esse mapeamento é importante para monitorar e entender as mudanças na quantidade de carbono armazenado nas florestas ao longo do tempo ou a capacidade que as florestas em regeneração possuem para estocar carbono (Chave et al., 2005). Isso também permite que cientistas avaliem o impacto das atividades humanas, como o desmatamento, degradação florestal e fogo e sua capacidade de liberar CO₂ para a atmosfera. Outra utilidade é estimar a quantidade de carbono armazenado nas florestas em processo de regeneração natural e restauração florestal e como esses processos influenciam no ciclo global do carbono (Chandon et al. 2017; Harris et al. 2021). Além disso, o mapeamento da biomassa acima do solo pode ser usado para identificar as áreas mais críticas para a conservação da biodiversidade e para assegurar a proteção dos estoques de carbono florestal (Lima et al; 2020).

O mapeamento de biomassa acima do solo é realizado através da combinação de dados de sensoriamento remoto, modelos estatísticos e dados de campo. Esses dados são usados para estimar a quantidade de biomassa existente em uma determinada região. As imagens de satélite são processadas para extrair informações sobre a vegetação, tais como a quantidade de clorofila presente nas folhas e a altura da vegetação. Essas informações são combinadas com os dados de campo para criar um modelo que possa ser usado para estimar a biomassa em áreas que não foram medidas diretamente. Na coleta de dados de campo, geralmente são obtidos dados como a densidade de madeira, a altura das árvores e o diâmetro do tronco. Esses dados são usados para calibrar modelos estatísticos que relacionam as informações coletadas no campo com dados de sensoriamento remoto, como imagens de satélite.

Um grande avanço no mapeamento de biomassa tem sido proporcionado pelo uso do sensor LiDAR (*Light Detection and Ranging*), tecnologia que utiliza pulsos de luz laser para medir a distância entre o sensor e a superfície da Terra, criando uma representação tridimensional do terreno e da cobertura vegetal. Com base nesses dados, é possível

estimar a biomassa florestal por meio da análise de parâmetros como altura e densidade da vegetação.

Devido à importância do mapeamento da biomassa acima do solo, atualmente existe vários repositórios e iniciativas para geração de mapas de biomassa em diferentes regiões do mundo e para todo o globo. Porém, nem sempre os resultados convergem, o que pode ser desafiador para tomadores de decisão e formuladores de políticas públicas. Existem várias razões pelas quais os mapas de biomassa acima do solo podem apresentar resultados diferentes para uma mesma região. Algumas das principais razões são:

1. Diferentes fontes de dados: O mapeamento de biomassa acima do solo envolve a combinação de dados de campo e dados de sensoriamento remoto. Os diferentes métodos de coleta de dados podem culminar em diferenças nos resultados.
2. Diferentes técnicas de processamento de dados: Os dados de sensoriamento remoto podem ser processados de modos diferentes para extrair informações sobre a biomassa. Diferentes técnicas de processamento podem levar a resultados diferentes.
3. Variabilidade natural da vegetação e base de informação: A vegetação em uma determinada região pode ser bastante variável em termos de altura, densidade e composição. A fonte de informação sobre a vegetação e sua escala pode interferir nos padrões de vegetação mapeados.

Em suma, os mapas de biomassa acima do solo podem apresentar resultados diferentes para uma mesma região devido a uma combinação de fatores relacionados a diferentes fontes de dados, técnicas de processamento de dados e variabilidade natural da vegetação. É importante avaliar cuidadosamente a qualidade e a confiabilidade dos mapas de biomassa acima do solo ao usá-los para tomar decisões importantes, especialmente na formulação de políticas públicas e quantificações para negociações como as do mercado de carbono.

Estimativa de potencial de estoque de carbono

O mapeamento do potencial de sequestro de carbono, ou seja, a biomassa que pode se desenvolver partir do crescimento da vegetação, também é outro tipo de mapeamento de grande relevância, pois fornece a governos e tomadores de decisão estimativas para o futuro de estocagem de carbono a partir de decisões tomadas no presente, como escolhas que favoreçam a proteção de vegetação secundária para a partir de sua regeneração natural, ou o investimento em projetos de restauração florestal ativa do ecossistema.

Este tipo de mapeamento pode ser realizado por meio da adoção de diferentes técnicas e metodologias, que variam de acordo com o objetivo do estudo e as informações disponíveis. Uma das metodologias utilizadas, por exemplo, é o mapeamento de áreas degradadas, que consiste em identificar as áreas que sofreram perda de cobertura vegetal e apresentam potencial para a regeneração natural e então aplicar modelos de dinâmica da vegetação, que permitem simular o crescimento e a regeneração da vegetação ao longo do tempo nas áreas degradadas.

Esses modelos consideram fatores como o clima, o tipo de solo, a topografia e as condições de manejo da área para estimar o potencial de sequestro de carbono a partir da regeneração natural. Alguns modelos podem basear sua análise na dinâmica de crescimento natural da vegetação, outros podem considerar a trajetória de uso do solo como fator determinante na dinâmica de regeneração da vegetação.

Independentemente da metodologia utilizada, é importante considerar as incertezas associadas ao mapeamento do potencial de sequestro de carbono e considerar possíveis variações na taxa de crescimento da vegetação, mudanças no clima e na cobertura do solo, entre outros fatores.

A compreensão dos diferentes graus de incerteza associadas aos diferentes modelos e metodologias de mapeamento é uma parte importante deste trabalho, buscando: a) apresentar as informações da forma mais clara possível e; b) mitigar eventuais riscos da utilização equivocada destas informações para a tomada de decisão.

Análises

Seleção de mapa

As florestas tropicais são de extrema relevância para o sistema climático global, pois constituem-se no principal sumidouro terrestres de carbono. Essa importância é refletida no fato dos principais mapeamentos de biomassa de grande escala se concentrarem na região tropical, a qual se estende da latitude 23° norte a 23° Sul. No entanto, para o contexto do estado de São Paulo a zona tropical não abrange a totalidade do território estadual, excluindo toda a parte sul do estado a partir da capital. Desse modo, os mapeamentos focados na zona tropical desconsideram as áreas de maior remanescente florestal do estado, as quais se concentram no leste paulista.

Considerando o foco dos mapeamentos de biomassa nas regiões tropicais, determinamos como critério de seleção de mapas de biomassa, aqueles de abrangência global, cujos algoritmos e dados de entrada abrangem a região subtropical. Além disso, visando a facilidade de acesso e uso pelo governo do estado, também optamos por mapeamentos de acesso livre e que não demandam processos adicionais de modelagem.

Atualmente, existe uma variedade de mapas globais de biomassa AGB disponíveis publicamente. Para análise, selecionamos três mapas globais com dados de entrada e metodologias diferenciadas: Avitabile et al. 2016; Harris et al. 2021; e European Space Agency – ESA & Climate Change Initiative - CCI, 2020. Um resumo dos dados de entrada e etapas metodológicas de cada mapeamento está descrito na tabela 1.

Tabela 1. Resumo metodológico dos mapeamentos selecionados para análise aplicada ao estado de São Paulo.

Fonte	Área de estudo	Dado de estrada	Método de análise	Resolução
Harris et al 2021	Global	Dados de detecção e alcance de luz baseados em satélite (LiDAR) adquiridos em uma resolução espacial nominal de 70m, com imagens de refletância de superfície multiespectral de 500 m e outras camadas de dados geoespaciais. As medições de forma de onda LiDAR foram adquiridas pelo Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) a bordo do Ice, Cloud e Land Elevation Satellite (ICESat) da NASA. Os dados de refletância da superfície foram fornecidos pelo espectrorradiômetro de imagem de resolução moderada (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua da NASA e os dados digitais de elevação foram obtidos como parte da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da NASA.	Combinou o mapeamento feito anteriormente por Baccini et al (2012) e Zarin et al. (2016), com resolução de 500m e 30 m respectivamente. A metodologia envolveu equações alométricas, usadas para estimar AGB por meio de medição de campo e métricas de dossel derivadas de observações LiDAR e dados de campo para o período 2008/2010. Pan-Trópicos” densidade de carbono (Mg C ha-1) de vegetação lenhosa viva acima do solo para os pan-trópicos (incluindo África tropical, América e Ásia). Só considerou limite de copa das árvores de pelo menos 30% com árvores mais altas que 5 m de altura. Os autores adotaram mais de 80 milhões de observações LiDAR de espaçamento de 172 m ao longo da trilha fornecido pelo Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) a bordo do Ice, Cloud e Land Elevation Satellite (ICESat). Foram utilizadas 47 equações empíricas de altura-biomassa desenvolvidas para diferentes regiões, tipos de floresta e sistemas LiDAR para prever AGB (em unidades de Mg ha-1) a partir de métricas de estrutura e altura de dossel derivadas de LiDAR.	30 m Mg/ha
Avitabile et al, 2016	Global	Dois mapeamentos de biomassa foram adotados como principais fontes de dados: o mapa produzido por Saatchi et al. (2011) e Baccini et al. (2012). 14 477 dados de campo de referência de medições de lotes de inventário florestal (parcelas e pixels de 1 km) para os quais geolocalização precisa e estimativas de biomassa estavam disponíveis, sendo apenas 474 na América do Sul.	Os autores implementaram um método de fusão baseado na remoção de viés e na média ponderada dos mapas regionais. O modelo de fusão consiste na remoção de viés e na média linear ponderada dos mapas de entrada para produzir uma saída com maior precisão do que cada um dos mapas de entrada. O conjunto de dados AGB de referência foi usado para calibrar o modelo e para avaliar	1 km ² Mg/ha

			a precisão dos mapas de entrada e fusão. Foi desenvolvido um modelo específico para cada estrato. O resultado foi usado para produzir um novo mapa com menor variância de erro e maior precisão do que os mapas de entrada	
CCI/ESA	Global	<p>Dados de radar de abertura sintética (SAR) de três satélites diferentes (ALOS PALSAR, Envisat ASAR e RADARSAT-2), que foram utilizados para estimar a biomassa florestal em áreas com cobertura de nuvens.</p> <p>Dados de imagens ópticas de satélite de dois sensores diferentes (Landsat e MODIS), que foram utilizados para estimar a biomassa florestal em áreas sem cobertura de nuvens.</p> <p>Dados de inventário florestal de 24 países, que foram utilizados para calibrar e validar os dados de satélite.</p> <p>Dados de modelos climáticos, que foram utilizados para corrigir a estimativa de biomassa florestal para levar em conta as variações nas condições climáticas ao longo do tempo.</p> <p>Dados de topografia, que foram utilizados para corrigir a estimativa de biomassa florestal para levar em conta as variações nas condições de terreno.</p>	<p>O processo começa com a correção radiométrica e atmosférica dos dados brutos e o cálculo de um índice de vegetação baseado em MODIS. Em seguida, é aplicado um modelo estatístico que relaciona o índice de vegetação com a AGB, utilizando dados de campo como referência. Esse modelo é validado e ajustado para diferentes regiões e biomas. Por fim, é gerado um mapa global de AGB com uma resolução de 0,25 graus espaciais. O mapa é validado por comparação com dados de AGB medidos em campo e por comparação com outros mapas de AGB existentes. O LiDAR é utilizado na etapa de validação dos dados do modelo, onde são comparados os valores de AGB estimados pelo modelo com valores de AGB medidos diretamente no campo. Isso é feito para avaliar a precisão do modelo e, se necessário, ajustar seus parâmetros. A coleta de dados de LiDAR é uma das técnicas utilizadas para a medição direta da biomassa acima do solo em campo.</p>	100 m Mg/ha

Os três mapeamentos apresentam dados de entrada, bem como metodologia de modelagem e técnicas de processamento diferenciados. O mapeamento de Harris et al (2021) é o que apresenta a melhor resolução espacial (30m cada pixel), no entanto os autores só realizaram suas análises para áreas de cobertura florestal com o mínimo de 30% de composição de árvores com altura acima de 5 m. Dessa forma, o mapeamento apresenta várias lacunas de informação no território paulista.

O mapeamento elaborado pela ESA/CCI adotou a maior variedade de dados de entrada, considerando diferentes sensores e uma rica base de dados de inventários florestais de diferentes países, o que permitiu a execução de um robusto processo de calibração e validação que resultou em dados com resolução espacial e 100m por pixel. O mapeamento de Avitabile et al (2016), por sua vez, consiste no cruzamento de outros dois mapeamentos analisados a partir de dados de campo. Dos três mapeamentos, este último é o que apresenta a menor resolução espacial (1 km² cada pixel).

A quantificação dos dados de biomassa fornecidos pelos três mapeamentos apresenta resultados discrepantes, com valores divergentes em relação à biomassa máxima por hectare, biomassa total e média, bem como ao desvio padrão¹ de cada mapa (Tabela 2). Por exemplo, o mapeamento realizado por Avitabile et al. (2016) apresenta o valor máximo por hectare mais elevado (520 ton/ha) em comparação aos outros dois mapeamentos. Isso significa que os valores máximos de biomassa por hectare identificados em determinadas regiões são superiores aos dos demais mapeamentos. Por outro lado, a soma de todos os valores de biomassa mapeados resulta no menor valor dentre os três mapeamentos considerados. Em contrapartida, os mapeamentos executados por Harris et al. (2021) e ESA/CCI (2017) apresentam valores totais de biomassa para o estado com diferença mínima entre si, não excedendo o valor de 190 ton/ha para a totalidade do estado (Tabela 2).

¹ Análise estatística que analisa o grau de dispersão entre valores em um conjunto de dados. Sua aplicação nos mapeamentos de biomassa consiste na análise do quão homogêneo ou heterogêneo pode ser cada mapa, por meio da identificação de dados que se distanciam dos valores médios.

Tabela 2. Análise estatística dos dados dos três mapeamentos selecionados para análise no estado de São Paulo

Fonte	Max min	Total (Toneladas de biomassa)	Média	Desvio Padrão
Harris et al 2021	1 – 281	1.119.239.842	86,2629	73,2733
Avitabile et al, 2016	1 - 520,6	14.046.669	45,8182	66,7246
ESA CCI	1- 462	1.154.661.732	42,8733	63,4874

Cada mapeamento representa a quantidade de biomassa por hectare em cada pixel. Com o objetivo de realizar uma comparação mais precisa dessas informações, plotamos os valores provenientes de cada mapeamento em gráficos de barra. O Gráfico 1 apresenta a distribuição do número de pixels com diferentes densidades de biomassa nos três mapeamentos. É possível observar maior ocorrência de pixels com valores de biomassa nos intervalos de 10 a 30 ton/ha e de 150 a 190 ton/ha. O Gráfico 2 mostra o total de biomassa acumulado em cada intervalo de ton/ha. Esse valor é calculado multiplicando-se a quantidade de biomassa representada em ton/ha em cada pixel pelo número de pixels com os mesmos valores.

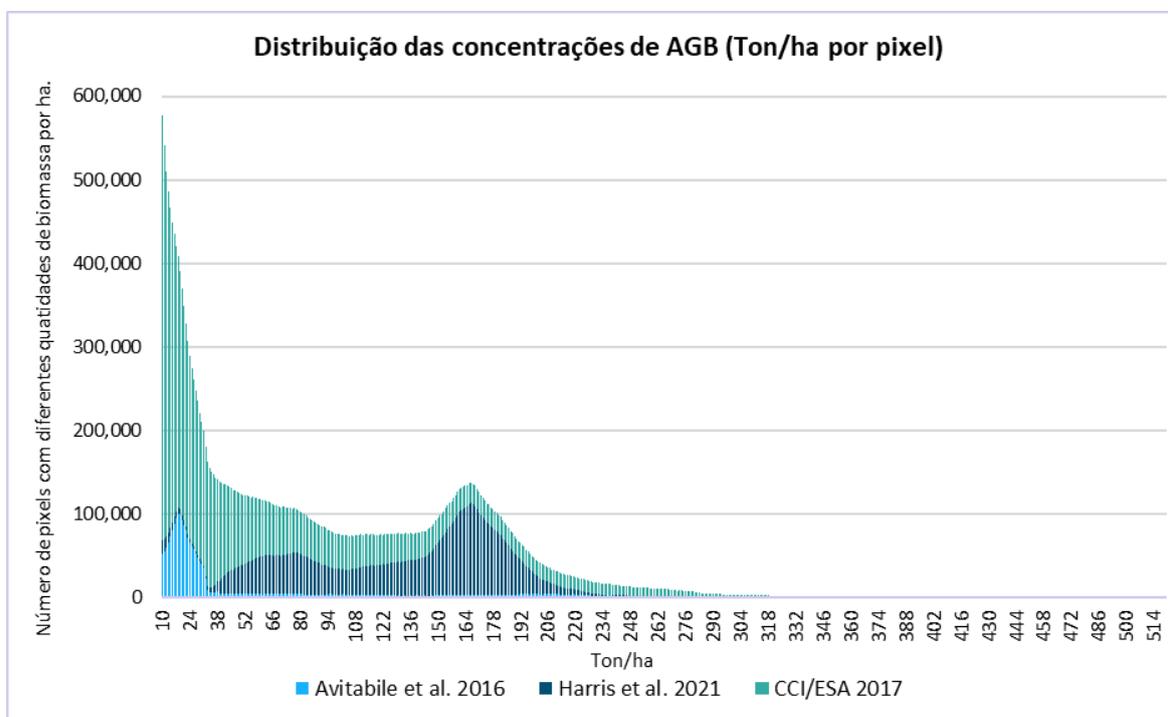


Gráfico 1. Distribuição dos pixels com diferentes valores de biomassa

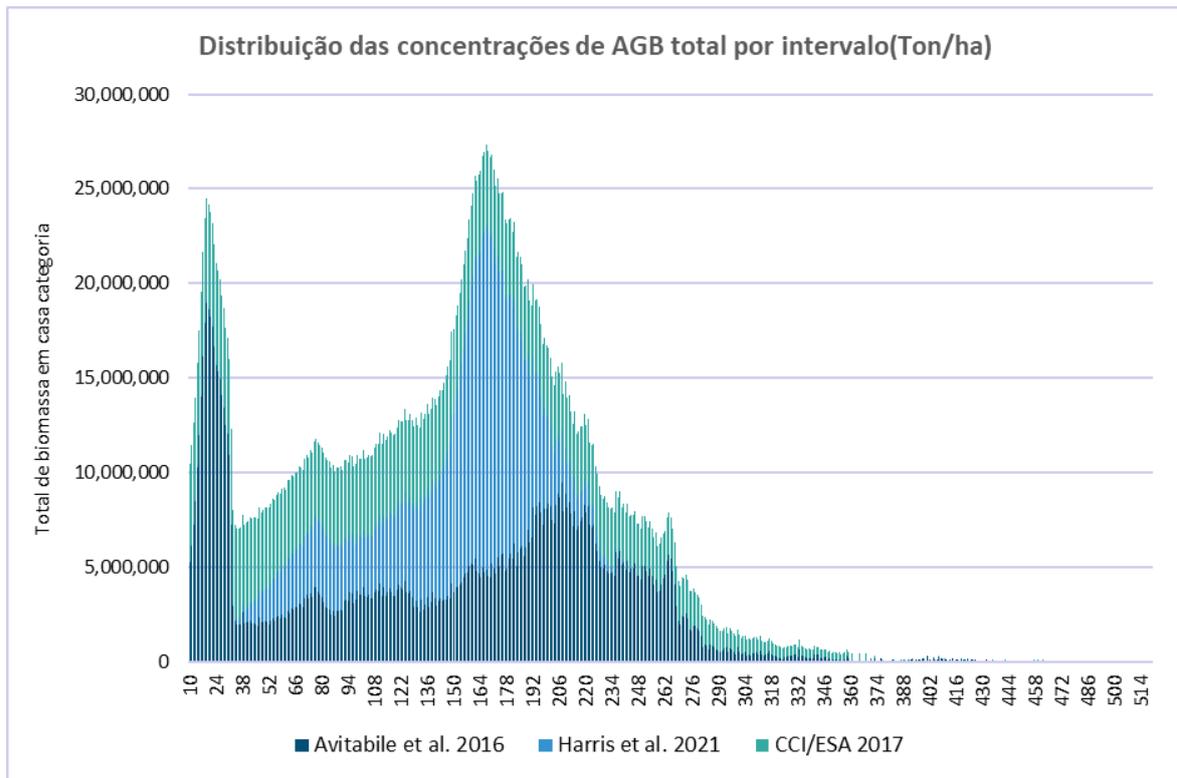


Gráfico 2. Distribuição dos valores totais de biomassa por intervalo de concentração de biomassa por hectare. Valores obtidos através da multiplicação de pixels de mesmo valor.

Com base nos gráficos, é possível observar que, embora os valores totais sejam distintos, a distribuição dos valores segue um padrão semelhante, especialmente nos mapeamentos de Harris et al (2021) e ESA/CCI (2017), onde a maior concentração de biomassa está no intervalo de 150 a 210 ton/ha. Enquanto no mapeamento de Avitabile et al (2016), as maiores concentrações estão no intervalo de 190 a 220 ton/ha. Também podemos observar que, apesar de o estado de São Paulo ter uma predominância de áreas com baixa densidade de biomassa por hectare (Gráfico 1), com a maioria dos pixels apresentando valores abaixo de 30 ton/ha, ainda assim existe um número significativo de pixels com valores entre 155 e 185 ton/ha (Gráfico 2). Isso faz com que a quantidade total de biomassa nesse intervalo atinja picos acima de 20 milhões de toneladas por hectare, contribuindo para que o estado tenha mais de 1 bilhão de toneladas de biomassa em seu território.

Análise de padrões espaciais

Com o propósito de identificar as disparidades de valores entre os mapas, também foram realizados testes fundamentados em métodos de geoestatística. Procedeu-se a uma análise de estratificação, enfatizando valores acima de 200 ton/ha nos três mapeamentos, a fim de discernir áreas de concentração mais significativa de biomassa no estado e verificar se essas regiões coincidem nos três mapeamentos. Em seguida, conduziram-se testes estatísticos entre os mapeamentos com o intuito de compreender como os valores produzidos por cada mapeamento se diferenciam entre si. Desse modo, adotamos a abordagem da diferença entre valores máximos e mínimos e de desvio padrão entre os valores espacialmente explícitos apresentados nos três mapeamentos (Figura 1).

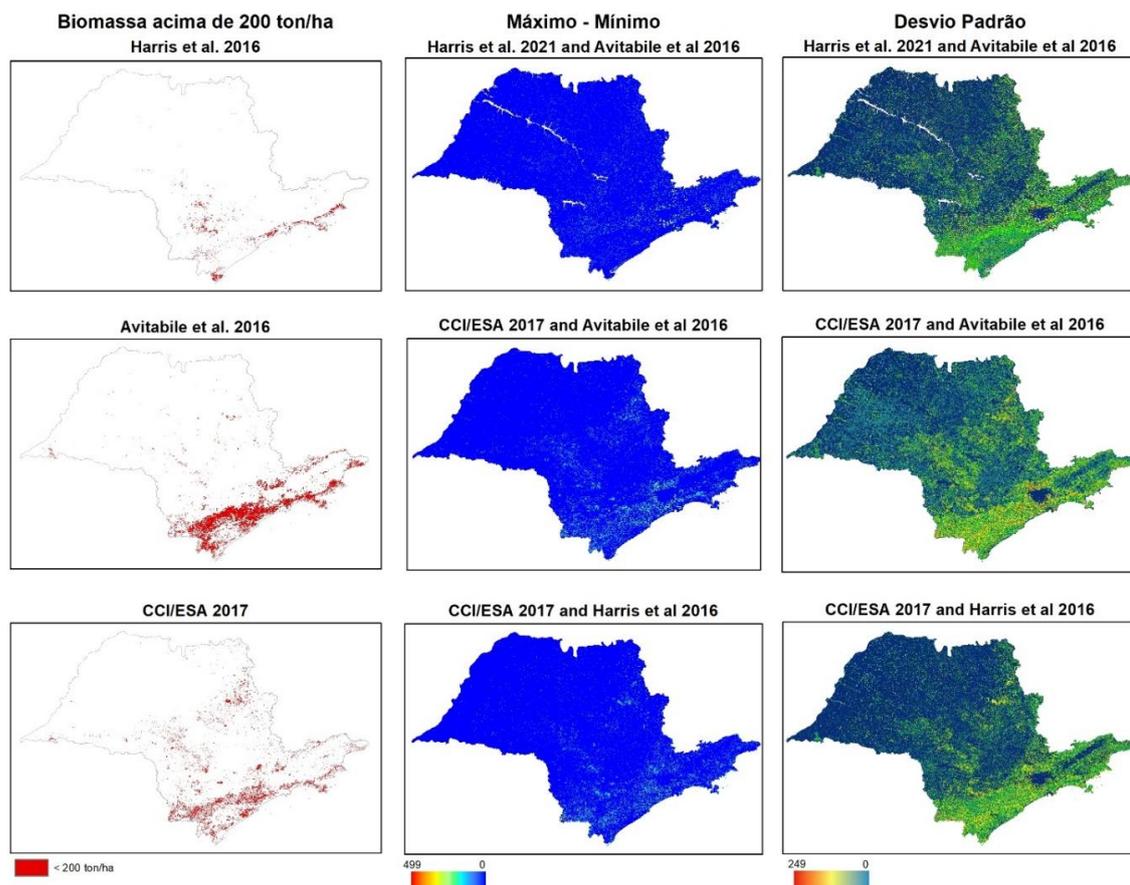


Figura 1. Testes geoestatísticos: concentração de biomassa acima de 200 ton/ha, Diferença entre Min&Max entre mapas e Desvio Padrão entre mapas

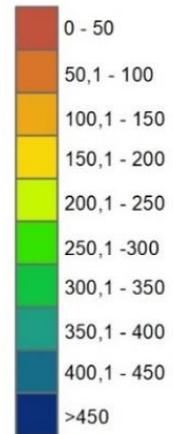
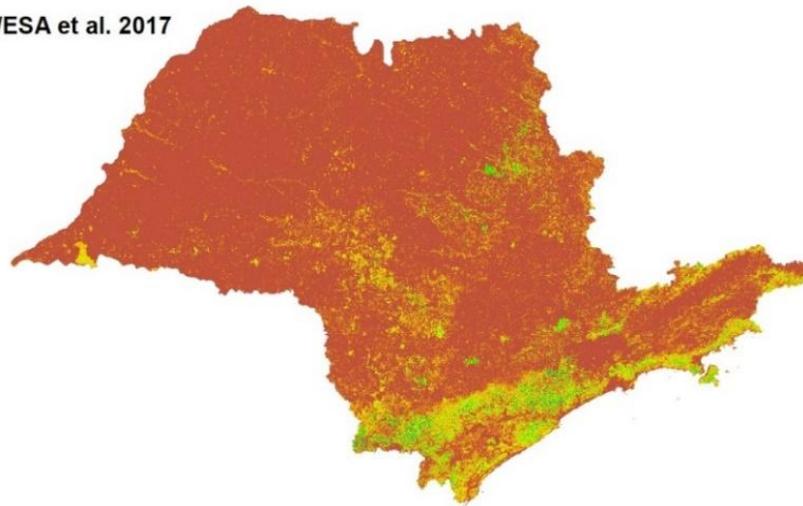
Em todos os mapeamentos, a biomassa se apresenta concentrada no leste do estado, ao longo do litoral. No entanto, esta mesma região é a que também apresenta as maiores divergências de valores, tanto na análise de máximo e mínimo, como no desvio padrão, ou seja, é a região na qual os valores de biomassa presente em cada hectare divergem mais. As maiores divergências estão entre os mapeamentos de Avitabile et al (2016) e ESA/CCI (2017), que apresentam as maiores diferenças no total de biomassa calculada nas áreas de concentração de remanescentes de vegetação nativa. A incerteza de informação nessas áreas pode ser potencialmente problemática ao se pensar políticas pautadas no estoque de carbono em vegetação nativa no estado.

Visando a melhor visualização dessas diferenças, os três mapeamentos foram plotados adotando-se os mesmos intervalos de estratificação (Figura 2). Os mapas de estratificação apontam maior convergência entre os mapeamentos do ESA/CCI (2017) e de Avitabile et al (2016), com intervalos de valores de ton/ha próximos. Porém, embora o mapeamento de Harris et al (2021) não apresente valores próximos aos dos outros dois mapeamentos, o padrão de distribuição de maior densidade de biomassa em determinadas regiões do estado converge com os demais mapeamentos, concentrando-se no leste do estado e em algumas manchas na região central do território estadual.

Harris et al. 2021



CCI/ESA et al. 2017



Avitabile et al. 2016

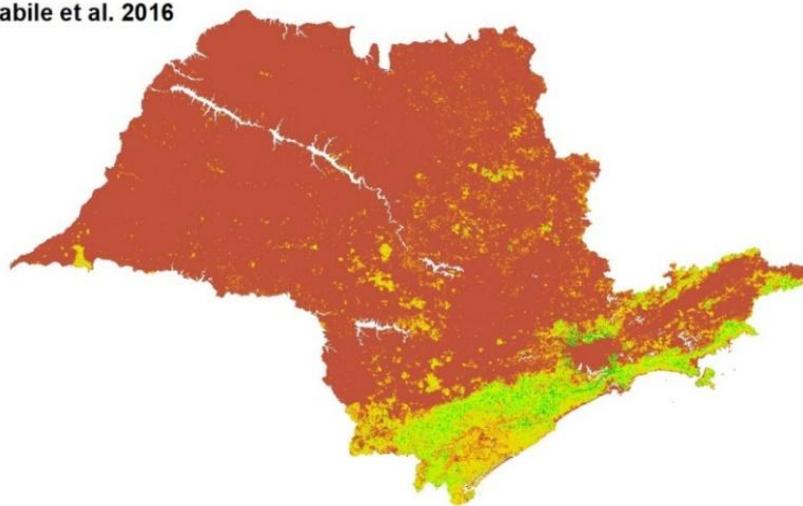


Figura 2. Comparação da distribuição de biomassa acima do sol

Essa análise demonstra a magnitude da complexidade envolvida no mapeamento da biomassa e como diferentes metodologias, conjuntos de dados e resoluções espaciais podem interferir nos resultados para uma mesma região. Tal complexidade torna desafiadora a escolha de uma fonte de dados que possa servir como base de informação a formuladores de políticas públicas. A grande variedade de metodologia e seus diferentes resultados podem ser particularmente problemáticos quando o objetivo é estimar valores de biomassa que sirvam como base para mecanismos financeiros que dependem da quantificação de carbono. Nesses casos, mapeamentos adicionais com tecnologias de alta resolução são cruciais.

A partir da análise dos três mapeamentos e da necessidade de realizar análises em outras escalas para o estado de São Paulo, optou-se por utilizar o mapeamento produzido pela ESA/CCI como a principal fonte para análises mais detalhadas no estado de São Paulo. Os mapas de biomassa produzidos pela European Space Agency (ESA) em parceria com a Climate Change Initiative (CCI) apresentam um diferencial por utilizarem dados de satélite com alta resolução espacial e temporal, além de uma combinação de diferentes fontes de dados, como dados de radar, de espectrômetros e de LiDAR. Essas técnicas permitem que os mapas tenham uma precisão maior na estimativa da biomassa em áreas de vegetação densa e complexa, como florestas tropicais. Além disso, esses mapas são produzidos usando uma metodologia padronizada, o que facilita a comparação entre diferentes regiões e períodos.

Mapeamento de potencial de estoque de biomassa acima do solo (AGB)

A metodologia de mapeamento do potencial de estoque AGB adotada neste estudo foi desenvolvida por Broadbent & Almeyda Zambrano (2023) e está disponível em: <http://www.speclab.org/>. A metodologia está focada na modelagem do potencial de biomassa acima do solo em florestas naturais em todo o mundo, com base em dados de cobertura florestal e modelos de estoque de carbono.

A metodologia integra linguagens de programação IDL, R e Python, e ferramentas do Sistema de Informações Geográficas (SIG), tais como Google Earth Engine, ArcMap e

ENVI. O mapeamento produzido pela ESA/CCI (2017), descrito nas seções anteriores, é o principal dado de entrada do modelo, sendo utilizado como base de cálculo de biomassa existente. A metodologia utiliza uma coleção de variáveis preditoras bioclimáticas e biogeofísicas para criar uma predição abrangente da máxima biomassa possível acima do solo (Broadbent & Almeyda Zambrano, 2023). Essas variáveis incluem déficit climático de longo prazo, capacidade de troca de cátions do solo, extensão global de inundação, elevação, características do terreno, índice topográfico de posição, drenagem hidrográfica, biomas e ecorregiões, além de 16 preditores bioclimáticos² do modelo Chelsea (Broadbent & Almeyda Zambrano, 2023).

Na etapa de calibração e validação, foram considerados 2.194 locais de parcelas de florestas primárias estabelecidas em uma revisão da literatura. Essas parcelas foram divididas aleatoriamente em 60% para calibração e 40% para validação. Além disso, foram adicionadas 56 parcelas adicionais em gradientes bioclimáticos-chave. Pseudo-parcelas também foram criadas para representar paisagens florestais, totalizando 29.000 pseudo-parcelas. Um processo de correção de viés foi aplicado para ajustar as diferenças entre as regiões geográficas (Broadbent & Almeyda Zambrano, 2023).

A validação foi realizada em escala global utilizando as parcelas de validação apresentando uma relação linear significativa entre a AGB medida e a prevista pelo método proposto. Uma etapa que precisa ser desenvolvida no futuro inclui a influência

² Bio1 = Annual Mean Temperature
 Bio2 = Mean Diurnal Range
 Bio3 = Isothermality
 Bio4 = Temperature Seasonality
 Bio5 = Max Temperature of Warmest Month
 Bio6 = Min Temperature of Coldest Month
 Bio7 = Temperature Annual Range
 Bio8 = Mean Temperature of Wettest Quarter
 Bio9 = Mean Temperature of Driest Quarter
 Bio10 = Mean Temperature of Warmest Quarter
 Bio11 = Mean Temperature of Coldest Quarter
 Bio12 = Annual Precipitation
 Bio13 = Precipitation of Wettest Month
 Bio14 = Precipitation of Driest Month
 Bio15 = Precipitation Seasonality
 Bio16 = Precipitation of Wettest Quarter

das mudanças no uso da terra, que é um fator importante para estimar como diferentes trajetórias de uso influenciam na regeneração e ganho de biomassa.

A partir do mapa global, foi realizado um recorte para o estado de São Paulo (Figura 3). Em seguida, com o objetivo de excluir da quantificação as áreas não passíveis de restauração com objetivo de estocagem de carbono, uma máscara de “áreas não elegíveis” foi criada a partir de quatro classes do projeto Mapbiomas, tais como água, formação não florestal, área urbana e a classe que inclui praias, dunas e areia.

Considerando que o cálculo de ganho de biomassa foi realizado a partir do mapeamento de biomassa existente, as áreas de maior concentração de biomassa são as que apresentam menor potencial de ganho de biomassa no futuro (Figura 3). Isso se dá pelo fato de o modelo de ganho de biomassa trabalhar com um valor de acúmulo de biomassa máximo, o qual deve ser alcançado ao longo de três décadas, dependendo de vários fatores como tipo de vegetação, clima, solos, dentre outros. Desse modo, quanto mais antiga a vegetação remanescente, menor o seu ganho potencial.

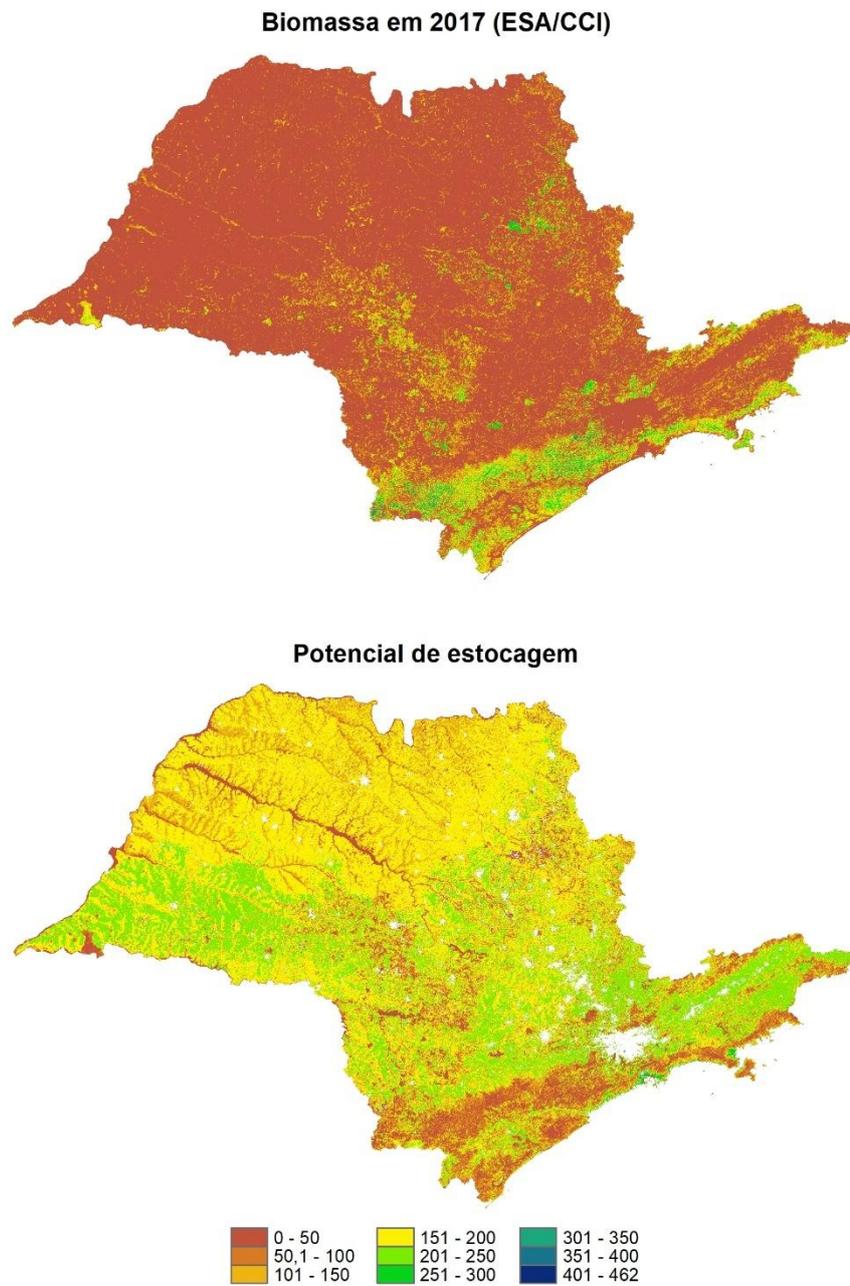


Figura 3. Mapas de biomassa existente em 2017 e de Potencial de biomassa

Análise multiescala

O mapeamento de biomassa realizado pela ESA/CCI (2017) e o mapeamento de ganho potencial de biomassa foram analisados em três escalas: fitofisionomia, classes de uso da terra e Unidades de Gestão de Recursos Hídricos (UGRHI). O objetivo dessa análise

multiescala é proporcionar maior clareza sobre a distribuição de biomassa em diferentes regiões do estado com potencial para orientar ações de políticas públicas.

Análise por fitofisionomia

A informação de fitofisionomia foi obtida no repositório de dados espaciais do Governo do estado de São Paulo (<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/>) e analisada considerando cinco categorias principais: Floresta ombrófila densa, Floresta ombrófila mista, Floresta estacional semidecidual, Floresta com influência fluvio-marinha e Savana (Figura 4).

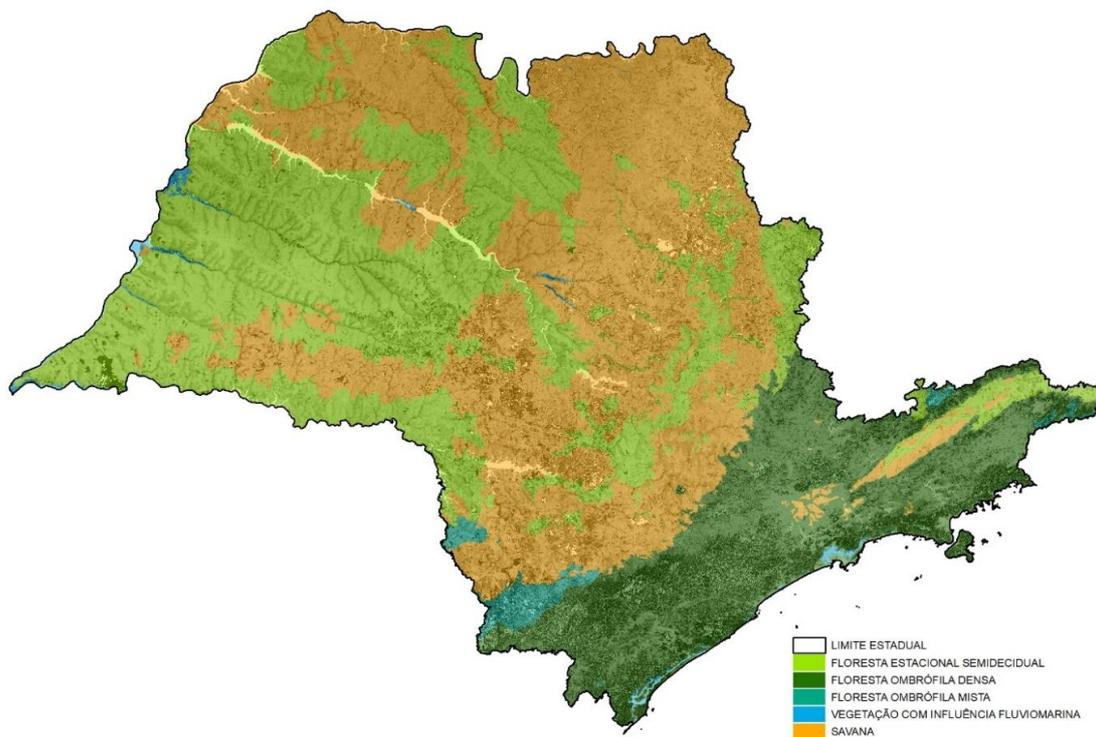


Figura 4. Fitofisionomias presentes no estado de São Paulo

A partir da quantificação dos mapeamentos de biomassa existente e da biomassa potencial seguindo os limites das classes de fitofisionomia, é possível afirmar que a maior concentração de biomassa existente no estado encontra-se na floresta ombrófila densa, a qual se concentra no leste do estado, constituindo o maior remanescente florestal de São Paulo. Em contrapartida, os mais elevados valores para potencial de ganho de biomassa encontram-se na floresta estacional semidecidual, que predomina na porção oeste do estado e no bioma Savana, o qual se espalha na região central do estado (Figuras 3 e 4).

Este último bioma merece rodadas de modelagem mais detalhada devido às particularidades que a restauração em áreas de cerrado demandam.

Tabela 3. Quantificação de biomassa existente e de ganho potencial por fitofisionomia

FOTOFISIONOMIA	Ton/ha ESA/CCI	Valor máx. de Ton/ha	Ton/ha Potencial	Valor máx. de Ton/ha potencial
Savana	387.591.501	389	1.720.051.187	244
Floresta Ombrófila Densa	494.228.282	462	659.026.600	283
Floresta Ombrófila Mista	38.008.957	368	43.285.711	248
Floresta Estacional Semidecídua	226.029.104	442	1.564.040.995	281
Floresta Fluvial	8.803.888	442	13.975.478	283

Análise por Classes de uso da terra

Para análise baseada em classes de uso da terra, adotou-se o mapeamento realizado na coleção 7 do projeto Mapbiomas para o ano de 2017 (<https://mapbiomas.org/>). Todas as classes (excluindo as máscaras de “áreas não elegíveis” descritas anteriormente) foram cruzadas com o mapa de potencial de biomassa no intuito de identificar as classes que apresentavam maior potencial de ganho de biomassa. Os resultados dessa análise apontam que mais de 70% de todo potencial de ganho de biomassa no estado se concentra em quatro classes de uso da terra: cana de açúcar, Mosaico de uso³, Pastagem e Lavouras temporárias⁴ (Tabela 4).

³ Definida pelo Mapbiomas como “Áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura”.

⁴ Definida pelo Mapbiomas como “Áreas ocupadas com cultivos agrícolas de curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita necessitam de novo plantio para produzir.” Nesse caso, não incluem soja, cana, arroz e algodão, as quais possuem classificação própria no projeto.

Tabela 4. Quantificação de ganho potencial de biomassa por classe de uso da terra.

Classe de uso da terra	Biomassa potencial	Máx. ton/ha
Cana de açúcar	992.855.988	236
Mosaico de usos	917.884.323	283
Pastagem	866.071.398	282
Lavouras temporárias	120.357.898	266

Conforme mencionado anteriormente, as áreas de remanescente florestal são as que apresentam menores valores em potencial, contribuindo para que áreas maiores e com alto potencial se concentrem no oeste do estado. Na Figura 5, também é possível identificar áreas com lacuna de informação, as quais se referem às “áreas não elegíveis” mencionadas anteriormente.

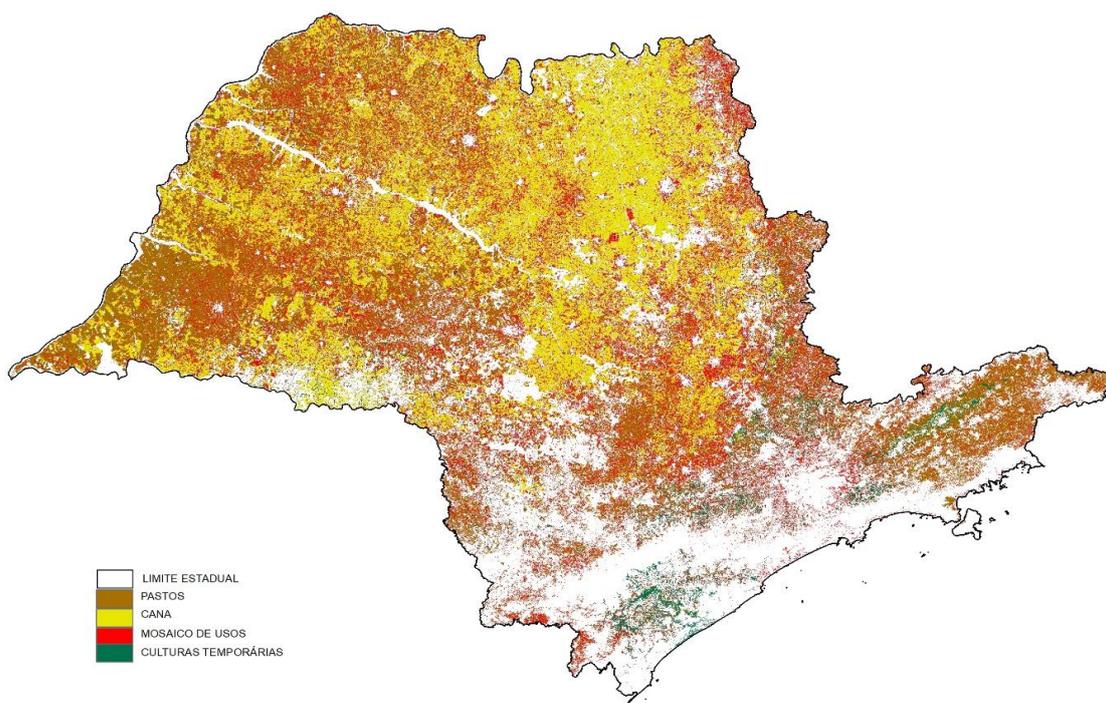


Figura 5. Classes de uso da terra com maior potencial de ganho de biomassa

Análise por Unidade de Gestão de Recursos Hídricos (UGRHI)

O mapeamento realizado pela ESA/CCI (2017) e o mapeamento de potencial de biomassa também foram analisados seguindo os limites das 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) adotadas pelo governo do estado de São

Paulo (Figura 6). A informação com os limites das UGRHIs também foram obtidas na base de dados do governo do estado de São Paulo (<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/>).

A maior concentração de biomassa existente em 2017 está concentrada na UGRHI do Vale do Ribeira e Litoral Sul (259.705.892 ton/ha), onde se concentram os maiores remanescentes florestais do estado. Em seguida, as UGRHIs do Alto Paranapanema (151.139.169 ton/ha), Paraíba do Sul (88.091.137 ton/ha) e Médio Paranapanema (73.742.328 ton/ha) são as que apresentam as maiores concentrações de biomassa em ordem decrescentes. Os valores totais de biomassa diminuem do leste para oeste no estado, apresentando valores mínimos nas UGRHIs de São José de Dourados (10.882.935 ton/ha) seguido por Baixo Pardo (16.905.711 ton/ha). Devido ao tamanho territorial, menores concentrações de biomassa também foram registradas na UGRHI da Mantiqueira (7.208.599 ton/ha) Litoral Norte (30.467.884 ton/ha).

No que concerne ao mapeamento de potencial de biomassa, as UGRHIs do Alto Paranapanema, Médio Paranapanema e Paraíba do Sul também são as que apresentam maior potencial em ganho de biomassa. Esse resultado é particularmente relevante no contexto das políticas públicas, pois indica que essas regiões que já possuem um estoque significativo de biomassa oferecem oportunidades imediatas para participar de iniciativas relacionadas ao mercado de carbono e Pagamento por Serviços Ambientais voltados para o carbono. Além disso, essas regiões podem ampliar seus programas visando impulsionar iniciativas de restauração florestal com foco no sequestro e armazenamento de carbono. Por outro lado, as UGRHIs de São José de Dourados, Baixo Pardo e Peixe além de apresentarem os menores valores de biomassa existentes, também são as que apresentam os menores valores de potencial de biomassa (Figura 6).

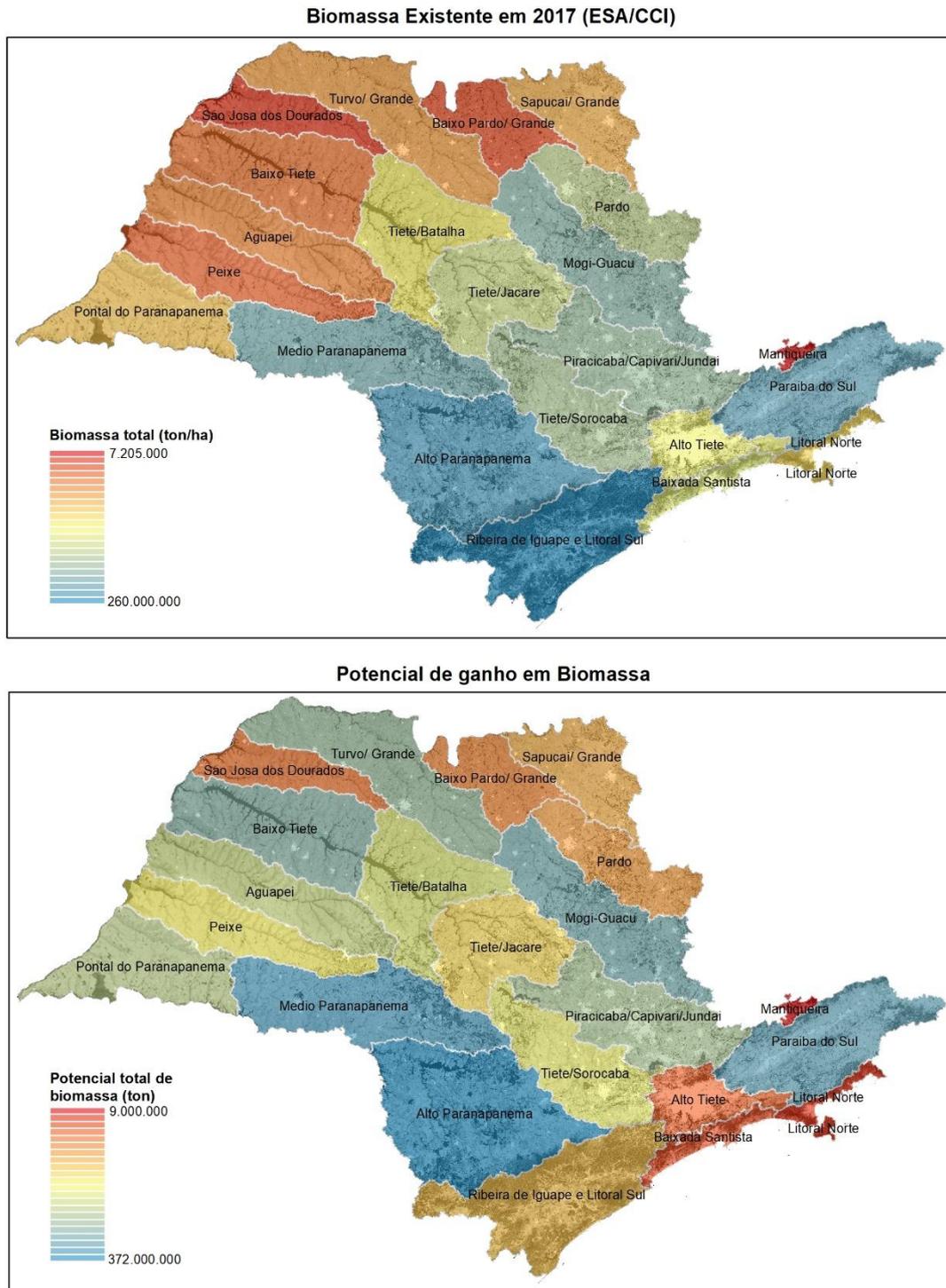


Figura 6. Mapas de Biomassa existente em 2017 por UGRHs e Mapa de Potencial de ganho de Biomassa por UGRHs.

No geral, regiões que apresentam menor estoque de biomassa apresentam melhores valores de potencial de ganho de biomassa no futuro, como é o caso das UGRHs de Mogi-Guaçu, Baixo Tietê e Piracicaba/Capivari/Jundiaí. A exclusão de áreas urbanas da análise de potencial de ganho de biomassa influenciou as UGRHs do Alto Tietê e

Baixada Santista, as quais são densamente povoadas, com áreas urbanas extensas em relação ao território da UGRHI. A pequena extensão territorial também influenciou os resultados para as UGRHIs da Mantiqueira e Litoral Norte, no entanto, todas as UGRHIs demandam análises detalhadas para que aspectos particulares possam ser considerados, tais como demandas ecológicas urgentes que demandam restauração florestal em perspectivas para além do ganho de biomassa voltada para quantificação de carbono.

Os valores totais de biomassa existente e potencial estão detalhados na tabela 2, juntamente com os valores máximos de biomassa por hectare que podem ser alcançados em determinadas regiões em cada UGRHI e os valores de biomassa convertidos em carbono. Adotou-se como fator de conversão o valor de 0,5 toneladas de carbono por tonelada de biomassa seca acima do solo ($\text{Carbono (toneladas)} = \text{Biomassa seca acima do solo (toneladas)} \times 0,5$).

Esse é um dos valores mais comumente utilizados em estudos de estoque de carbono em florestas tropicais. Essa conversão é baseada em uma média ponderada de dados coletados em várias regiões do mundo, incluindo a América Latina, África e Ásia. No entanto, a fórmula para converter a biomassa em carbono em florestas primárias no estado de São Paulo, Brasil, pode variar dependendo do método utilizado para estimar a biomassa e a quantidade de carbono.

Vale lembrar que esse é apenas um exemplo de fórmula e que é importante levar em consideração as variações na qualidade e densidade da biomassa em diferentes regiões e ecossistemas. Além disso, para uma estimativa mais precisa, é recomendável utilizar fórmulas baseadas em dados mais específicos e atualizados para a região em questão.

UGRHI	MÁX TON/HA	TOTAL BIOMASSA 2017	CARBONO 2017	MÁX. POT. TON/HA	TOTAL DE BIOMASSA POTENCIAL	CARBONO POTENCIAL	CARBON POTENCIAL EQ
Mantiqueira	316	7.208.599	3.604.300	236	9.033.029	4.516.515	30.125.152
Paraíba do Sul	462	88.091.137	44.045.569	269	261.294.096	130.647.048	871.415.810
Litoral Norte	442	30.467.884	15.233.942	285	20.488.094	10.244.047	68.327.793
Pardo	307	46.544.312	23.272.156	229	144.239.671	72.119.836	481.039.303
Piracicaba/Capivari/Jundiaí	457	52.691.207	26.345.604	249	241.346.717	120.673.359	804.891.301
Alto Tiete	374	34.035.344	17.017.672	255	64.121.543	32.060.772	213.845.346
Baixada Santista	374	37.585.315	18.792.658	279	35.452.322	17.726.161	118.233.494
Sapucaí/ Grande	389	28.467.323	14.233.662	215	148.713.114	74.356.557	495.958.235
Mogi-Guaçu	410	65.529.439	32.764.720	231	254.515.345	127.257.673	848.808.676
Tiete/Sorocaba	380	51.558.923	25.779.462	247	208.498.513	104.249.257	695.342.541
Ribeira de Iguape e Litoral Sul	387	259.705.892	129.852.946	259	178.400.867	89.200.434	594.966.891
Baixo Pardo/ Grande	260	16.905.711	8.452.856	210	110.912.948	55.456.474	369.894.682
Tiete/Jacare	301	44.736.437	22.368.219	224	201.172.522	100.586.261	670.910.361
Alto Paranapanema	375	151.139.169	75.569.585	242	372.559.735	186.279.868	1.242.486.716

Turvo/ Grande	271	27.038.308	13.519.154	196	246.171.641	123.085.821	820.982.423
Tiete/Batalha	262	32.411.739	16.205.870	218	211.172.575	105.586.288	704.260.538
Médio Paranapanema	290	73.742.328	36.871.164	228	302.994.948	151.497.474	1.010.488.152
São Josa dos Dourados	212	10.882.935	5.441.468	198	103.344.595	51.672.298	344.654.224
Baixo Tiete	225	23.119.396	11.559.698	211	247.497.498	123.748.749	825.404.156
Aguapeí	238	23.852.913	11.926.457	220	229.128.781	114.564.391	764.144.485
Peixe	265	19.702.936	9.851.468	228	208.483.512	104.241.756	695.292.513
Pontal do Paranapanema	253	29.244.485	14.622.243	228	233.476.598	116.738.299	778.644.454
TOTAL		1.154.661.732	577.330.866		4.033.018.664	2.016.509.332	13.450.117.244

Limitações

As informações trazidas na presente nota técnica precisam ser adotadas com ressalvas. Primeiramente, é preciso considerar que o mapeamento de biomassa existente realizado pela ESA/CCI (2017) e adotado aqui como base para quantificação e análise de diferentes escalas no estado de São Paulo é apenas mais um mapeamento entre um conjunto de mapeamentos que adotam métodos e dados de entrada diferenciados. Portanto, a adoção dos valores apresentados deve ser feita com cautela e demanda a realização de análises complementares, incluindo imagens de alta resolução e/ou dados obtidos por sensores como Lidar de modo a aumentar a confiabilidade dos dados.

Os dados de biomassa potencial fazem parte de uma pesquisa em andamento que se baseou, até o momento, em estimativas geradas a partir de dados globais. Assim, é necessário realizar um refinamento e inserção de dados detalhados que permitam fornecer melhores estimativas para o estado de São Paulo. Além disso, o mapeamento não considerou particularidades dos biomas, trajetórias de uso da terra, ocorrência de fogo e anomalias climáticas, os quais podem influenciar na dinâmica de crescimento da vegetação. Os monocultivos de eucalipto em regiões de Cerrado, por exemplo, devem ser analisados com maior cautela para evitar superestimativas do potencial de restauração florestal nessas regiões, nas quais deve-se priorizar a restauração das fisionomias vegetacionais nativas, que por vezes não são florestais.

Este estudo se debruçou sobre o potencial biofísico para incremento da estocagem de carbono, sem considerar, por hora, análises de custo de oportunidade que é desejável que sejam realizadas na hora de avaliar a viabilidade financeira antes de implementar projetos de restauração de ecossistemas. A meta de restauração do estado de São Paulo (1,5 milhão de hectares, anunciados ao aderir às campanhas *Race to Zero* e *Race to Resilience*) foi estabelecida de modo que possa ser atingida ocupando exclusivamente áreas exigidas por lei (Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal) e áreas de baixa aptidão agrícola hoje ocupadas por pastagens de baixa produtividade, evitando assim indesejáveis conflitos com usos produtivos da terra. Isso deve ser considerado ao interpretar os dados do estudo segmentados por uso da terra e para demais aplicações desta nota técnica.

Assim, o presente mapeamento, bem como os valores nele baseados, precisam ser utilizados com cautela.

Considerações finais

A presente Nota Técnica apresentou resultados de análises estatísticas e geoestatísticas de três mapeamentos globais de biomassa acima do solo e de um modelo de ganho potencial de biomassa adaptados para os limites territoriais do estado de São Paulo.

Com base nas análises, é possível reafirmar que a porção leste do estado concentra as maiores áreas de remanescentes florestais do estado, enquanto a porção oeste apresenta os menores valores de biomassa, e apresenta grande potencial de ganho de biomassa por meio da restauração de ecossistemas. Nesse contexto, merecem destaque as UGRHIs do Alto Paranapanema, Médio Paranapanema e Paraíba do Sul como regiões que além da grande quantidade de biomassa existente, também apresentam grande potencial para ganho de biomassa que pode ser promovida através da restauração. Essas regiões podem servir como áreas pilotos de programas voltados para restauração florestal associadas aos instrumentos do mercado de carbono e de pagamento por serviços ambientais.

No entanto, é fundamental que se leve em conta a vegetação nativa que ocorre em cada região, evitando indesejáveis ações de florestamento (do inglês, "afforestation") que resultem no plantio de florestas onde a vegetação nativa não é florestal, a exemplo de campos úmidos e campos cerrados, ocasionando em grandes prejuízos ecológicos e econômicos.

A análises dos resultados também apontam que o estado de São Paulo possui mais de 1 bilhão em biomassa acima do solo, o que equivale a mais de 500 milhões de toneladas de carbono. Há potencial biofísico para que esse valor pudesse ser até triplicado pela restauração de ecossistemas, podendo acumular mais de 2 bilhões de toneladas de carbono. Os desenhos de restauração de ecossistemas podem ser otimizados para estimular maior ganho de biomassa ou ainda otimizar a provisão de serviços

ecossistêmicos para além do carbono, por exemplo, favorecendo a manutenção e recuperação da biodiversidade através do aumento da conectividade.

A análise comparativa de mapeamentos de biomassa também reflete a alta complexidade envolvida nesse tipo de mapeamento e quão desafiador pode ser para formuladores de políticas públicas e tomadores de decisão adotarem mapeamentos voltados para estimativa de biomassa e carbono, visando sua aplicação em planos regionais. Por essa razão, o investimento em imagens de melhor resolução, uso de sensores como LiDAR e inventários da vegetação, são cruciais para melhorar a acurácia desses mapeamentos e garantir a formulação de políticas públicas com uma base robusta e confiável de informações.

Referências

- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G. B., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Asner, G. P., ... & Willcock, S. (2016). An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. *Global change biology*, 22(4), 1406-1420.
- Baccini, A. G. S. J., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., ... & Houghton, R. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature climate change*, 2(3), 182-185.
- Broadbent, E. N., Almeyda Zambrano, A. M. 2023. Global Aboveground Biomass Potential (GAP): high-resolution maps and uncertainty. Methods document downloaded on [25/03/2023] from www.speclab.org.
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Chazdon, R. L., Broadbent, E. N., Rozendaal, D. M., Bongers, F., Zambrano, A. M. A., Aide, T. M., ... & Poorter, L. (2016). Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science advances*, 2(5), e1501639.
- Chave, J., et al. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
- Cook-Patton, S. C., Leavitt, S. M., Gibbs, D., Harris, N. L., Lister, K., Anderson-Teixeira, K. J., ... & Griscom, B. W. (2020). Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth. *Nature*, 585(7826), 545-550.
- FAO. (2015). Global Forest Resources Assessment 2015: How are the world's forests changing? Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., ... & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234-240.
- Houghton, R. A. (2005). Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 11(6), 945-958.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Lima, R. A., Oliveira, A. A., Pitta, G. R., de Gasper, A. L., Vibrans, A. C., Chave, J., ... & Prado, P. I. (2020). The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. *Nature communications*, 11(1), 6347.

Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T., Salas, W., ... & Van der Werf, G. R. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9899-9904.

SOSMA & INPE. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica Período 2019–2020. Fundação SOS Mata Atlântica/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais—INPE, São Paulo, 2021.