

Estoque e sequestro de carbono em florestas e sistemas de produção agrícola - Software InVest



Foto: Sérgio Campos Tósto

Lauro Rodrigues Nogueira Júnior

Introdução

Apesar dos esforços nacionais (Brasil, 2009, 2015, 2016, 2017) e internacionais (United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998, 2018) para mitigação e adaptação às mudanças climáticas, as concentrações de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera vêm aumentando anualmente e chegaram a uma média global de 412 ppm no mês de janeiro de 2020 (Dlugokencky; Tans, 2020). Catalisar e potencializar esses esforços para o setor agropecuário e florestal na Amazônia pode ser fundamental a curto, médio e longo prazo nos cenários de aquecimento global.

Considerado como referência de gás de efeito estufa (GEE), o gás carbônico (CO₂) é utilizado pelas plantas no processo de fotossíntese, durante o qual o carbono (C) do CO₂ capturado na atmosfera é fixado nas estruturas das plantas e o oxigênio (O) é liberado. Os ecossistemas florestais e os ecossistemas agropecuários têm excelente capacidade de estocar carbono tanto na biomassa quanto no solo. Na Amazônia, mesmo em áreas de florestas primárias, onde hipoteticamente a vegetação se apresenta em estado clímax, existe um aumento periódico na biomassa florestal, que pode ser traduzido como sequestro ou remoção de CO₂ da atmosfera (Souza et al., 2012).

Além de funcionar como reguladores do clima devido ao sequestro de CO₂ da atmosfera, se manejados adequadamente os ecossistemas geram um fluxo de serviços vitais para a humanidade, como produção de alimentos e biocombustíveis, purificação de água, recreação, diversidade genética entre outros (Costanza et al., 1997; Parron; Garcia, 2015; Sharp et al., 2018). Apesar de importante, esse capital natural é pouco compreendido, pouco monitorado e, em muitos casos, está passando por rápida degradação e esgotamento.

Em regiões da Amazônia onde florestas têm sido convertidas em áreas de produção de soja, milho, carne, cana, café, entre outros produtos agropecuários, a partir da valoração monetária do sequestro de carbono em diferentes sistemas de uso e cobertura da terra, pode-se potencializar a busca pelo pagamento por serviços ambientais aos produtores rurais e contribuir com a mitigação e compensação das emissões de GEE.

Desenvolvido a partir do Natural Capital Project (Sharp et al., 2018), o software *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST) é um conjunto de modelos gratuitos e de código aberto usados para mapear e valorar os bens e serviços da natureza que sustentam e complementam a vida humana. Um dos modelos do InVEST — *Carbon Storage and Sequestration* — estima o armazenamento atual e o sequestro de carbono futuro em diferentes cenários de uso e cobertura da terra, bem como valora o carbono sequestrado em um determinado período de tempo. Nesse contexto, este capítulo teve como objetivo fomentar o entendimento sobre o sequestro de carbono como serviço ecossistêmico e a valoração do carbono por meio do software InVEST.

O carbono nos ecossistemas florestais e agrícolas

A vegetação dos ecossistemas florestais e agrícolas sequestra CO₂ atmosférico durante a fotossíntese e fixa o carbono nos componentes da biomassa vegetal. Esse processo de sequestro e fixação de carbono pela vegetação tem sido considerado uma das formas mais eficientes de reduzir as concentrações de CO₂ na atmosfera. Funciona como um armazenamento de carbono na biomassa viva acima do solo (folhas, ramos, galhos, troncos) e abaixo do solo (raízes). Além disso, por meio da ciclagem do carbono da biomassa morta ou necromassa (serapilheira e madeira

morta), as florestas são também responsáveis por aumentar o armazenamento de C orgânico no solo (biomassa microbiana e matéria orgânica do solo) (Caldeira et al., 2003, 2008).

Ou seja, nos ecossistemas florestais ou agrícolas, o carbono pode ser armazenado nos seguintes compartimentos: biomassa viva acima do solo; biomassa viva abaixo do solo; necromassa; e solo. Assim, entender e quantificar o conteúdo de carbono nesses diferentes compartimentos pode ajudar na obtenção das estimativas mais confiáveis do balanço regional e global de carbono.

Nesse sentido, nos últimos anos vem sendo registrado o esforço para estimar os estoques de carbono acima e abaixo do solo no território brasileiro (Bernoux et al., 2002; Batjes, 2005; Englund et al., 2017), especialmente com o objetivo de apoiar as estimativas e o monitoramento das emissões de GEE decorrentes de atividades de mudanças de uso da terra e de florestas e de atividades da agropecuária (Brasil, 2016). Cabe lembrar que essas duas atividades foram responsáveis por 55% das emissões de GEE no Brasil em 2015 (Sirene, 2020).

Englund et al. (2017) analisaram as diferenças entre mapas de biomassa e discutiram estatisticamente diversas situações. Segundo esses autores, diversos mapas de biomassa têm sido usados para estimar as emissões de carbono históricas, recentes e futuras da mudança de uso da terra no Brasil, usando diferentes abordagens e métodos. Eles destacam que as implicações do uso de um mapa inadequado podem ser significativas, principalmente em escalas regionais, uma vez que os mapas apresentam grandes diferenças, tanto em termos de armazenamento total de carbono quanto de sua distribuição espacial. Como resultado do trabalho, os autores discutem, apresentam e sugerem um novo mapa de carbono acima do solo para todo o território nacional.

Todavia, apesar de serem robustas e confiáveis, essas estimativas de estoques de carbono acima do solo e no solo (Bernoux et al., 2002; Batjes, 2005; Englund et al., 2017) são feitas usando metodologias que buscam abranger todo o território nacional, com erros para mais ou para menos em diferentes escalas e regiões. Assim, para determinar estoques de carbono em escala regional, o uso desses mapas e a análise dos resultados devem ser feitos com prudência.

Mesmo não estando diretamente relacionado às estimativas de biomassa e estoque de carbono no solo e na vegetação, o MapBiomás é uma iniciativa multi-institucional envolvendo universidades, organizações não governamentais (ONGs) e empresas de tecnologia que se uniram para contribuir com o entendimento das transformações do território brasileiro a partir do mapeamento anual da cobertura e do uso do solo no Brasil (Mapbiomas, 2018). Ele apresenta anualmente dados de cobertura do solo, como florestas (florestas naturais e florestas plantadas), formações naturais não florestais e uso agropecuário (pastagem, agricultura e mosaico de agricultura ou pastagem), que podem complementar a base de dados a ser utilizada em estimativas de estoques de carbono.

Estimativas de carbono em escala regional devem considerar que os diferentes tipos de florestas armazenam quantidades diferentes de carbono na biomassa, em função dos diferentes estágios de sucessão, idades, regimes de manejo, composições de espécies e teores de carbono nos componentes de cada espécie (Sanquetta, 2002). Além disso, as fitofisionomias florestais também apresentam diferenças em relação ao volume de carbono na biomassa acima do solo. Estudando o conteúdo de carbono na biomassa de florestas da Amazônia, Graça (1997) estimou estoques de carbono para diferentes fitofisionomias de florestas (densa, aberta e não densa), os quais variaram de 227 Mg C/ha a 131 Mg C/ha.

Florestas primárias e plantações adultas geralmente atingem um estágio de equilíbrio quanto à absorção de carbono, mediante a decomposição da madeira morta e das árvores em senescência (Arevalo et al., 2002). Entretanto, estudando a dinâmica e o estoque de carbono em floresta primária

na região de Manaus, Souza et al. (2012) verificaram que o estoque de C passou de 173,63 Mg C/ha em 2005 para 181,01 Mg C/ha em 2010, confirmando que a floresta acumulou 7,38 Mg C/ha no período, com média anual de 1,5 Mg C/ha. Outro estudo (Higuchi et al., 2004) da dinâmica e do balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central constatou fixação de carbono da ordem de 1,2 Mg C/ha por ano.

Estudos indicam que, de maneira geral, as florestas secundárias e as plantações jovens são as que fixam mais carbono anualmente. Estudando o estoque e a dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus/AM, Silva (2007) estimou incremento médio anual por hectare de 10,8 e 10,6 Mg de biomassa para capoeiras de 14 e 23 anos, respectivamente. Se considerarmos que 47% dessa biomassa seja carbono, conforme recomendado por Penman et al. (2003), pode-se estimar um incremento médio anual por hectare em torno de 5 Mg de C.

Ao estimarem o estoque de carbono de sistemas agroflorestais (SAFs) em várzeas do Rio Juba, no município de Cametá, Pará, Santos et al. (2004) verificaram que a média de 134,3 Mg C/ha do estoque de carbono em diferentes SAFs com idade média de 12 anos representou, em média, cerca de 96% do carbono que é estocado em uma floresta primária de terra firme, cerca de 62% a mais que o estocado em florestas secundárias enriquecidas (idade média de 26 meses) e 23% a mais que o estocado em florestas de várzeas na Amazônia Brasileira. Ao estudar quatro SAFs, Brancher (2010) encontrou produtividade primária líquida (em Mg C/ha/ano) de: 2,54 para o SAF de 14 anos com cacau, açaí, bananeira e seringueira; 6,11 para o SAF de 14 anos com cacau, açaí, bananeira, teperebá, paricá e macacaúba; 9,54 para o SAF de 9 anos com cupuaçu, açaí, teca e mogno; e 16,27 para o SAF de 9 anos com cupuaçu, açaí e paricá. Na Amazônia, além de serem importantes para produção agrícola e florestal, os SAFs vêm se tornando uma importante prática agrícola voltada à prestação de serviços ambientais.

Entretanto, deve-se considerar que a degradação da floresta leva a redução expressiva de carbono em todos os compartimentos. Trabalho desenvolvido na Amazônia indicou que, em áreas conservadas, a biomassa viva acima do solo teve a maior participação no estoque total de carbono, mas, com a degradação da floresta, o solo foi o compartimento com maior participação no estoque total, apesar da drástica redução do estoque de carbono pela degradação (Zelarayán et al., 2015).

Na Amazônia, os cenários mais comuns de mudança no uso da terra têm sido a conversão de ecossistemas florestais nativos para pastagens e agricultura ou para ecossistemas agropecuários (Carvalho, 2010). A implantação de pastagens destinadas à pecuária de corte tem sido baseada em sistemas extensivos, os quais podem se apresentar como dreno ou fonte de CO₂. Normalmente, os sistemas extensivos em solos de baixa fertilidade e com baixo uso de tecnologias resultam em baixa produção de forragem (cobertura do solo) e raízes, com consequente degradação do solo e emissão de CO₂ para a atmosfera. Já os sistemas extensivos em solos de média a alta fertilidade com alto uso de tecnologias resultam em alta produção de forragem (cobertura do solo) e raízes, com consequente conservação e aumento no armazenamento de carbono no solo. Conforme Carvalho (2010), pastagens em solos com baixa fertilidade natural apresentaram perdas de C entre 0,15 e 1,53 Mg C/ha/ano, respectivamente para pastagens bem e mal manejadas. Já em pastagens cultivadas em solos de alta fertilidade natural e com manejo adequado, o solo acumulou 0,46 Mg C/ha/ano.

Já a implantação agrícola tem sido baseada principalmente na soja como cultura de verão, em sucessão com milho, sorgo, milheto ou pousio. Inicialmente os cultivos agrícolas eram feitos com preparo convencional do solo, mas atualmente vêm sendo feitos em sistemas de plantio direto (SPD). Apesar da elevada produtividade, dos ganhos econômicos e da conservação do solo com SPD, as sucessões de cultivos mais utilizadas não resultam em produção de palhada suficiente

para conferir sustentabilidade ao sistema produtivo. Isso devido às altas temperaturas e elevadas precipitações acelerarem o processo de decomposição da matéria orgânica do solo. Conforme Carvalho (2010), em áreas sob agricultura, com a soja como cultura principal, o solo comporta-se como fonte de carbono para a atmosfera, independentemente do tipo de solo, da condição climática predominante e do manejo aplicado. Mesmo cultivadas em SPD, as áreas sob cultivo emitem carbono para a atmosfera, com taxas de perdas que variam entre 0,69 e 1,44 Mg C/ha/ano (Carvalho, 2010).

Os resultados apresentados por Carvalho (2010) indicam que a conversão de áreas sob sucessão de cultivos para sistemas de integração lavoura–pecuária (ILP) tem grande potencial de acumular C no solo e reduzir as emissões de CO₂ para a atmosfera. Segundo o autor, a conversão de áreas sob preparo convencional para SPD exibe taxas de acúmulo de C da ordem de 0,50 Mg C/ha/ano. Já a adoção de ILP em áreas sob sucessão de cultivos, ambos em SPD, resulta em acúmulos de carbono muito maiores, que variam de 0,84 a 2,58 Mg C/ha/ano. Nas três áreas desse estudo, a ILP foi entre a soja e a braquiária, mas em alguns casos a soja foi sucedida por milho ou sorgo. Por isso, a melhor alternativa para conduzir o ecossistema agropecuário a um balanço positivo do carbono atualmente tem sido a ILP.

No solo, o teor de carbono é importante, pois, em escala global, os solos estocam pelo menos duas vezes mais carbono que a atmosfera. Apesar de os Argissolos (40,99%), Latossolos (31,32%), Gleissolos (7,11%) e Neossolos (6,89%) representarem cerca de 86,31% dos solos na Amazônia Brasileira, existe grande diversidade geológica nessa vasta região (IBGE, 2020), a qual, aliada ao relevo e clima, pode resultar em diferentes potenciais de armazenamento de carbono.

No caso da estimativa do estoque de carbono nos solos brasileiros, os relatórios de referência (Brasil, 2016) utilizaram o estudo *Brazil's Soil Carbon Stocks*, de Bernoux et al. (2002). Esse estudo foi fundamentado: na elaboração de um mapa representativo da associação do mapa de solo (Embrapa, 1981) com o mapa da vegetação (IBGE, 1988), na escala 1:5.000.000; em uma base de dados de vegetação nativa e perfis de solo, com informações de concentração de carbono, densidade e tipo de solo; no cálculo dos valores de estoques de carbono representativos para cada categoria de associação de solo/vegetação; e na subsequente produção do mapa da distribuição dos estoques de carbono nos solos brasileiros. Entretanto, o estudo de Bernoux et al. (2002) apenas estima o “potencial” de estoque de carbono nos solos do território nacional.

A variação do estoque de carbono no solo ocorre também conforme o uso e manejo desse recurso (Laurance et al., 1999; Trumbore; Camargo, 2009; Santos et al., 2018). Estudando a mudança no estoque de carbono do solo devido ao uso agrícola da terra no sudoeste da Amazônia (Mato Grosso e Rondônia), Belizário (2008) encontrou, na camada de 0–30 cm de profundidade, médias de estoques de carbono de 42 Mg C/ha para floresta nativas, 47 Mg C/ha para pastagens, 46 Mg C/ha para culturas perenes, 51 Mg C/ha para agriculturas em plantio convencional e 49 Mg C/ha para agriculturas em SPD.

Valoração do sequestro de carbono por meio do software InVEST

Um dos objetivos deste capítulo é subsidiar o entendimento sobre o uso do software InVEST como potencial ferramenta para análise do armazenamento e valoração do sequestro de carbono em florestas e sistemas de produção agrícola em áreas sob diferentes usos e cobertura da terra na Amazônia. Desenvolvido a partir do Natural Capital Project (Sharp et al., 2018), o InVEST é uma

suíte de modelos de software gratuitos e de código aberto usados para mapear e valorar os bens e serviços da natureza que sustentam e complementam a vida humana. O InVEST faz uma avaliação integrada de serviços ecossistêmicos e custos de oportunidade. Para baixar o software, acesse <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.

O modelo *Carbon Storage and Sequestration* estima o armazenamento atual e o sequestro de carbono futuro em diferentes cenários de uso e cobertura da terra, bem como valora o carbono sequestrado em um determinado período. Ele agrega a quantidade de carbono armazenada nos compartimentos (biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo, matéria orgânica morta e solo) de acordo com mapas de uso da terra e classificações fornecidas pelo usuário. Com mapas de uso/cobertura da terra e da quantidade de carbono, o modelo estima de forma georreferenciada a quantidade líquida e o valor do carbono sequestrado/armazenado ao longo do tempo.

Todavia, as limitações do modelo incluem: ciclo de carbono simplificado; mudança linear no sequestro de carbono ao longo do tempo; e taxas de desconto potencialmente imprecisas. Resumidamente, na Tabela 1 são apresentados os passos, as fases, os dados necessários, os processos e dados de saída da estimativa e valoração do carbono (C) sequestrado.

O modelo mapeia densidades de carbono para diferentes usos/coberturas da terra e resume resultados rasterizados de estoque, sequestro, valor e totais agregados. Assim, as saídas são expressas como Mg de C por pixel e em valor monetário por pixel.

O modelo requer estimativa do estoque de carbono em pelo menos um dos compartimentos citados acima. Entretanto, os resultados modelados são melhores usando dados de mais de um compartimento. Aplicam-se as estimativas ao mapa de uso e de cobertura da terra para produzir um mapa de estoque de carbono. Com um mapa de uso e de cobertura da terra atual e futuro, a

Tabela 1. Fases, dados necessários, processos e dados de saída da estimativa e valoração do carbono (C) sequestrado conforme o modelo *Carbon Storage and Sequestration* do software InVEST.

Fases	Dados necessários	Processos	Dados de saída
Obrigatório	Uso do solo / cobertura do solo C na biomassa acima do solo C na biomassa abaixo do solo C na matéria orgânica morta C no solo	Procura o estoque de C por pixel	Estoque de C total (Mg/pixel)
Opcional	C removido pela colheita de madeira Primeiro ano de colheita de madeira Frequência de colheita Meia-vida dos produtos madeireiros Densidade de C na madeira colhida Fator de conversão de biomassa	Calcula C estocado nos produtos da madeira colhida por pixel	Estoque de C total, incluindo o dos produtos (Mg/pixel)
	Uso do solo / cobertura do solo futuro	Calcula a diferença entre os estoques de C	Sequestro de C (Mg/pixel/ano)
Opcional	Valor do C sequestrado Taxa de desconto Intervalo de tempo Taxa anual de mudança de preço do C	Calcula o valor do C	Valor do C sequestrado (moeda/pixel/ano)

Fonte: Sharp et al. (2018)¹.

¹ Para informações detalhadas, acesse <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>.

mudança líquida no estoque de carbono ao longo do tempo (sequestro ou perda) e seu valor podem ser calculados. As diferenças entre o cenário atual e vários cenários futuros podem ser comparadas.

A avaliação econômica só pode ser feita para um cenário futuro, e é aplicada ao sequestro de carbono, não ao estoque. Estima o valor econômico do sequestro de carbono como uma função da quantidade de carbono sequestrado, o valor monetário de cada Mg de C, uma taxa de desconto monetário e uma taxa referente à mudança no valor do sequestro de carbono ao longo do tempo. A primeira taxa de desconto, procedimento econômico padrão de desconto financeiro, reflete o fato de as pessoas geralmente valorizarem mais os benefícios imediatos que os benefícios futuros, devido à impaciência e ao crescimento econômico incerto. A segunda taxa de desconto ajusta o valor social do sequestro de carbono ao longo do tempo. Caso o carbono sequestrado hoje tenha maior impacto na mitigação das mudanças climáticas que o carbono sequestrado no futuro, essa segunda taxa será positiva. Caso o carbono sequestrado hoje tenha menor impacto na mitigação das mudanças climáticas que o carbono sequestrado no futuro, essa segunda taxa será negativa. Há três meios para obter o valor monetário do carbono:

- 1) valor social,
- 2) valor do carbono sequestrado, e
- 3) valor de mercado (crédito de carbono).

O valor social de um Mg de C sequestrado é o dano social evitado por não liberar um Mg de C na atmosfera ou o dano marginal associado à emissão de um Mg de C na atmosfera.

Estimativas sugerem que o custo social do carbono, ou o dano marginal associado à emissão de um Mg de C na atmosfera, varia de US\$ 32 (Nordhaus, 2007) a US\$ 326 (Stern, 2007) por Mg de C, em dólares americanos de 2010. Atualmente, o mercado de carbono está estabelecido em bolsas de valores nos Estados Unidos e na Europa, as quais normalmente estão associadas ao mercado voluntário de créditos de carbono. Na Bolsa de Valores de Nova York (Nyse, 2019), o carbono tem sido comercializado pelo fundo SPDR INDEX SHARES FUNDS SPDR MSCI ACWI LOW CARBON TARGET ETF LOWC. Apesar do exposto acima, geralmente o valor do C sequestrado equivale ao valor da tecnologia de menor custo para sequestrar determinada massa de carbono.

O modelo *Carbon Storage and Sequestration* do InVEST apresenta-se como potencial ferramenta para a avaliação do custo de oportunidade de forma georreferenciada, e é um diferencial, visto que estudos econômicos geralmente não levam em consideração o fator espacial.

Cabe destacar que o estoque/sequestro de carbono depende dos tamanhos dos reservatórios:

- 1) biomassa acima do solo – material vegetal vivo acima do solo;
- 2) biomassa abaixo do solo – sistemas radiculares vivos;
- 3) matéria orgânica morta – serapilheira e madeira morta;
- 4) solo – matéria orgânica do solo.

Dados secundários de solo e vegetação obtidos dos estudos técnicos e científicos desenvolvidos na Amazônia podem ser utilizados para rodar o modelo *Carbon Storage and Sequestration* do software InVEST, buscando como resultado final a valoração do sequestro de carbono.

Os autores do software InVEST também apresentam sugestões para encontrar, compilar e formatar dados. As sugestões são atualizadas conforme novas fontes de dados tornam-se disponíveis. Seguem alguns exemplos.

- 1) Uso / cobertura da terra: Dados da Nasa de cobertura global de vários anos do Modis fornecidos em várias classificações².
- 2) Carbono na biomassa acima do solo: Metodologia do Painel Intergovernamental Sobre as Mudanças Climáticas (IPCC) de 2006³.
- 3) Carbono no solo: Estoques de carbono no primeiro metro de solo pelo Sistema de Classificação Life Zone da Holdridge, com mapa GIS dessas zonas⁴.

Considerações finais

Nesse contexto, o modelo *Carbon Storage and Sequestration* do software InVEST apresenta-se como potencial ferramenta para a valoração do sequestro de carbono na Amazônia. Em virtude das pesquisas e dos trabalhos realizados por instituições de pesquisa e ensino, bem como do setor público, privado e do terceiro setor, dados secundários de solo e vegetação podem ser obtidos dos estudos técnicos e científicos realizados na Amazônia. Esses dados podem ser utilizados como dados de entrada para rodar o modelo *Carbon Storage and Sequestration* do software InVEST, buscando como resultado final a valoração do sequestro de carbono em diferentes situações de uso e cobertura da terra no bioma Amazônia.

A implementação de PSA na Amazônia tem despertado o interesse de agricultores, políticos e da sociedade em geral, em busca da necessidade de mudança no manejo dos recursos naturais, pois pode contribuir para reduzir o desmatamento e para mitigar as mudanças climáticas, além de melhorar condições de vida das populações locais.

Referências

- AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; MONTOYA VILCAHUAMAN, L. J. **Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 40 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 73).
- BATJES, N. H. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. **Soil Use and Management**, v. 21, p. 22–24, 2005.
- BELIZÁRIO, M. H. **Mudança no estoque de carbono do solo devido ao uso agrícola da terra no sudoeste da Amazônia**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, ESALQ – USP.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. DA C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's Soil Carbon Stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 888-896, 2002.
- BRASIL. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF, 2016. 4 v.
- BRASIL. **Lei Nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Dispõe sobre a Política Nacional sobre Mudança do Clima, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 30 ago. 2018.

² Disponíveis em: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mcd12q1.

³ Disponíveis em: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf.

⁴ Disponíveis em: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=f3ec7241777f4c56a69ae14d2a98e44b>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 4. ed. Brasília, DF: MCTIC, 2017. 89 p. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/>. Acesso em: 28 ago. 2018.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**: Relatórios de referência – setor uso da terra, mudança do uso da terra e florestas. Brasília, DF: MCTIC, 2015. 342 p. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 28 ago. 2018.

BRANCHER, T. **Estoque e ciclagem de carbono de sistemas agroflorestais em Tomé-Açu, Amazônia Oriental**. 2010. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará.

CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BARICHELLO, L. R.; VOGEL, H. L. M. Determinação de Carbono Orgânico em Povoamentos de *Acacia mearnsii* de Wild. Plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v.1, n. 2, p.47-54, 2003.

CALDEIRA, M. V. W.; VITORINO, M. D.; SCHAADT, S. S.; MORAES, E.; BALBINOT, R. Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. **Semina**, v. 29, n. 1, p.53-68, 2008.

CARVALHO, J. L. N. **Dinâmica do carbono e fluxo de gases do efeito estufa em sistemas de integração lavoura-pecuária na Amazônia e no Cerrado**. 2010. 141 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R. V.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, p. 253-260, 1997.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. Disponível em: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/. Acesso em: 17 abr. 2020.

EMBRAPA. **Mapa de Solos do Brasil, escala 1:5.000.000**. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1981.

ENGLUND, O.; SPAROVEK, G.; BERNDES, G.; FREITAS, F.; OMETTO, J. P.; OLIVEIRA, P. V. de C.; COSTA JUNIOR, C.; LAPOLA, D. A new high-resolution nationwide aboveground carbon map for Brazil. **Geo: Geography and Environment**, v. 4, n. 2, p. 1-12. 2017.

GRAÇA, P. M. L. A. **Conteúdo de carbono da biomassa florestal na Amazônia e alterações após a queima**. 1997. 105 f. Dissertação (Mestrado) – ESALQ, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J. dos; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M.; SILVA, R. P. da; ROCHA, R. de M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 295-304, 2004.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de vegetação do Brasil, escala 1:5.000.000**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1988.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA)**. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acesso em: 9 jun. 2020.

LAURANCE, W. F. FEARNESIDE, P. M.; LAURANCE, S. G. W.; DELAMÔNICA, P.; LOVEJOY, T. E.; RANKIN-DE MÉRONA, J. M.; CHAMBERS, J. Q.; GASCON, C. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. **Forest Ecology and Management**, v. 118, p. 127-138, 1999.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>. Acesso em: 30 ago. 2018.

NORDHAUS, W. A Review of the Stern Review on the Economics of Global Warming. **Journal of Economic Literature**, v. 45, p. 686-702, 2007.

NYSE. **The New York Stock Exchange**. Disponível em: <https://www.nyse.com/quote/ARCX:LOWC>. Acesso em: 1 ago. 2019.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R. Serviços ambientais: conceitos, classificação, indicadores e aspectos correlatos. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 29-35. Capítulo 1.

PENMAN, J.; GYTARSKI, M.; HIRASHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K.; WAGNER, F. (ed.). **Definitions and Methodological Options to Inventory Emissions from Direct Human-Induced Degradation of Forests and Devegetation of Other Vegetation Types**. Japan: IPCC: IGES, 2003.

SANQUETTA, C. R. Métodos de Determinação de Biomassa Florestal. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. dos S. (ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: Ed. da UFPR, 2002. p. 253.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, S. R. M. dos; MIRANDA, I. de S.; TOURINHO, M. M. Estimativa de biomassa de sistemas agroflorestais das várzeas do rio Juba, Cametá, Pará. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 1, p.1-8, 2004.

SHARP, R.; TALLIS, H. T.; RICKETTS, T.; GUERRY, A. D.; WOOD, S. A.; CHAPLIN-KRAMER, R.; NELSON, E.; ENNAANAY, D.; WOLNY, S.; OLWERO, N.; VIGERSTOL, K.; PENNINGTON, D.; MENDOZA, G.; AUKEMA, J.; FOSTER, J.; FORREST, J.; CAMERON, D.; ARKEMA, K.; LONSDORF, E.; KENNEDY, C.; VERUTES, G.; KIM, C. K.; GUANNEL, G.; PAPPENFUS, M.; TOFT, J.; MARSIK, M.; BERNHARDT, J.; GRIFFIN, R.; GLOWINSKI, K.; CHAUMONT, N.; PERELMAN, A.; LACAYO, M.; MANDLE, L.; HAMEL, P.; VOGL, A. L.; ROGERS, L.; BIERBOWER, W.; DENU, D.; DOUGLASS, J. **InVEST 3.7.0 User's Guide**. The Natural Capital Project; Stanford University; University of Minnesota; The Nature Conservancy; World Wildlife Fund, 2018.

SILVA, R. P. **Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM)**. 2007. 152 f. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisadas da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

SIRENE. **Sistema de Registro Nacional de Emissões**. Disponível em: https://sirene.mctic.gov.br/portal/opencms/paineis/2018/08/24/Emissoes_em_dioxido_de_carbono_equivalente_por_setor.html. Acesso em: 9 jun. 2020.

SOUZA, C. R. de; AZEVEDO, C. P. de; ROSSI, L. M. B.; SILVA, K. E da; SANTOS, J. dos; HIGUCHI, N. Dinâmica e estoque de carbono em floresta primária na região de Manaus/AM. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 4, p. 501-506, 2012.

STERN, N. **The Economics of Climate Change: the stern review**. Cambridge; New York: Cambridge University Press. 2007.

TRUMBORE, S.; CAMARGO, P. B. de. Dinâmica do Carbono do Solo. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; DIAS, P. S. (ed.). **Amazonia and Global Change**. American Geophysical Union, 2009. p. 451-462.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. 1998. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2019.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **UN Climate Change Annual Report**. 2018. Disponível em: <https://unfccc.int/annualreport>. Acesso em: 1 ago. 2019.

ZELARAYÁN, M. L. C.; CELENTANO, D.; OLIVEIRA, E. C.; TRIANA, S. P.; SODRÉ, D. N.; MUCHAVISOY, K. H. M.; ROUSSEAU, G. X. Impacto da degradação sobre o estoque total de carbono de florestas ripárias na Amazônia Oriental, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 45, n. 3, p. 271-282, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201500432>. Acesso em: 1 ago. 2019.