

Pegada de CO₂ da madeira nativa destinada à construção civil proveniente de diferentes tipos de exploração florestal

CO₂ footprint from native lumber used in the construction industry from different types of harvesting

Cássio Gomes de Oliveira 

Katia Regina Garcia Punhagui 

Lidiane Santana Oliveira 

Fernanda Belizário Silva 

Resumo

O uso da madeira é frequentemente apontado como uma estratégia de descarbonização para a construção. Entretanto, a pegada de CO₂ da madeira nativa, ou seja, que são as emissões decorrentes da sua exploração florestal, transporte e beneficiamento, depende do tipo de manejo florestal. Este estudo quantifica a pegada de CO₂ da madeira nativa serrada bruta, proveniente de três tipos de exploração florestal: manejo sustentável, manejo convencional e extração seletiva convencional (desmatamento). Analisaram-se as emissões de CO₂ da exploração florestal até o término do beneficiamento da madeira, com dados da literatura e do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção. A pegada de CO₂ da madeira serrada bruta varia entre 25 e 19.860 kg CO₂/m³, com os menores valores para a madeira de manejo sustentável e os maiores para a madeira de extração seletiva convencional. Além disso, a madeira manejada estoca temporariamente, em sua estrutura celular, ~353 kgC/m³. Madeiras nativas de manejo florestal sustentável podem contribuir com a descarbonização dos edifícios, enquanto as madeiras de manejo convencional e, sobretudo, de desmatamento são fontes expressivas de CO₂ dentro do seu ciclo de vida.

Palavras-chave: Madeira nativa. Exploração florestal. Pegada de dióxido de carbono. Construção civil. Ciclo de vida.

Abstract

The use of wood is often indicated as a decarbonization strategy for the construction sector. However, the CO₂ footprint of native wood, that is, the emissions during wood harvesting, transportation, and processing, depends on the type of forest management practiced. This study quantifies the CO₂ footprint of native rough sawn lumber from forests with three types of harvesting: sustainable management, conventional management, and conventional selective extraction (deforestation). CO₂ emissions were analyzed from harvesting to the end of wood processing based on data from the literature and the Construction Environmental Performance Information System. The CO₂ footprint of rough sawn lumber varies between 25 and 19,860 kg CO₂/m³, with the lowest values for wood from sustainable management and the highest for conventional selective extraction. In addition, managed wood stores temporarily in its cell structure ~353 kgC/m³. Native wood from sustainable harvesting can contribute to decarbonizing buildings, whereas wood from conventional harvesting and deforestation are relevant sources of CO₂ emissions, considering the wood life cycle.

Keywords: Native wood. Harvesting. Carbon dioxide footprint. Civil construction. Life cycle.

¹Cássio Gomes de Oliveira

¹Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Foz do Iguaçu - PR - Brasil

²Katia Regina Garcia Punhagui

²Universidade Federal da Integração Latino-Americana
Foz do Iguaçu - PR - Brasil

³Lidiane Santana Oliveira

³Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

⁴Fernanda Belizário Silva

⁴Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

Recebido em 17/04/23

Aceito em 07/08/23

Introdução

A mudança climática tem causado cada vez mais desastres, tais como enchentes e deslizamentos, que afetam principalmente a parcela mais vulnerável da população, inclusive no Brasil. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) recomenda que as emissões líquidas globais de CO₂, que é o principal gás de efeito estufa, sejam reduzidas a zero (*net-zero*) até o ano de 2050 para limitar o aquecimento global e seus efeitos adversos (IPCC, 2022). Descarbonizar a construção é essencial para atingir esta meta, pois este setor contribui com aproximadamente 37% das emissões globais de CO₂, considerando a produção dos materiais, a construção e a operação dos edifícios (UNEP, 2022).

O uso da madeira é frequentemente apontado como uma estratégia para descarbonizar a construção (Churkina *et al.*, 2020), uma vez que as árvores absorvem carbono da atmosfera pela fotossíntese. A madeira de construção pode ser proveniente tanto de florestas plantadas especificamente para esta finalidade, quanto de florestas nativas. Enquanto as florestas plantadas usualmente são monoculturas (por exemplo, pinus e eucalipto), as florestas nativas preservam a biodiversidade, o que também é essencial para garantir o equilíbrio natural e a segurança alimentar para o futuro (UNEP, 2020).

Entretanto, o quão “sustentável” é a madeira nativa depende da forma como a floresta é explorada, uma vez que a intensidade de extração de biomassa impacta na capacidade de recuperação da floresta e nos seus estoques de carbono. Sendo assim, é primordial avaliar o impacto das diferentes formas de exploração florestal sobre a pegada de CO₂ da madeira nativa, ou seja, as emissões de CO₂ que ocorrem durante o seu ciclo de vida, desde a sua extração na floresta, passando pelo seu beneficiamento e transporte. O conhecimento da pegada de CO₂ da madeira nativa permite que profissionais e consumidores possam tomar decisões mais bem embasadas, bem como fortalecer melhores práticas e implementar políticas públicas de fomento às cadeias com maior potencial de produção sustentável.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é quantificar a pegada de CO₂ da madeira nativa serrada destinada à construção, do berço ao portão, ou seja, da floresta até a saída da serraria, considerando três opções de exploração florestal: extração seletiva convencional, manejo convencional e manejo sustentável.

Referencial teórico

Madeira e as emissões de carbono

Primeiramente, é necessário esclarecer alguns conceitos relativos à interface entre a produção madeireira e o ciclo do carbono. As árvores, assim como quaisquer outras plantas, absorvem CO₂ da atmosfera e o convertem em celulose (C₆H₁₀O₅), hemicelulose (C₅H₈O₄ ou C₆H₁₀O₅) e lignina (C₉H₁₀O₂, C₁₀H₁₂O₃ ou C₁₁H₁₄O₄), que são as substâncias que compõem a biomassa – raízes, troncos, galhos e folhas. Desse modo, as árvores “fixam” o carbono da atmosfera em sua biomassa (Ramage *et al.*, 2017). A “remoção” de carbono da atmosfera ocorre enquanto a árvore está em crescimento pois, uma vez que a árvore esteja madura e tenha atingido seu tamanho máximo, a absorção e a emissão de CO₂ pela árvore entram em equilíbrio – o CO₂ absorvido é transformado em glicose (C₆H₁₂O₆), que é consumida pela árvore e novamente convertida em CO₂ (Sedjo; Sohngen, 2012). Quando uma árvore morre, a decomposição da sua matéria orgânica emite novamente o carbono para a atmosfera, na forma de CO₂ se a decomposição for aeróbia (na presença de oxigênio) ou na forma de CH₄ (metano) se a decomposição for anaeróbia (sem oxigênio) (Mitchard, 2018). Ou seja, analisando-se uma árvore isoladamente, simplificada, pode-se considerar que ela é neutra em emissões de CO₂ ao longo do seu ciclo de vida.

Em princípio, florestas nativas maduras apresentam um equilíbrio entre as plantas que morrem e as novas plantas que nascem, de modo que elas servem como um grande estoque de carbono no planeta (Green; Keenan, 2022). Quando uma área de floresta nativa é desmatada, ou seja, quando toda a biomassa é suprimida (por exemplo, através de queimadas para a produção de pasto), aquela quantidade de carbono que antes estava estocada na biomassa florestal é emitida na forma de CO₂, aumentando sua concentração na atmosfera, o que contribui para o aquecimento global (Baccini *et al.*, 2017; Covey *et al.*, 2021). Por outro lado, se uma floresta nativa for explorada de uma forma que permita a regeneração da biomassa em seu estado original, o CO₂ emitido em função da exploração florestal será absorvido pela “nova biomassa” em crescimento, de modo que o estoque de carbono se recompõe e a floresta não contribui para o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (Mazzei *et al.*, 2010; Numazawa *et al.*, 2017; Sasaki *et al.*, 2016). Assim, o balanço entre emissões e remoções de CO₂ depende da forma como a biomassa é extraída da floresta.

Além do balanço de carbono da floresta, há outras emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de produtos de madeira, que se devem ao consumo de combustíveis fósseis em atividades de transporte e beneficiamento da

madeira, ou de eletricidade, quando esta é gerada a partir de fontes fósseis (por exemplo, termelétricas a gás natural ou geradores a diesel) (Punhagui, 2014).

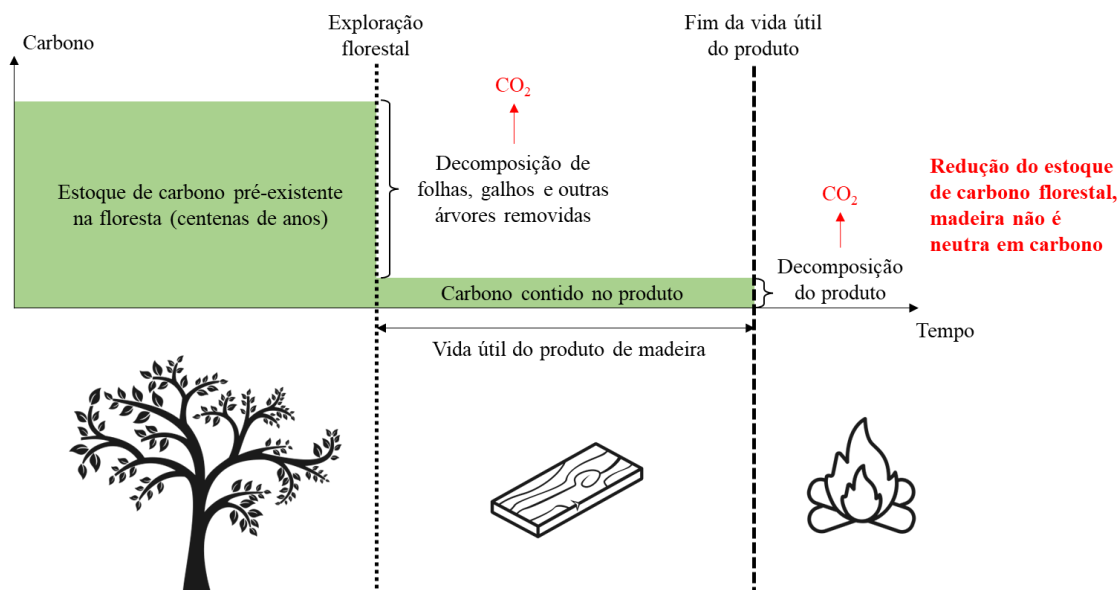
O carbono estocado na biomassa da madeira é denominado como “estoque temporário de carbono biogênico”. O estoque é dito temporário pois, ao final da sua vida útil, a madeira pode ser queimada ou decomposta e liberar CO₂ novamente para a atmosfera. Embora edifícios tenham uma vida útil longa – no mínimo 50 anos de acordo com a NBR 15575-1 – este tempo é baixo para que a madeira seja considerada como um sorvedouro de carbono, ou *carbon sink*. A floresta nativa amazônica, por sua vez, pode ser considerada estoque de carbono de centenas de anos, assim como outros recursos naturais fósseis.

Formas de exploração de florestas nativas

A indústria da construção utiliza a madeira nativa, de origem majoritariamente amazônica, em diversas aplicações duradouras e provisórias (Sobral *et al.*, 2002). A especificação de madeiras nativas se deve tanto a questões estéticas – por exemplo, a preferência de arquitetos pela aparência de certas espécies – quanto por questões técnicas, uma vez que espécies nativas apresentam alta densidade, resistência e, dependendo da espécie, durabilidade natural contra biodeterioração (Zenid, 2009). O uso de madeira nativa pode também contribuir para o desempenho ambiental dos edifícios; entretanto, isso depende da forma como é feita a exploração florestal. Neste trabalho, são consideradas três formas principais de exploração florestal: extração seletiva convencional, manejo convencional e manejo sustentável.

A **extração seletiva convencional (ESC)** não tem plano de manejo e, na maior parte dos casos, é ilegal (Saraiva, 2020). Apesar disso, estima-se que de 34 a 95% da madeira nativa utilizada na construção provém desta forma de extração (Wellesley, 2014). Tal atividade resulta em excessivos danos à biomassa florestal, devido à abertura de vias de acesso e de pátios de estocagem, transporte sem planejamento e derrubada de árvores sem técnicas apropriadas (Espada *et al.*, 2016). Ademais, a extração de árvores sem manejo frequentemente precede atividades agropecuárias (Cederberg *et al.*, 2011; Righi *et al.*, 2009), não permitindo o restabelecimento da floresta pós-corte (Van Gardingen; Valle; Thompson, 2006). Nesta situação, o carbono que estava estocado na floresta é liberado para a atmosfera e, como não é sequestrado novamente pelo processo de fotossíntese na recomposição da biomassa, aumenta a concentração de CO₂ na atmosfera, sendo considerado emissão com efeito equivalente à emissão de CO₂ de origem fóssil (Campos, 2012). Vale ressaltar que mesmo desmatamentos autorizados contribuem para o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera devido à supressão permanente da biomassa da floresta nativa. A extração de madeira e queimadas chegaram a colaborar com um valor próximo de 30% das emissões de CO₂ da Floresta Amazônica brasileira entre 2006 e 2016 (Assis *et al.*, 2020) (Figura 1).

Figura 1 - Esquema ilustrativo referente ao balanço de carbono acima do solo para a madeira nativa de Extração Seletiva Convencional (ESC)

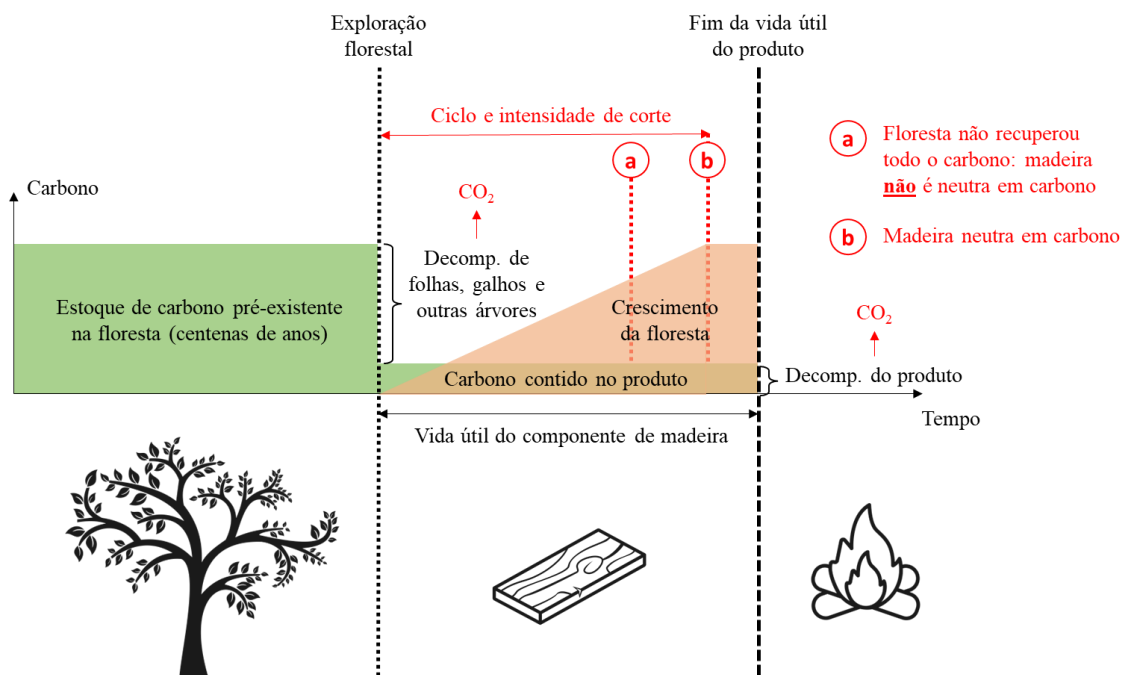


O **manejo convencional** é o manejo conforme a regulamentação ambiental brasileira, nomeadamente a Instrução Normativa MMA nº 5 de 11/12/2006 (Brasil, 2006) e a resolução CONAMA nº 406 de 02/02/2009 (Brasil, 2009). As florestas nativas são concedidas para a exploração florestal, que deve seguir um documento denominado Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). O plano de manejo divide a área da floresta em Unidades de Produção Anual (UPAs), que devem ser explorados no regime de rodízio, para permitir a recuperação da floresta após a extração das espécies com interesse comercial (Espada *et al.*, 2016). O plano também estabelece a intensidade máxima de extração de madeira (em metros cúbicos por hectare – m³/ha) e define o tempo de retorno¹ a cada UPA. No manejo convencional, a intensidade máxima de exploração florestal é de 30 m³/ha e o tempo de retorno é de 25 a 35 anos, considerando um diâmetro mínimo de altura do peito das árvores de 50 cm.

Entretanto, há evidências de que os parâmetros constantes da regulamentação ambiental brasileira não permitem a recomposição total da biomassa florestal (Numazawa *et al.*, 2017). Neste caso, não se pode admitir que a madeira seja neutra em carbono, pois a parcela da floresta que não se recompõe contribui com o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (situação (a) representada na Figura 2).

O **manejo sustentável**² de florestas nativas adota intensidades de exploração florestal menores do que o manejo convencional, inferior a 15 m³/ha, o que permite que a biomassa florestal se recomponha dentro do período de retorno de uma UPA (Mazzei *et al.*, 2010; Numazawa *et al.*, 2017). Ademais, o manejo sustentável deve seguir boas práticas como: corte direcional da árvore; teste de oco; avaliação do rendimento; uso de técnica de corte específica para cada espécie; método de corte que amplie o aproveitamento do material conforme uso; planejamento, mapeamento e sinalização de trilhas de arraste das toras aos pátios com o uso de técnicas que causem menos danos à biomassa do entorno (Espada *et al.*, 2016; Nogueira *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2022). Neste caso, pode-se admitir que a madeira seja neutra em carbono no que diz respeito ao balanço de carbono na floresta (situação (b) representada na Figura 2); ou seja, emite a mesma quantidade de carbono que absorve ao longo do tempo de exploração florestal de uma UPA.

Figura 2 - Esquema ilustrativo referente ao balanço de carbono acima do solo para a madeira nativa de manejo



Nota: a situação (a) representa o manejo convencional e a situação (b), o manejo sustentável.

¹Tempo de espera entre dois ciclos de corte consecutivos em uma mesma Unidade de Produção Anual (UPA).

²"Manejo sustentável" é uma denominação dada pelos autores.

Este estudo foca no carbono acima do solo, referente à parte aérea da árvore (tronco e copa), que é extraída para a produção de madeira para a construção civil (uso efetivo do caule). O carbono abaixo do solo (raízes e matéria orgânica contida no solo) não foi considerado, pois sua quantificação é complexa, depende de variáveis não abordadas no escopo da pesquisa; e não há uma metodologia única consolidada para esta finalidade (Smith *et al.*, 2019; Spawn *et al.*, 2020). Entretanto, estimativas apontam que esta parcela representa de 35,9 a 70% do estoque de carbono das florestas (Dantas *et al.*, 2020; Jones *et al.*, 2019; SISTEMA..., 2021). A intensidade de extração da madeira está diretamente relacionada aos estoques de carbono no solo, pois quanto maior a intensidade, menor o estoque disponível ao longo do tempo (Rozak *et al.*, 2018). Quando há recuperação da biomassa florestal acima do solo, como acontece no manejo sustentável, os estoques de carbono abaixo do solo tendem a se recuperar (Camargo *et al.*, 1999), ou até mesmo superar os estoques da floresta virgem. Por outro lado, os processos de desmatamento e queima aceleram a decomposição da matéria orgânica e, quando precedem mudança do uso do solo, em especial para finalidade agrícola, resultam em perda permanente dos estoques de carbono do solo (Damian *et al.*, 2021; Durigan *et al.*, 2017; Rozak *et al.*, 2018).

Método

A quantificação da pegada de CO₂ dos produtos de madeira nativa está baseada no método de Avaliação do Desempenho Ambiental da Construção (ADAC) (Belizario-Silva, 2022). Trata-se de uma abordagem simplificada da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que quantifica os fluxos de massa e de energia que ocorrem nos processos que compõem o ciclo de vida de um determinado produto. Os fluxos inventariados podem ser fluxos elementares, que são originários de ou destinados à natureza diretamente (por exemplo, uma emissão atmosférica), ou fluxos de produto, que são originários de ou destinados a outros processos antrópicos (por exemplo, a energia elétrica). Estes fluxos são então convertidos em indicadores de desempenho ambiental, que são expressos em relação a uma unidade declarada de produto.

No presente estudo, o indicador analisado foi a pegada de CO₂ (em kg) e a unidade declarada adotada para a madeira serrada é de 1 m³ a 16% de umidade; ou seja, o indicador é expresso em kg CO₂/m³ de madeira serrada. Este indicador contabiliza as emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida devidas à queima de combustíveis fósseis e à decomposição aeróbica da biomassa considerada não-renovável, ou seja, que não se recompõe (Belizario-Silva, 2022). Desse modo, a pegada de CO₂ não considera as emissões de outros gases de efeito estufa (GEE), tais como o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), entre outros, que seriam necessários para calcular o potencial de aquecimento global (expresso em kg CO₂ equivalente), conforme o modelo do IPCC (2021).

É importante esclarecer que o termo “pegada de carbono”, de acordo com a ISO 14.067 (ISO, 2018), se refere ao indicador de potencial de aquecimento global de um determinado produto; por isso, neste artigo adota-se o termo “pegada de CO₂” ao invés de “pegada de carbono”. A opção por considerar apenas o CO₂ se deve ao fato que este é o principal gás de efeito estufa (ISO, 2021) e a exploração florestal não contribui de forma significativa para as emissões globais de CH₄ (Saunois *et al.*, 2020) e N₂O (Tian *et al.*, 2020). Além disso, o CO₂ pode ser quantificado por meio de fatores de emissão públicos, consolidados e com baixa incerteza, o que não ocorre para os outros GEEs (IPCC, 2021).

A fronteira do estudo é do “berço ao portão”, ou seja, desde a exploração florestal até o término do beneficiamento da madeira serrada bruta. Os seguintes dados de inventário foram levantados: consumos de recursos materiais, combustíveis e energia elétrica; transporte dos produtos entre etapas; processo produtivo e geração de resíduos de biomassa. Os dados de inventário foram obtidos a partir da revisão da literatura. Buscaram-se trabalhos que fornecessem dados genéricos nacionais que descrevessem processos de produção com diferentes tecnologias, fontes energéticas e níveis de eficiência. Os sistemas de produto analisados são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5.

Os dados de inventário para os processos elementares de exploração florestal, transporte (estimativa da distância) e da serraria foram obtidos dos trabalhos apresentados no Quadro 1. O Sidac³ (MINISTÉRIO...; CONSELHO..., 2022) disponibiliza processos elementares de geração de energia elétrica e de operação dos veículos de transporte, para considerar as emissões de CO₂ provenientes destes processos. Além disso, o Sidac dispõe de processos elementares de combustão de combustíveis fósseis (gasolina, diesel) e de decomposição de resíduos de biomassa, que automatizam o cálculo da emissão de CO₂ destas fontes. O Sidac ainda diferencia a decomposição de resíduos de biomassa renováveis (que geram CO₂ biogênico) e não renováveis (que geram CO₂ de desmatamento, com efeito equivalente ao do CO₂ fóssil).

³<https://sidac.org.br/>.

Figura 3 - Sistema de produto para a madeira nativa de extração seletiva convencional

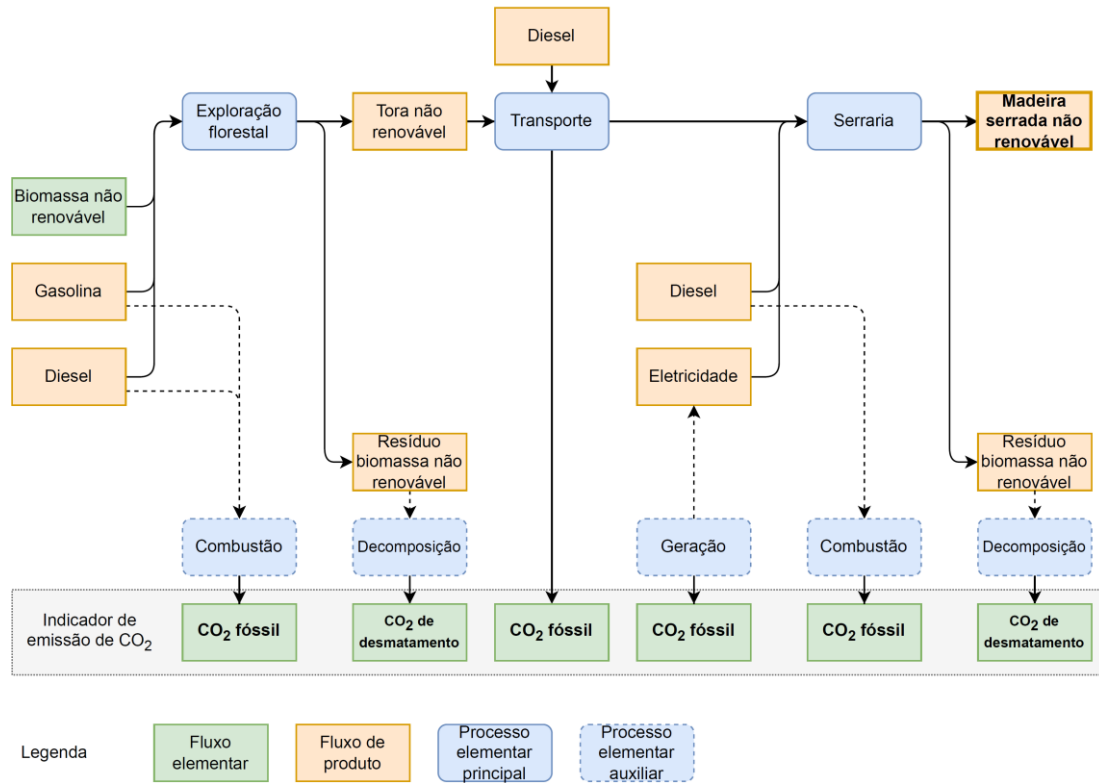


Figura 4 - Sistema de produto para a madeira nativa de manejo convencional

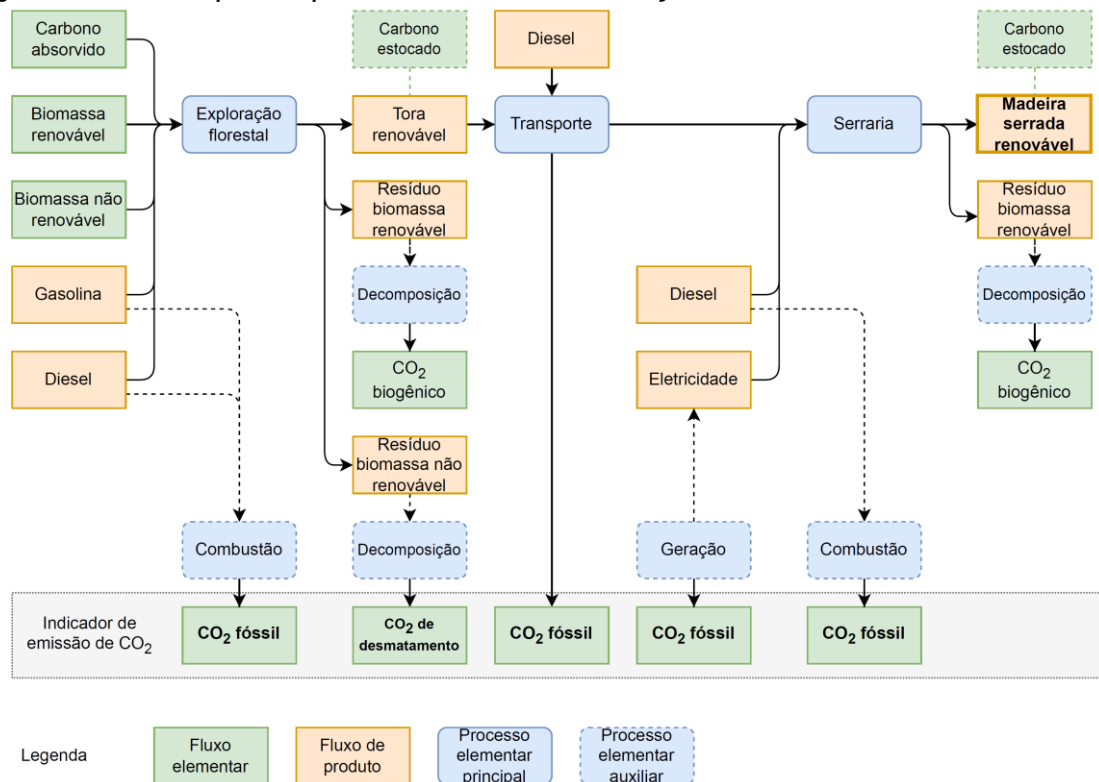
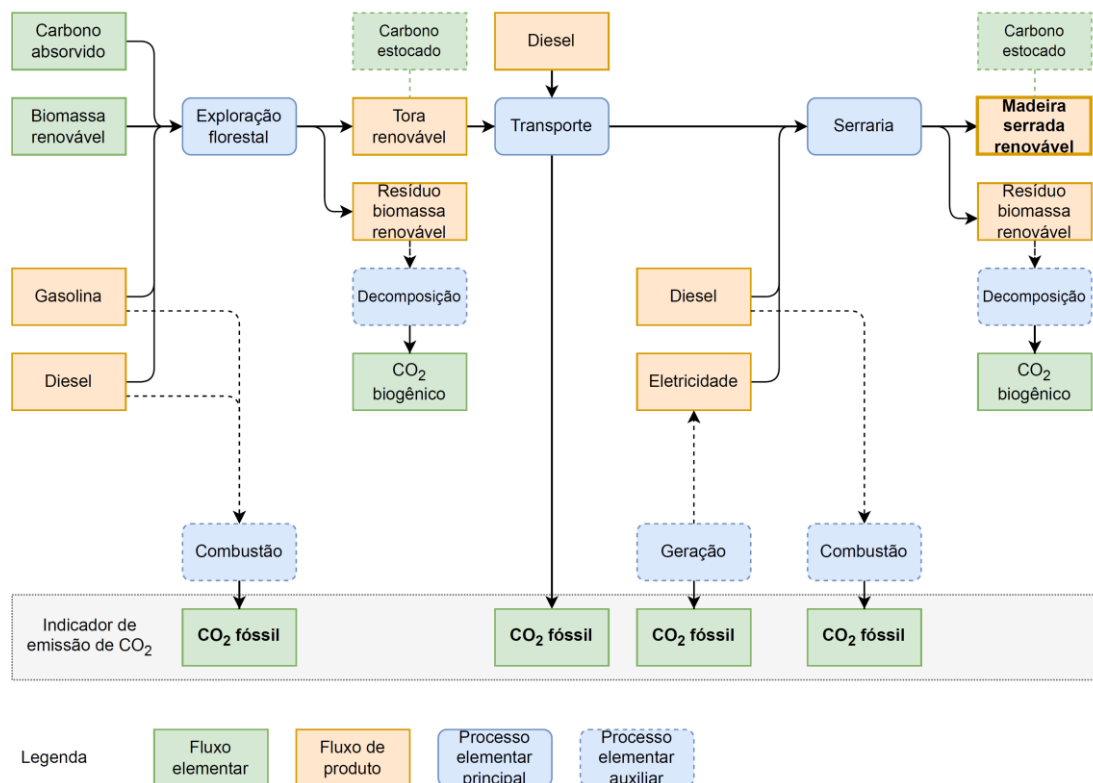


Figura 5 - Sistema de produto para a madeira nativa de manejo sustentável



Quadro 1 - Fonte dos dados genéricos de entrada no Sidac

Exploração florestal	
Quantidade de biomassa extraída da natureza	Barreto <i>et al.</i> (1998), Campos, Punhagui e John (2021), Feldpausch <i>et al.</i> (2005), Gerwing (2002), Johns, Barreto e Uhl (1996), Mazzei <i>et al.</i> (2010), Numazawa <i>et al.</i> (2017), Punhagui (2014), Uhl <i>et al.</i> (1991) e Verissimo <i>et al.</i> (1992)
Consumo de diesel	Punhagui (2014) e Verissimo <i>et al.</i> (1992)
Consumo de gasolina	Punhagui (2014), Uhl <i>et al.</i> (1991) e Verissimo <i>et al.</i> (1992)
Produção de madeira serrada bruta (serraria)	
Consumo de toras	Da Silva Luz <i>et al.</i> (2021), De Lima <i>et al.</i> (2020), De Melo <i>et al.</i> (2019), Ferro <i>et al.</i> (2018), Garcia (2013), Mendoza, Borges e Pierin (2017), Mota (2018), Punhagui (2014), Romero <i>et al.</i> (2020) e Verissimo <i>et al.</i> (1992)
Consumo de eletricidade	Punhagui (2014)
Consumo de diesel	Punhagui (2014) e Verissimo <i>et al.</i> (1992)
Distância de transporte	Da Silva Luz <i>et al.</i> (2021), Punhagui (2014) e Verissimo <i>et al.</i> (1992)

Tais referências foram utilizadas para estimar os fluxos de inventário para os três sistemas de produto, sendo que a principal diferença está na consideração da origem da madeira: para a maneira sem manejo “ESC”, toda a biomassa é considerada como não renovável; para a madeira de manejo sustentável, toda a biomassa é considerada renovável (neutra em carbono); e para a madeira de manejo convencional, a biomassa foi considerada como 69% renovável e 31% não renovável, valores baseados na taxa de recuperação florestal considerada nos estudos de (Mazzei *et al.*, 2010; Numazawa *et al.*, 2017).

A compilação dos inventários foi feita conforme as orientações estabelecidas no documento “Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção – Metodologia” (Belizario-Silva *et al.*, 2022). Cada fluxo de inventário foi descrito por meio da quantidade média por unidade declarada de produto e do desvio padrão, de modo a representar a variação esperada daquele fluxo, considerando as diferentes referências bibliográficas consultadas. Os detalhes sobre o tratamento dos dados estão disponíveis no documento

“Relatório de Coleta de Dados – Madeira” (Oliveira *et al.*, 2022). O resumo dos fluxos inseridos no Sidac é apresentado nas tabelas 1 a 5 do Material Suplementar.

O cálculo da pegada de CO₂ por metro cúbico de madeira foi feito utilizando-se o Sidac⁴ (MINISTÉRIO...; CONSELHO..., 2022). Os resultados são apresentados em faixas de valores (mínimo-máximo), que correspondem ao intervalo de confiança de 95% em torno do valor médio, considerando a propagação da variância dos fluxos de inventário feita pelo Sidac.

Além da pegada de CO₂, apresenta-se o indicador de estoque temporário de carbono biogênico (C), que representa a massa de carbono estocada por unidade declarada de produto (kgC/m³) que contenha biomassa renovável em sua composição, que corresponde a 50% da massa seca de biomassa renovável (Rüter *et al.*, 2019). No caso do manejo florestal convencional, em que parte da biomassa é considerada não renovável, alocou-se toda a biomassa renovável para a tora de madeira, de modo que este estoque é cumulativo nos processos subsequentes, ou seja, para madeira serrada bruta considera-se o volume de produto mais resíduos do processo. Os detalhes deste cálculo são apresentados no documento que descreve a metodologia do Sidac (MINISTÉRIO...; CONSELHO..., 2022).

Resultados e discussão

Os inventários agregados, do berço ao portão, dos três tipos de madeira serrada bruta, tal qual modelados no Sidac, são apresentados na Tabela 1.

A pegada de CO₂ da madeira serrada bruta varia entre 25 e 19.860 kgCO₂/m³, de acordo com o método de exploração florestal, como mostra a Figura 6. A Figura 7 mostra quanto cada fonte emissora contribui, em média, para as emissões totais de CO₂, do berço ao portão, para 1 m³ de madeira nativa serrada bruta.

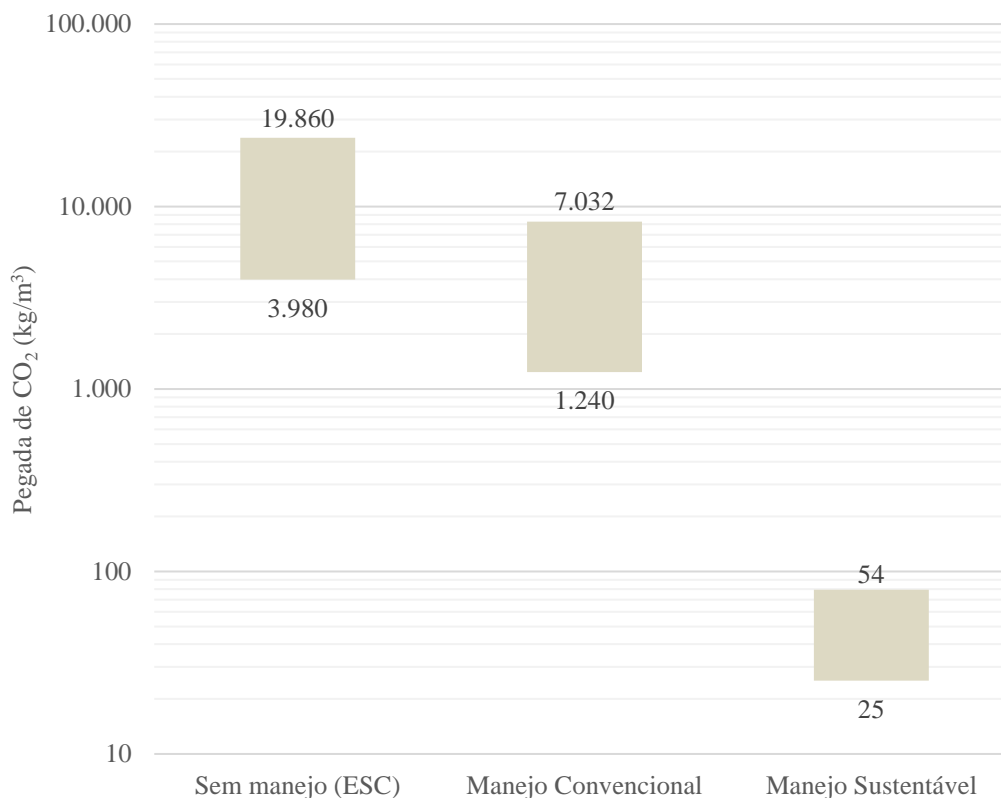
Tabela 1 - Inventários agregados, do berço ao portão, para produção de 1 m³ dos três tipos de madeira nativa serrada bruta

Fluxo	Unid.	Sem manejo (ESC)		Manejo convencional		Manejo sustentável	
		Média	D.P. ±	Média	D.P. ±	Média	D.P. ±
ENTRADAS							
Biomassa renovável	kg	-	-	4955	998	7181	1447
Biomassa não renovável	kg	7181	1447	2226	449	-	-
Carbono absorvido	kg	2477	499	3590	723		
Eletricidade	kWh	70	19	70	19	70	19
Gasolina	L	0,52	0,09	0,52	0,09	0,52	0,09
Óleo diesel	L	9,8	1,3	9,8	1,3	9,8	1,3
Transporte (toras)	t.km	348	151	348	151	348	151
SAÍDAS							
Madeira serrada	m ³	1	-	1	-	1	-
Resíduo de biomassa renovável saturada ^a	m ³	-	-	6,17	1,3	9,45	1,49
Resíduo de biomassa não renovável saturada ^a	m ³	9,46	1,49	3,29	0,19	-	-
Resíduo de biomassa renovável seca ^b	m ³	-	-	1,96	0,87	1,96	0,87
Resíduo de biomassa não renovável seca ^b	m ³	1,96	0,87	-		-	

Nota: ^aOs resíduos de biomassa saturada são gerados durante a exploração florestal para produção de toras; e ^bOs resíduos de biomassa seca são gerados na serraria durante o processamento da madeira. A diferenciação entre biomassa saturada e seca é considerada pelo Sidac para cálculo das emissões de CO₂, visto que a quantidade de biomassa seca por m³ se altera conforme o teor de saturação da madeira.

⁴<https://sidac.org.br/>.

Figura 6 - Pegada de CO₂ para 1 m³ de madeira nativa serrada bruta, do berço ao portão, para os três tipos de exploração florestal. O eixo das emissões de CO₂ é apresentado em escala logarítmica para melhor visualização



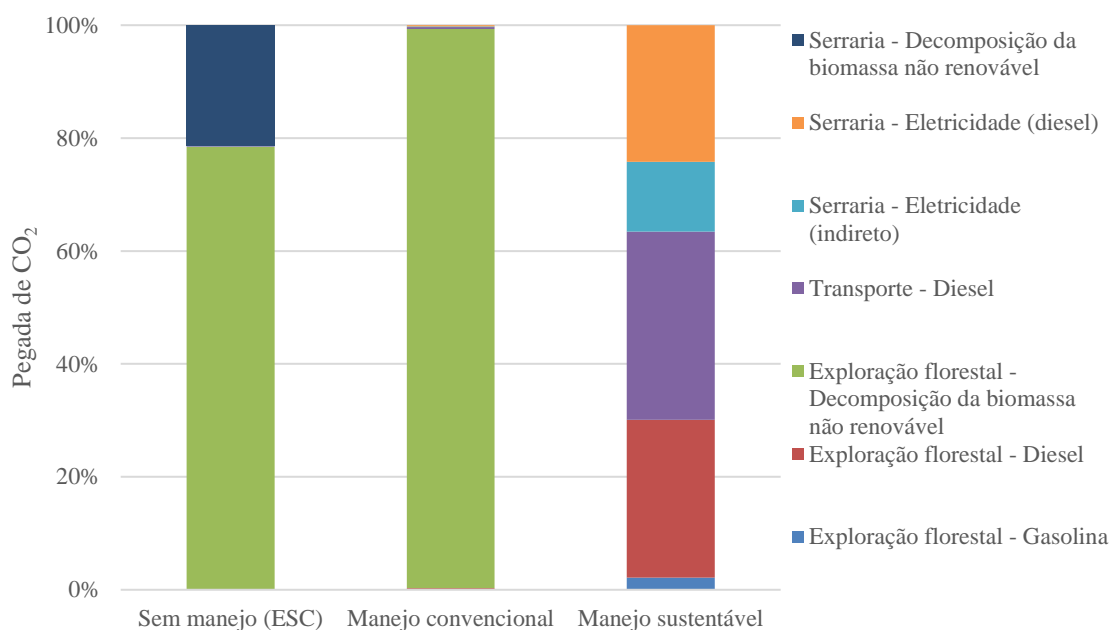
Fonte: adaptado de Ministério de Minas e Energia e Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2022).

A baixa pegada de CO₂ da madeira de manejo sustentável ocorre porque este tipo de exploração florestal permite considerar que a biomassa seja totalmente renovável (neutra em carbono), de modo que não se atribuem emissões de CO₂ aos resíduos desta biomassa, mas apenas aos fluxos energéticos (combustíveis e eletricidade) envolvidos nos diversos processos de exploração florestal, beneficiamento e transporte da madeira. Neste caso, a principal fonte emissora é o transporte das toras até a serraria (33% das emissões em média), seguido pelo consumo de diesel em equipamentos utilizados na exploração florestal (28%) e na serraria (24%) (Figura 7).

Os valores intermediários de emissão para os produtos de manejo convencional se devem ao fato de que apenas parte desta biomassa é renovável (69%). Deste modo, 31% da biomassa que entra neste sistema de produto contribui para a pegada de CO₂; entretanto, como os consumos são altos, resulta em uma emissão de CO₂ entre 1,2 e 7,0 t CO₂/m³ de madeira. Ou seja, as emissões correspondem a algo entre 1,5 e 8,5 vezes a massa de madeira bruta produzida, considerando uma densidade aparente aproximada para a madeira serrada seca ao ar de 820 kg/m³.

Os valores mais altos de emissão são atribuídos a madeiras de florestas sem manejo (ESC), pois considera-se que 100% da biomassa será não renovável (fonte de carbono). Para produtos com esta origem, considera-se que as emissões de CO₂ provenientes dos resíduos como fósseis. Com isto, mais de 99% das emissões, resultantes do processo de obtenção da tora e do seu beneficiamento, são da decomposição da biomassa residual. Os resíduos da exploração florestal correspondem a 78% das emissões, enquanto os resíduos do beneficiamento das toras na serraria contribuem com 21%. As emissões totais variam entre 4,0 e 20 t CO₂/m³ de madeira serrada, que correspondem a algo entre 4,8 e 24 vezes mais emissões do que a massa de madeira serrada produzida.

Figura 7 - Composição média da pegada de CO₂, do berço ao portão, para 1 m³ de madeira nativa serrada bruta, por fonte emissora



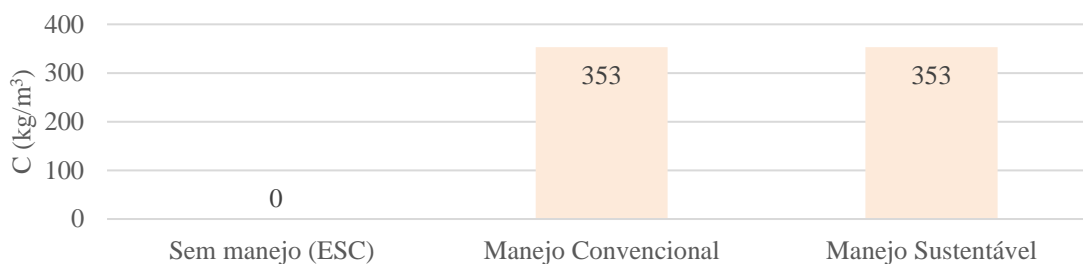
No que diz respeito à faixa de variação da pegada de CO₂, os maiores valores estão relacionados aos mais baixos rendimentos em serrarias (18,7%), decorrentes de defeitos nas toras como achatamentos, rachaduras superficiais e excentricidades na medula (De Lima *et al.*, 2020). Os menores valores de CO₂ estão relacionadas a maiores rendimentos observados em serrarias (77,6%), com o uso de toras de menores diâmetros, o que estava associado a menor probabilidade de defeitos (Da Silva Luz *et al.*, 2021). Embora os resíduos da serraria sejam considerados renováveis no caso do manejo convencional (pois todo o resíduo não renovável foi alocado à exploração florestal) e do manejo sustentável e, portanto, não sejam considerados como fonte de CO₂, é importante maximizar o rendimento para reduzir o consumo de material, indicador que não foi objeto do presente estudo.

Ao comparar a pegada de CO₂ dos três diferentes tipos de manejo florestal, percebe-se que a madeira de florestas sem manejo emite, em média, 2,9 vezes mais CO₂ que a madeira de manejo convencional e 300 vezes mais do que a madeira nativa de manejo sustentável. Cabe observar que, caso a origem da madeira nativa seja desconhecida, deve-se considerar a possibilidade de que ela seja proveniente de extração seletiva convencional e, portanto, tenha alta pegada de CO₂. A título de comparação, madeiras de manejo convencional e extração seletiva convencional apresentam emissão por m³ superiores às do concreto – um concreto de 30 MPa, por exemplo, tem emissão entre 228 e 339 kg CO₂/m³ (MINISTÉRIO...; CONSELHO..., 2022).

Os resultados demonstram que conhecer a origem da madeira nativa é crucial para a sustentabilidade ambiental da construção e, conseqüentemente, para a definição da pegada de CO₂ de edificações que contenham madeira nativa. A falta de rastreabilidade efetiva de parte da cadeia produtiva, devido à ilegalidade desta exploração, é ainda hoje um problema no Brasil (McDermott; Irland; Pacheco, 2015; Pacheco *et al.*, 2012; SARAIVA, 2020), dificultando o nível de clareza quanto à origem dos produtos de madeira por parte dos tomadores de decisão.

O estoque temporário de carbono biogênico da madeira serrada bruta é de 353 kg C/m³ para as madeiras de manejo sustentável e convencional, e igual a zero no caso da madeira de extração seletiva convencional (Figura 8). Os valores são iguais para ambos os manejos, pois considera-se que o volume de biomassa da tora é renovável, diferenciando-se apenas os resíduos, que são decompostos ainda na floresta e emitem CO₂ biogênico ou de desmatamento, e a densidade aparente da madeira é a mesma.

⁵A rigor, a comparação requer a consideração do equivalente funcional, que depende da aplicação dos produtos – por exemplo, para pilares, seria necessário considerar a resistência à compressão da madeira e do concreto. Entretanto, a comparação apresentada serve apenas para fins de ordem de grandeza das emissões específicas de diferentes materiais.

Figura 8 - Estoque de carbono em 1 m³ de madeira serrada bruta

Fonte: adaptado de Ministério de Minas e Energia e Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2022).

Produtos de madeira de origem renovável podem ser considerados como estoques de carbono temporário e contribuem para o combate ao aquecimento global, sobretudo ao “imobilizar” o carbono em produtos de longa duração, como é o caso dos edifícios (Ganguly; Pierobon; Hall, 2020; Jordan *et al.*, 2018; Jørgensen; Hauschild; Nielsen, 2015). Ou seja, conhecer a origem da madeira nativa é necessário não apenas para a pegada de CO₂, mas também para a consideração do estoque temporário de carbono biogênico, uma vez que ambos os indicadores dependem diretamente da taxa de renovação da biomassa florestal.

Além disso, o uso de produtos de madeira nativa proveniente de manejo sustentável pode incentivar a manutenção da floresta “em pé”, uma vez que esta prática exige o monitoramento da biomassa por período determinado, mantendo os serviços florestais e o potencial de exploração econômica da área, em detrimento a outras possíveis atividades mais danosas ao meio ambiente (Ellis *et al.*, 2019; Lima; Gonçalves; Pichelli, 2020; Sasaki *et al.*, 2016). Ao receber uma concessão florestal, o responsável deve executar o plano de manejo aprovado e responder pelos distúrbios na floresta durante a vigência da concessão (Brasil, 2006, 2009). Por outro lado, quando não há manejo, ou uso econômico sustentado (atividades de extrativismo e.g.), a floresta fica mais suscetível a desmatamentos, invasões, grilagem, queimadas, entre outros (Arima *et al.*, 2014; Ometto; Aguiar; Martinelli, 2011; Van Solinge, 2010).

A pegada de CO₂ é uma forma objetiva de avaliar o desempenho ambiental da madeira, estimando o indicador de maior importância nesse processo produtivo, o CO₂. Existem outros métodos para avaliação ambiental de produto, como as Declarações Ambientais de Produto e.g., baseadas em ACVs completas, que apresentam mais indicadores e impactos ambientais (Garcia *et al.*, 2020; INTERNATIONAL..., 2018; Tellnes *et al.*, 2017).

Os resultados deste trabalho demonstram a viabilidade de calcular indicadores de desempenho ambiental de produtos de construção brasileiros, tais como a pegada de CO₂ e o estoque temporário de carbono biogênico, para embasar decisões visando promover a sustentabilidade ambiental da construção civil. A pegada de CO₂ poderia ser aplicada também para calcular indicadores de desempenho ambiental de outros biomateriais (Göswein *et al.*, 2022). Entretanto, uma das limitações do método adotado é a não consideração do fluxo de carbono abaixo do solo, o que poderia exacerbar a diferença da pegada de CO₂ dos diferentes modos de exploração florestal, sendo este um aprimoramento previsto em pesquisas subsequentes.

Conclusões

A pegada de CO₂ da madeira nativa serrada bruta varia entre 25 e 19.860 kgCO₂/m³, a depender do tipo de extração florestal. Além disso, apenas as madeiras de manejo funcionam como estoque temporário de carbono biogênico, com um estoque de 353 kgC/m³ de madeira serrada bruta seca ao ar. Os resultados consideram as emissões desde a exploração florestal até o término do beneficiamento na serraria e apenas os fluxos de carbono acima do solo. Indica-se, para futuros trabalhos, que equitativamente se contabilize a variação do estoque de carbono abaixo do solo, tornando mais completa a análise da pegada de CO₂ dos produtos de madeira nativa destinados à construção. No entanto, ressalta-se a importância da adoção de uma metodologia estruturada e transparente que permita o cálculo das emissões de CO₂ abaixo do solo de modo inteligível, condizente com a realidade e facilmente reproduzível.

A exploração florestal é a fase em que mais contribui para a pegada de CO₂ da madeira nativa proveniente de extração seletiva convencional e de manejo convencional, devido à alta produção de resíduos (2,44 m³_{resíduos}/m³_{tora}) resultantes da retirada de galhos e folhas e da destruição da biomassa florestal para abertura de vias de acesso e pátios de armazenagem. No caso da extração seletiva convencional, como esta não propicia a recuperação da biomassa destruída, todo resíduo, queimado ou decomposto, é contabilizado como emissão.

Já no caso do manejo convencional, a intensidade de exploração atualmente preconizada pela legislação ambiental brasileira permite apenas a recomposição parcial da biomassa florestal, sendo que a parcela não recomposta atua como fonte emissora de CO₂.

Garantir a rastreabilidade ao longo da cadeia produtiva e incentivar o uso de madeira de manejo sustentável, com exploração de baixa intensidade (menor que 15 m³/ha), tem o potencial de reduzir quase na totalidade a pegada de CO₂ da madeira nativa. Isto porque toda a biomassa florestal suprimida se recupera dentro do período entre ciclos de cortes, fazendo com que o balanço de carbono ao longo do ciclo de vida do produto seja igual a zero (nulo). Além disso, a madeira nativa proveniente de manejo sustentável aumenta o estoque temporário de carbono na biomassa renovável contida em produtos de construção. Ademais, o manejo sustentável colabora com a manutenção dos serviços ambientais prestados pela floresta, preservando a biodiversidade e evitando ações ilegais de invasão, queimadas e desmatamento pela exploração comercial sustentável da floresta.

Este estudo mostra a importância de conhecer a origem da madeira nativa para a pegada de CO₂ de produtos de madeira. Espera-se que estes resultados contribuam para que a cadeia de valor da construção civil exija a rastreabilidade efetiva da madeira nativa e solicite informações sobre o desempenho ambiental de produtos à base de madeira, para tomar decisões conscientes e fomentar e fortalecer as boas práticas de manejo de florestas nativas no Brasil destinadas à produção de madeira para a construção civil.

Referências

- ARIMA, E. Y. *et al.* Public policies can reduce tropical deforestation: lessons and challenges from Brazil. **Land Use Policy**, v. 41, p. 465-473, nov. 2014.
- ASSIS, T. O. *et al.* CO₂ emissions from forest degradation in Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, n. 104035, set. 2020.
- BACCINI, A. *et al.* Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. **Science**, v. 358, n. 6360, p. 230-234, out. 2017.
- BARRETO, P. *et al.* Costs and benefits of forest management for timber production in eastern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 108, n. 1/2, p. 9-26, 1998.
- BELIZARIO-SILVA, F. *et al.* **Sistema de informação do desempenho ambiental da construção: metodologia.** São Paulo: Sidac, 2022.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Instrução Normativa 2, de 27 de junho de 2007.** Altera dispositivos da instrução normativa no 5, de 11 de dezembro de 2006, e dá outras providências. Diário Oficial da União de 28 de Jun. de 200. Seção 1, Página 78. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/IN0002-270607.PDF>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- BRASIL. **Resolução CONAMA n°406**, de 2 de fevereiro de 2009. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica, e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável – PMFS com fins madeireiros, para floresta nativas e suas formas de sucessão no Bioma Amazônia. Brasília: MMA, 2009. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0406-020209.PDF>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- CAMARGO, P. B. de *et al.* Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, v. 5, p. 693-702, 1999.
- CAMPOS, É. F. de. **Emissão de CO₂ da madeira serrada da Amazônia: o caso da exploração convencional.** São Paulo, 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- CAMPOS, É. F. de; PUNHAGUI, K. R. G.; JOHN, V. M. CO₂ footprint of Amazon lumber: a meta-analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, n. August 2020, 2021.
- CEDERBERG, C. *et al.* Including carbon emissions from deforestation in the carbon footprint of Brazilian beef. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 5, p. 1773-1779, 2011.
- CHURKINA, G. *et al.* Buildings as a global carbon sink. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 4, p. 269-276, 2020.

- COVEY, K. *et al.* Carbon and beyond: the biogeochemistry of climate in a rapidly changing Amazon. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, n. 618401, 2021.
- DA SILVA LUZ, E. *et al.* Challenges of the lumber production in the Amazon region: relation between sustainability of sawmills, process yield and logs quality. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 4, p. 4924–4948, 2021.
- DAMIAN, J. M. *et al.* Deforestation and land use change mediate soil carbon changes in the eastern Brazilian Amazon. **Regional Environmental Change**, v. 21, n. 3, 2021.
- DANTAS, D. *et al.* Above and belowground carbon stock in a tropical forest in Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 43, e48276, 2020.
- DE LIMA, R. B. *et al.* Effect of species and log diameter on the volumetric yield of lumber in northern Brazilian Amazonia: preliminary results. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 39, n. 3, p. 283–299, 2020.
- DE MELO, R. R. *et al.* Lumber yield of four native forest species of the Amazon Region. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, p. 1–7, 2019.
- DURIGAN, M. *et al.* Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the eastern Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 9, n. 379, 2017.
- ELLIS, P. W. *et al.* Reduced-impact logging for climate change mitigation (RIL-C) can halve selective logging emissions from tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 255-266, 2019.
- ESPADA, A. L. V. *et al.* **Manejo florestal e exploração de impacto reduzido em florestas naturais de produção da Amazônia**. Belém: Instituto Florestal Tropical, 2016.
- FELDPAUSCH, T. R. *et al.* When big trees fall: damage and carbon export by reduced impact logging in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 219, n. 2–3, p. 199–215, 2005.
- FERRO, F. S. *et al.* Environmental aspects of oriented strand boards production: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, n. 2018, p. 710–719, 2018.
- GANGULY, I.; PIEROBON, F.; HALL, E. S. Global warming mitigating role of wood products from Washington state’s private forests. **Forests**, v. 11, n. 2, p. 1–20, 2020.
- GARCIA, F. M. **Rendimento operacional de uma serraria com a espécie cambará (Qualea albiflora Warm) na região Amazônica**. Botucatu, 2013. xi, 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Universidade Estadual, Botucatu, 2013.
- GARCIA, R. *et al.* Accounting for biogenic carbon and end-of-life allocation in life cycle assessment of multi-output wood cascade systems. **Journal Of Cleaner Production**, v. 275, p. 122795, 2020.
- GERWING, J. J. Degradation of forests through logging and fire in the eastern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 157, n. 1–3, p. 131–141, 2002.
- GÖSWEIN V. *et al.* Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings. **Buildings and Cities**, v. 3, n. 1, p. 745-755, 2022.
- GREEN, J. K.; KEENAN, T. F. The limits of forest carbon sequestration. **Science**, v. 376, n. 6594, p. 692–693, 2022.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change**. 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 14 abr. 2023.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **EFDB Emission Factor Database**. 2021. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>. Acesso em: 07 jul. 2023.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067**: greenhouse gases: Carbon footprint of products: requirements and guidelines for quantification. Genebra, 2018.
- IORDAN, C. M. *et al.* Contribution of forest wood products to negative emissions: Historical comparative analysis from 1960 to 2015 in Norway, Sweden and Finland. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 1, p. 16, 2018.
- JOHNS, J. S.; BARRETO, P.; UHL, C. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 89, n. 1–3, p. 59–77, 1996.

- JONES, I. L. *et al.* Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. **Science of the Total Environment**, v. 697, 133987, 2019.
- JØRGENSEN, S. V.; HAUSCHILD, M. Z.; NIELSEN, P. H. The potential contribution to climate change mitigation from temporary carbon storage in biomaterials. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 4, p. 451–462, 2015.
- LIMA, A. L.; GONÇALVES, D.; PICHELLI, K. EMBRAPA. **Manejo florestal por espécies na Amazônia é mais rentável e sustentável**. 2020. Florestas e Silvicultura Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação - Gestão ambiental e territorial. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 30 jun. 2023.
- MAZZEI, L. *et al.* Above-ground biomass dynamics after reduced-impact logging in the Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 3, p. 367–373, 2010.
- MCDERMOTT, C. L.; IRLAND, L. C.; PACHECO, P. Forest certification and legality initiatives in the Brazilian Amazon: lessons for effective and equitable forest governance. **Forest Policy and Economics**, v. 50, p. 134–142, 2015.
- MENDOZA, Z. M. dos S. H. de; BORGES, P. H. de M.; PIERIN, L. C. Coeficiente de rendimento em madeira serrada de oito espécies nativas de Mato Grosso. **Nativa**, v. 5, n. 2017, 2017.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Sidac - Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção**. Versão 1.0.0. São Paulo: MME; CBCS, 2022. Disponível em: <https://sidac.org.br>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- MITCHARD, E. T. A. The tropical forest carbon cycle and climate change. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 527–534, 2018.
- MOTA, K. L. R. **Desempenho operacional de uma serraria de médio porte no município de Novo Aripuanã, Amazonas**. Manaus, 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.
- NOGUEIRA, M. M. *et al.* **Manual Técnico 2 – IFT: manejo de florestas naturais da Amazônia corte, traçamento e segurança**. Belém: Instituto Florestal Tropical, 2011. Disponível em: http://ift.org.br/wp-content/uploads/2015/05/Manejo-de-Florestas-Naturais_02.pdf. Acesso em: 14 abr. 2023.
- NUMAZAWA, C. T. D. *et al.* Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280–285, 2017.
- OLIVEIRA, C. G. *et al.* **Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: toras de madeira, madeira serrada bruta e madeira serrada aplainada**. São Paulo: Sidac, 2022.
- OMETTO, J. P.; AGUIAR, A. P. D.; MARTINELLI, L. A. Amazon deforestation in Brazil: effects, drivers and challenges. **Carbon Management**, v. 2, n. 5, p. 575–585, 2011.
- PACHECO, P. *et al.* The recognition of forest rights in latin america: progress and shortcomings of forest tenure reforms. **Society and Natural Resources**, v. 25, n. 6, p. 556–571, 2012.
- PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de redução das emissões de CO₂ e da energia incorporada na construção de moradias no Brasil mediante o incremento do uso de madeira**. São Paulo, 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- RAMAGE, M. H. *et al.* The wood from the trees: the use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, n. October 2015, p. 333–359, 2017.
- RIGHI, C. A. *et al.* Biomass burning in Brazil’s Amazonian “arc of deforestation”: burning efficiency and charcoal formation in a fire after mechanized clearing at Feliz Natal, Mato Grosso. **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 11, p. 2535–2546, 2009.
- ROMERO, F. M. B. *et al.* Stocks of carbon in logs and timber products from forest management in the southwestern amazon. **Forests**, v. 11, n. 10, p. 1–20, 2020.
- ROZAK, A. H. *et al.* The imprint of logging on tropical forest carbon stocks: a bornean case-study. **Forest Ecology and Management**, v. 417, p. 154–166, 2018.

- RÜTER, S. *et al.* **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: agriculture, forestry and other land use. Genebra: IPCC, 2019. v. 4, cap. 12. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- SARAIVA, A. S. **A atuação de organizações criminosas na exploração ilegal de madeira como principal vetor do desmatamento da Amazônia**. Manaus, 2020. 417 f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.
- SASAKI, N. *et al.* Sustainable management of tropical forests can reduce carbon emissions and stabilize timber production. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. 50, p. 1–13, 2016.
- SAUNOIS, M. *et al.* The Global Methane Budget 2000–2017. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 3, p. 1561–1623, 2020.
- SEDJO, R.; SOHNGEN, B. Carbon sequestration in forests and soils. **Annual Review of Resource Economics**, v. 4, p. 127–144, 2012.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS. Serviço Florestal Brasileiro. **Estoque das Florestas - Carbono - Tabelas e Gráficos**. 2021. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/estoques-das-florestas/626-tabelas-e-graficos>. Acesso em: 06 jul. 2023.
- SMITH, P. *et al.* How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 219–241, out. 2019.
- SOBRAL, L. *et al.* **Acertando o Alvo 2**: consumo de madeira amazônica e certificação florestal no Estado de São Paulo. Belém: Imazon, Imaflora, Amigos da Terra, 2002. Disponível em: <https://imazon.org.br/publicacoes/acertando-o-alvo-2-consumo-de-madeira-amazonica-e-certificacao-florestal-no-estado-de-sao-paulo/>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- SPAWN, S. A. *et al.* Harmonized global maps of above and belowground biomass carbon density in the year 2010. **Scientific Data**, v. 7, n. 112, 2020.
- TELLNES, L. G. F. *et al.* Comparative assessment for biogenic carbon accounting methods in carbon footprint of products: a review study for construction materials based on forest products. **Iforest - Biogeosciences and Forestry**, v. 10, n. 5, p. 815–823, 2017.
- TIAN, H. *et al.* A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. **Nature**, v. 586, p. 248–256, 2020.
- UHL, C. *et al.* Social, economic, and ecological consequences of selective logging in an Amazon frontier: the case of Tailândia. **Forest Ecology and Management**, v. 46, n. 3–4, p. 243–273, 1991.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global status report for buildings and construction**: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. Nairobi, 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **UNEP and Biodiversity**. 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/unep-and-biodiversity>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- VAN GARDINGEN, P. R.; VALLE, D.; THOMPSON, I. Evaluation of yield regulation options for primary forest in Tapajós National Forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 231, n. 1–3, p. 184–195, 2006.
- VAN SOLINGE, T. B. Deforestation Crimes and Conflicts in the Amazon. **Critical Criminology**, v. 18, n. 4, p. 263–277, 2010.
- VERISSIMO, A. *et al.* Logging impacts and prospects for sustainable forest management in an old Amazonian frontier: the case of Paragominas. **Forest Ecology and Management**, v. 55, n. 1–4, p. 169–199, 1992.
- WELLESLEY, L. **Illegal logging and related trade**: the responses in Brazil. London: a Chatham House assessment, 2014. Disponível em: <https://forestgovernance.chathamhouse.org>. Acesso em: 14 abr. 2023.

ZENID, G. J. **Madeira**: uso sustentável na construção civil. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2009. (IPT - Publicação 3010). Disponível em:
http://aleph.ipt.br/exlibris/aleph/a22_1/apache_media/EEDNCG3N9H98CFVF4C96C1MGVPVJBA.pdf.
Acesso em: 14 abr. 2023.

Agradecimentos

À União Europeia e ao Ministério Alemão para o Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) e à Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ), pelo financiamento do desenvolvimento do Sidac. As bolsas fornecidas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) processo no. 436997/2018-5 e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – 001.

Cássio Gomes de Oliveira

Conceitualização, Metodologia, Análise de dados, Design da apresentação dos dados, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Av. Tarquínio Joslin dos Santos, 1000, Polo Universitário | Foz do Iguaçu - PR - Brasil | CEP 85870-650 | Tel.: (45) 3522-9863 | E-mail: cassio.oliveira@lme.pcc.usp.br

Katia Regina Garcia Punhagui

Conceitualização, Metodologia, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal da Integração Latino-Americana | E-mail: katia.punhagui@unila.edu.br

Lidiane Santana Oliveira

Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica | Universidade de São Paulo | Av. Prof. Almeida Prado, trav.2, 83, Cidade Universitária | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-900 | Tel.: (11) 3091-5529 e (11) 3091-9170 | E-mail: lidiane.oliveira@lme.pcc.usp.br

Fernanda Belizário Silva

Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Laboratório de Tecnologia e Desempenho de Sistemas Construtivos | Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo | Av. Prof. Almeida Prado, 532, Cidade Universitária | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-901 | Tel: (11) 3767-4164 | E-mail: fernanda.belizario@lme.pcc.usp.br

Editora de seção: **Edna Possan**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.