













Cadeia produtiva do carvão vegetal de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável: um estudo de caso no polo siderúrgico da região do Carajás

Irislane Vieira SANTOS ¹, Pedro Paulo Borges CARNEIRO ¹, Luiz Fernandes Silva DIONÍSIO ²,
Joabel RAABE ¹, Dalton Henrique ANGELO ¹, Felipe Alexandre RIZZO ³,
Marcos Victor da Conceição PAIXÃO ⁴, Paulo Ricardo Gherardi HEIN ⁵,
Thiago de Paula PROTÁSIO ^{5,6}, Michael Douglas Roque LIMA ^{1*}

¹ Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, Imperatriz, MA, Brasil.

² Universidade do Estado do Pará, Castanhal, PA, Brasil.

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Açailândia, MA, Brasil.

⁴ CKVB Florestal Ltda, Paragominas, PA, Brasil.

⁵ Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.

⁶ Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, PA, Brasil.

*E-mail: michael.lima@uemasul.edu.br

Submetido em 30/01/2024; Aceito em 22/04/2024; Publicado em: 02/05/2024.

RESUMO: O Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) é uma ferramenta legal para a utilização racional dos recursos naturais na Amazônia. No entanto, a atividade gera quantitativo substancial de resíduos lenhosos durante a etapa de colheita, especialmente galhos e sapopemas. O aproveitamento da biomassa residual, que normalmente fica estocada no interior das florestas, constitui uma importante estratégia de sustentabilidade e uso racional para a atividade madeireira no Brasil, pois essa biomassa apresenta potencial para produção de carvão vegetal e lenha. O presente estudo tem como objetivo descrever a cadeia de produção do carvão vegetal oriundo de resíduos lenhosos de PMFS produzido no polo siderúrgico da região do Carajás. O levantamento foi realizado baseando-se em pesquisa de campo, visando descrever cada etapa da cadeia produtiva do carvão vegetal de forma detalhada. Com base nos dados de campo, a cadeia de produção de carvão vegetal inicia-se no PMFS, com a geração de resíduos, matéria prima renovável promissora para bioenergia no pólo de Carajás. Além dessa etapa, destacam-se: a estocagem dos resíduos na floresta, o transporte dos resíduos para o pátio de estocagem da unidade de produção, a carbonização, resfriamento, a retirada e expedição do carvão vegetal.

Palavras-chave: exploração florestal; biomassa residual; biorredutor; florestas naturais.

Charcoal production chain from sustainable forest management: a case study in the steel industry of the Carajás region

ABSTRACT: The Sustainable Forest Management Plan (SFMP) is a legal tool for the rational use of natural resources in Amazonia. However, the activity generates substantial woody residues during harvesting, especially branches and buttresses. The use of residual biomass, which is stored inside the forests, constitutes an important strategy of rational use and sustainability for logging activity in Brazil, as this biomass presents interesting potential for charcoal and firewood production. This work aims to describe the production chain of charcoal from woody wastes from an SFMP produced in the steel complex in the Carajás region. The study was carried out based on field research, aiming to describe each stage of the charcoal production chain in detail. Based on field data, the charcoal production chain begins with SFMP, with waste generation, a promising renewable raw material for bioenergy in Carajás pole. In addition to this step, the following stand out: the storage of waste in the forest, transport of waste to the storage yard of the production unit, carbonization, cooling, removal, and shipment of charcoal.

Keywords: logging; residual biomass; bioeducer; natural forests.

1. INTRODUÇÃO

As florestas naturais da região amazônica apresentam importantes fontes de biodiversidade, em termos de fauna e flora, podendo ser utilizadas de forma sustentável por empresas florestais. Tecnologias para a melhor utilização desses recursos tem evoluído ao longo do tempo, especialmente quanto ao aproveitamento de produtos florestais madeireiros. Nesse sentido, o Plano de Manejo

Florestal Sustentável (PMFS) é uma ferramenta legal relevante para a utilização racional dos recursos florestais amazônicos (DIONISIO et al., 2022), reconhecido pela comunidade científica bem como pelos setores governamentais responsáveis pelas políticas públicas.

A Exploração de Impacto Reduzido (EIR) tem guiado as operações de corte incluídas em PMFS, especialmente na

Amazônia. No atual sistema silvicultural policíclico adotado nas florestas da Amazônia brasileira, o ciclo de corte varia de 30 a 35 anos, com intensidade de corte de até 30 m³ ha⁻¹ diâmetro mínimo de corte ≥ 50 cm (BRASIL, 2006).

A colheita em florestas naturais, mesmo que de forma regulamentada pela Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012 (código florestal) e Instrução Normativa nº 05 de 10 de setembro de 2015, gera quantitativo elevado de resíduos. Segundo Numazawa et al. (2017), a atividade florestal na Amazônia gera elevado percentual de resíduos durante a colheita (9-18%) e no beneficiamento das toras (45-55%). Trabalhos prévios constatarem a alta quantidade de resíduos gerados pela colheita florestal (PALACE et al., 2007; CRUZ FILHO; SILVA, 2009; NUMAZAWA et al., 2017). No estudo de Cruz Filho; Silva (2009), o quantitativo de resíduos reportado foi de 137.18 m³ ha⁻¹ para um plano de manejo florestal sustentável com intensidade de corte de 15 m³ ha⁻¹ na cidade de Moju, Estado do Pará. Galhos, sapopemas e restos de troncos podem ser incluídos na classificação de resíduos da exploração florestal (FRANCEZ et al., 2007).

O aproveitamento da biomassa residual, que em grande parte dos PMFS fica estocada no interior das florestas, constitui uma importante estratégia de sustentabilidade para a atividade madeireira no Brasil (PEREIRA et al., 2020). Algumas empresas em seus planos de manejo utilizam essa biomassa para a produção de carvão vegetal, destinada a indústria siderúrgica na região do Carajás, situado entre os estados do Maranhão e Pará (SILVA et al., 2007; LIMA et al., 2020a,b).

O Pará apresenta produção de carvão ainda em desenvolvimento. O Estado tem buscado alternativas mais sustentáveis, diminuindo a produção de carvão vegetal de espécies nativas, por meio de resíduos de PMFS, resíduos de serraria e lenha de florestas energéticas. Além disso, estar em busca por novos tipos de fornos e procedimentos mais tecnológicos que diminuam a emissão de gases do efeito estufa e aumentam a produtividade em carvão (OLIVEIRA et al., 2023). Os autores afirmam ainda que a produção de carvão vegetal do Estado do Pará não consegue atender a demanda do polo siderúrgico local, necessitando aumentar sua produção.

A literatura apresenta estudos qualitativos das madeiras residuais (LIMA et al., 2020a) e carvões derivados (LIMA et al., 2020b; SILVA et al., 2007) visando obtenção de alternativas para melhoria da carbonização, métodos de agrupamento de resíduos baseados em índices colorimétricos (LIMA et al., 2021) e identificação de madeiras residuais por meio de dados espectrais obtidos na região do infravermelho próximo (LIMA et al., 2022a,b). Lima et al. (2023) apresentaram resultados positivos de produtividade de carvão associados a carbonização de resíduos agrupados em comparação com o método tradicional adotado na Amazônia. A qualidade dos carvões produzidos apresentou melhoria em função da segregação das madeiras residuais em condições operacionais (BARROS et al., 2023). Todos os estudos mencionados são associados a matéria prima e produto. Contudo, há lacunas científicas sobre as etapas da cadeia produtiva do carvão vegetal derivado de resíduos, que atualmente tem subsidiado o polo siderúrgico do Carajás.

O maior detalhamento das etapas do aproveitamento energético dos resíduos do manejo florestal sustentável é necessário, desde a geração de resíduos por meio da colheita até a expedição do carvão vegetal nas unidades de produção.

Essas informações são importantes para o desenvolvimento da atividade madeireira na região, no que tange ao maior aproveitamento da matéria prima, a disponibilidade de informações para outros planos de manejo, e a diversificação da matriz energética brasileira. Assim, a seguinte questão científica guiou a realização deste estudo: i) Quais etapas representam a cadeia produtiva de carvão vegetal de resíduos da colheita florestal realizada pelo Grupo Keilla em Paragominas, Pará, para fins industriais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de realização do estudo

As lacunas referentes a cadeia produtiva de carvão com resíduos são apresentadas e preenchidas com dados reais de campo. Nesse sentido, foi realizada pesquisa de campo na Unidade de Produção de Carvão Vegetal, situada na Fazenda Rio Capim, município de Paragominas, Pará, Brasil, nas coordenadas geográficas (3°30' a 3°45' de latitude sul e 48°30' a 48°45' de longitude a oeste do meridiano de Greenwich). A fazenda Rio Capim possui 600 fornos de alvenaria que diariamente produzem carvão com resíduos do manejo florestal certificado.

2.2. Descrição da cadeia produtiva do carvão vegetal de resíduos de PMFS

A cadeia produtiva do carvão vegetal de madeiras residuais de PMFS foi acompanhada desde a fase de geração de resíduos na colheita florestal de toras de espécies tropicais amazônicas até a expedição do carvão vegetal para fins siderúrgico na região do Carajás. Nesse sentido, a cadeia foi descrita com base em informações cedidas pela empresa e observações *in loco* na área de manejo florestal e unidade de produção de carvão vegetal da Fazenda Rio Capim. Essas informações bem como as fotografias obtidas durante a expedição de campo foram cruciais na elaboração do fluxograma geral (Figura 1), que visa descrever com detalhes as etapas relacionadas a cadeia produtiva do carvão vegetal.

A Figura 1 evidencia o fluxograma geral da cadeia produtiva de carvão vegetal com resíduos lenhosos gerados em PMFS na Fazenda Rio Capim, localizada em Paragominas, Pará. As etapas concernentes a obtenção dos resíduos, produção e expedição do carvão vegetal para a indústria metalúrgica Dow podem ser evidenciadas. Trata-se de uma companhia que utiliza o carvão vegetal para produção de silício metálico na cidade de Breu Branco, Estado do Pará.

2.3. Coleta de dados referentes ao quantitativo de resíduos gerados pelo manejo florestal

Essa etapa consistiu na obtenção da massa dos resíduos em balança rodoviária pertencente à própria empresa. Os resíduos quantificados foram basicamente galhos, restos de troncos não aproveitados pela colheita florestal e raízes tabulares.

Os resíduos foram retirados do interior da florestal com o uso do Skidder. Posteriormente, foi feito o empilhamento no pátio de estocagem da floresta com um trator com garfo, onde foram separados por classe de comprimento no pátio. Posteriormente, os resíduos foram transportados por caminhões do tipo romeu e julieta para a unidade de produção de carvão vegetal, onde a carga foi pesada na chegada. Os dados avaliados foram obtidos entre os meses de novembro e dezembro do ano de 2022. Os caminhões

foram pesados vazios e cheios com resíduos. Esses dados foram utilizados no cálculo da quantidade acumulada de resíduos transportados em toneladas por unidade de trabalho (UT). Os dados são referentes aos resíduos lenhosos obtidos

de quatorze UTs, com tamanho médio de 100 hectares, da unidade de produção anual (UPA) 22 do PMFS da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Estado do Pará.

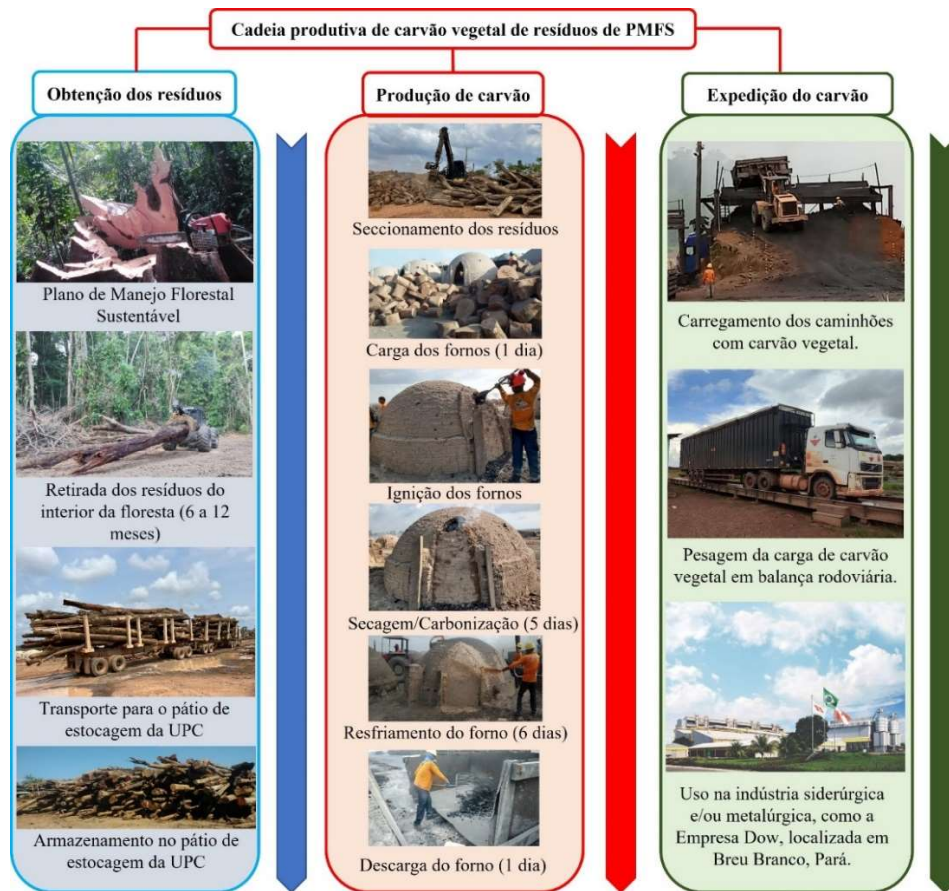


Figura 1. Fluxograma geral da cadeia produtiva do carvão vegetal de biomassa residual do manejo florestal sustentável praticado na Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

Figure 1. General flowchart of the residual biomass charcoal production chain of sustainable forest management practiced at Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

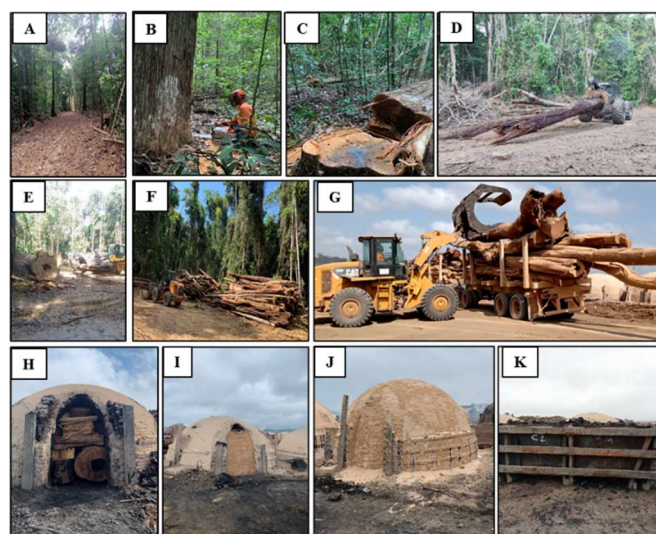


Figura 2. Cadeia produtiva do carvão vegetal: A – Abertura de estrada; B – Colheita das árvores previstas para corte; C – Estoque das madeiras colhidas; D, E, F – Estoque dos resíduos madeireiros; G – Transporte dos resíduos para o pátio de estocagem da unidade de produção de carvão vegetal; H – Enchimento dos fornos de alvenaria com resíduos lenhosos; I – Carbonização na unidade de produção; J – Resfriamento dos fornos; e K – Retirada do carvão vegetal produzido para expedição.

Figure 2. Charcoal production chain: A – Opening of a road; B – Harvesting of trees scheduled for cutting; C – Stock of harvested wood; D, E, and F – Stock of wood waste; G – Transport of waste to the storage yard of the charcoal production unit; H – Filling brick kilns with woody waste; I – Carbonization in the production unit; J – Kiln cooling; and K – Removal of charcoal produced for shipping.

A cadeia de produção de carvão vegetal é representada por etapas que ocorrem após a colheita florestal (Figuras 2A, 2B e 2C), dentro da floresta e na unidade de produção.

As seguintes etapas representam a cadeia produtiva de carvão atualmente praticada na Amazônia: estoque dos resíduos na floresta por período de um ano, retirada (Figuras 2D e 2E) e estocagem nos pátios de toras no interior da floresta (Figura 2F), transporte para o pátio de estocagem da unidade de produção de carvão com caminhão “romeu e julieta” (Figura 2G), seccionamento dos resíduos em toretes de menores dimensões, carbonização (Figuras 2H e 2I), resfriamento dos fornos (Figura 2J) e retirada e expedição do biorredutor (Figura 2K).

2.4. Análises estatísticas

Estatística descritiva, especialmente média, foi aplicada nos dados de resíduos transportados nos meses de novembro e dezembro de 2022 para a unidade de produção de carvão vegetal.

3. RESULTADOS

3.1. Estoque de resíduos na floresta

Após as operações de exploração de toras, o resíduo gerado permanece acumulado no interior da floresta, formando estoque de madeira com potencial de utilização (Figura 3). Segundo Lima et al. (2020) os resíduos podem ser aproveitados para produção de energia e lenha. Os autores reportaram a geração potencial de 100 mil toneladas de resíduos em PMFS na Amazônia por ano, quantidade substancial de subproduto que precisa de alternativas sustentáveis de uso.

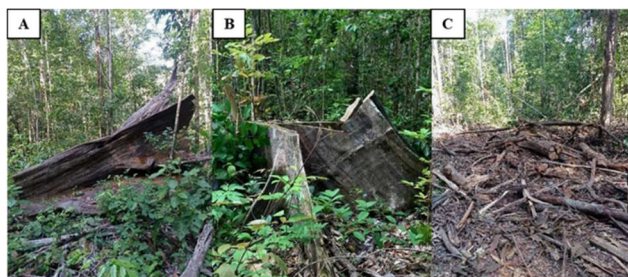


Figura 3. Resíduos do manejo florestal sustentável.
Figure 3. Wastes from sustainable forest management.

Na UMF-Rio Capim, o resíduo oriundo da exploração florestal é destinado a Unidade de Produção de Carvão Vegetal (UPC), para a transformação desses resíduos em carvão vegetal de madeira nativa de alto valor agregado. A extração desses resíduos ocorre após período de 6 meses a 1 ano após a finalização das atividades de exploração da UPA com o intuito de evitar possíveis acidentes causados por fustes de outras árvores sem sustentação completa e galhos soltos.

3.2. Transporte dos resíduos do interior da floresta para os pátios de estocagem

A Tabela 1 demonstra dados de pesagens de resíduos ocorridas nos meses de novembro e dezembro de 2022 na Fazenda Rio Capim. Os dados são referentes a resíduos obtidos de quatorze unidades de trabalho (UT) da unidade de produção anual (UPA) 22. Com base nos dados, observa-se variação de 19,56 a 2270,08 toneladas de resíduos. Essa

considerável variação está associada ao reduzido número de funcionários, alta ocorrência de chuvas na unidade, tamanho das UPAS, período em que foram avaliadas e ao elevado quantitativo de maquinários com defeito por conta das condições operacionais da malha viária. Observa-se que a UT 59 apresentou maior quantitativo de resíduos transportados no período estudado. Em 2 meses foram retiradas 8.775,92 toneladas de resíduos.

3.4. Caracterização dos fornos de alvenaria

Os fornos para carbonização utilizados, conhecidos vulgarmente como “fornos rabo quente”, são construídos de alvenaria e, a argila é utilizada como agente cimentante. Para o processo de produção de carvão na UPC são utilizados fornos com medidas de 3,20 m no diâmetro da base e 2,5 m de altura (Figura 4). Cada forno possui capacidade de 9 a 10 toneladas de lenha e produz, cerca de 1.900 kg de carvão, quando carbonizadas madeiras sem segregação (LIMA et al., 2023). Cada forno possui 1 chaminé, 6 tatus na base e 6 baianas na zona superior, que são aberturas utilizadas para controlar a entrada de oxigênio nos fornos e direcionar a frente de carbonização.

Tabela 1. Massa total de resíduos retirados no período de dois meses em 14 Unidades de trabalho da unidade de produção anual 22.
Table 1. Total mass of waste removed over a two-month period in 14 work units of annual production unit 22.

Unidade de trabalho	Área (ha)	Massa úmida (toneladas)
3	94,92	19,56
6	92,60	22,98
7	96,53	154,18
8	96,93	90,04
25	101,71	737,16
26	88,49	484,14
27	92,90	633,94
28	95,99	1.404,24
29	100,47	256,2
30	104,46	1.001,94
56	98,90	175,14
57	98,67	279,94
58	98,30	1.246,38
59	99,71	2.270,08
Total	-	8.775,92



Figura 4. Fornos de alvenaria do tipo rabo quente para a produção de carvão vegetal oriundo da colheita florestal em PMFS.
Figure 4. Hot tail brick kilns to produce charcoal from forest harvesting in SFMP.

De acordo com Lima et al. (2020a, 2023), a segregação é a separação dos resíduos em grupos com propriedades tecnológicas da madeira similares. Os autores afirmam que a segregação é uma importante alternativa para otimizar/aumentar o rendimento gravimétrico em carvão vegetal da unidade de produção e a produtividade por forno de alvenaria, bem como reduzir as emissões de gases para a atmosfera.

Os fornos de alvenaria são amplamente utilizados no Brasil devido ao seu baixo custo de implantação, operação e manutenção. Por outro lado, são fornos com baixo nível de tecnologia, que combinada com o enfiamento de matérias-primas heterogêneas, apresenta baixa eficiência de conversão, baixa produtividade, baixa eficiência energética, baixo rendimento gravimétrico (em torno de 20%, na base úmida), carvões heterogêneos (RODRIGUES et al., 2023; LIMA et al., 2023; RODRIGUES & BRAGHINI JUNIOR, 2019), alta produção de madeira semicarbonizada, longo tempo de resfriamento, alto teor de gases poluentes e difícil recuperação de subprodutos (BUSTOS-VANEGAS et al., 2018). Nesse modelo de carbonização, o processo é frequentemente conduzido empiricamente, com base na cor e quantidade de fumaça, além da temperatura da parede do forno ser percebida pelo toque de trabalhadores experientes (RODRIGUES et al., 2023; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019; BUSTOS-VANEGAS et al., 2018).

A vida útil dos fornos de alvenaria é de aproximadamente 6 meses, sempre havendo reparos entre os ciclos de carbonização. O trabalho é feito por metas diárias, onde o colaborador responsável pode: 1) encher de forma manual dois fornos com resíduos, 2) encher um forno manualmente com resíduo e esvaziar um forno de carvão ou 3) esvaziar três fornos de carvão por dia. A alternância de metas é importante pois garante a rotatividade de tarefas. Nessas atividades é obrigatório o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) para garantir a segurança e saúde do colaborador. Nesse sentido, esses equipamentos são frequentemente fornecidos pela empresa.

O controle da unidade de produção de carvão vegetal em relação as fases do processo de carbonização em que os fornos se encontram, além da identificação dos fornos em construção ou reforma, fornos caídos e abertos é relevante para o sucesso do funcionamento da unidade de produção. Esse controle pode ser feito por meio de painéis ilustrativos, intuitivos e dinâmicos (Figura 5).



Figura 5. Controle da unidade de produção de carvão vegetal por meio de painel ilustrativo.

Figure 5. Control of the charcoal production unit using an illustrative panel.

3.5. Enchimento dos fornos

Antes de iniciarem a jornada de trabalho, os colaboradores participam do Diálogo Diário de Segurança (DDS), onde recebem recomendações pertinentes a segurança no trabalho. Além disso, realizam ginástica laboral, que tem como objetivo melhorar sua capacidade funcional e prevenir lesões ocupacionais.

Posteriormente, os resíduos são seccionados por uma escavadeira florestal (CAT 320D FM Sotreq) com garra traçadora acoplada para obtenção de toretes, com comprimento de até 45 cm, visando à padronização nas peças (Figura 6A), facilitando assim o transporte para a frente dos fornos (Figura 6B) e o seu enchimento (Figura 6C). No enchimento dos fornos, o colaborador é obrigado a usar os seguintes EPIs: luva para impacto e anticorte, bota de couro com bico de aço, máscara semifacial com filtro para gases, óculos de proteção, boné com casquete de segurança e o fardamento da empresa.



Figura 6. Enchimento dos fornos de alvenaria com resíduos seccionados, partindo do seccionamento dos resíduos (A), deposição das peças em frente aos fornos (B) e enchimento (C).

Figure 6. Filling of the brick kilns with sectioned waste, starting from the sectioning of the waste (A), deposition of the parts in front of the kilns (B) and filling (C).

A operação de carga dos fornos é manual. Nesse sentido, os riscos à saúde e segurança estão associados a carga física, movimentos repetitivos, probabilidade de incêndios, o manuseio dos resíduos, ruído dos maquinários, posturas inadequadas, exposição aos gases da carbonização e riscos de lesão.

O fornecimento de EPIs, sinalização da unidade de produção em relação ao trânsito de veículos e máquinas pesadas (Figura 7A), elaboração e divulgação de mapa de risco (Figura 7B), instalação de área de vivência (Figura 7C), realização de ginástica laboral, DDS, treinamento em ergonomia, primeiros socorros e segurança nas operações e práticas que visem a melhoria das condições de trabalho, como a redução do tamanho das peças de resíduos são cruciais para a redução dos acidentes, especialmente na unidade de produção de carvão descrita no presente estudo. Essas práticas contribuem para a melhoria do desempenho do colaborador, de sua saúde e segurança. Essa unidade de produção de carvão conta com estrutura de ambulatório e profissionais qualificados para primeiros cuidados em casos de acidentes no trabalho.

Antes de acondicionar os resíduos nos fornos, é feito o calçamento com pedaços de madeira de 10 cm de espessura para evitar que os resíduos tenham contato com o solo. Essa medida é adotada para que ocorra a carbonização de toda a matéria presente no forno, tendo em vista que a madeira que permanecer em contato com o solo não será totalmente carbonizada devido a circulação de ar dificultada (LIMA et al., 2023).

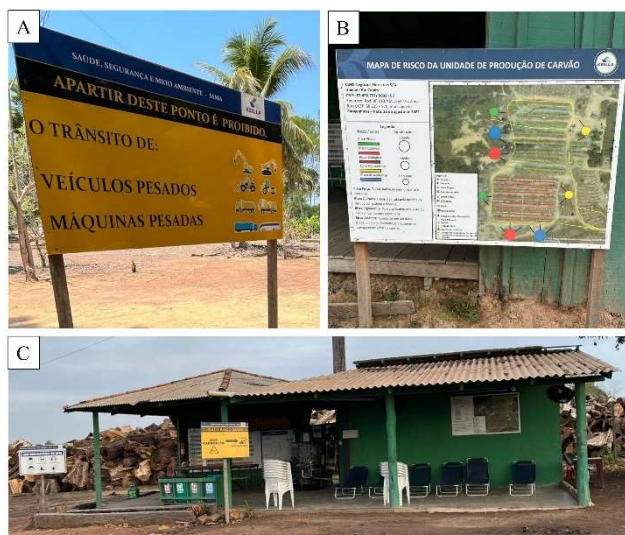


Figura 7. Ações de mitigação dos riscos associados a atividade na unidade de produção de carvão vegetal: sinalização da unidade de produção em relação ao trânsito de veículos e máquinas pesadas (A), elaboração e divulgação de mapa de risco (B) e instalação de área de vivência (C).

Figure 7. Actions to mitigate the risks associated with the activity at the charcoal production unit: signage of the production unit in relation to the traffic of vehicles and heavy machinery (A), preparation and dissemination of a risk map (B), and installation of living area (C).

3.6. Ignição dos resíduos

Após o enchimento dos fornos é dada a ignição da madeira (Figura 8A). Essa etapa se dá por meio dos chamados “ninhos” (Figura 8B), uma pequena abertura de aproximadamente 15 centímetros deixada durante o fechamento na porta dos fornos onde é colocado a brasa para início da combustão. O ciclo de operação dos fornos é de em média 13 dias, considerando a carga (1 dia), secagem e carbonização (5 dias), resfriamento (6 dias) e descarga (1 dia) (BARROS et al., 2023; LIMA et al., 2023).



Figura 8. Ignição das madeiras residuais por meio de aberturas denominada de “ninhos”.

Figure 8. Ignition of waste wood using openings called “ninhos” (in portuguese).

3.7. Carbonização da matéria prima

O processo de carbonização é realizado de forma empírica, onde o carbonizador controla o processo com base na coloração da fumaça que sai de aberturas conhecidas popularmente por “tatus” e “baianas” e com base no tato, ao tocar a parede dos fornos (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019). Nos primeiros dias, as baianas e tatus são

deixados abertos para observação da saída de fumaça branca, que representa a primeira fase da carbonização, que é a secagem da madeira (LIMA et al., 2023; BARROS et al., 2023). O final da carbonização ocorre quando não é detectada a saída de um grande volume de fumaça na chaminé do forno e a coloração da fumaça tende a ser azul transparente. Este é o momento de vedar completamente o forno e começar a resfriá-lo por meio do barrelamento. As Figuras 9A e 9B demonstram o processo empírico de carbonização. Já a Figura 9C demonstra a produção de atíço, um subproduto do processo.

3.8. Resfriamento e abertura dos fornos

O processo de resfriamento do forno ocorre pelo barrelamento, que consiste na aplicação de água e argila (Figura 10A e 10B). Um trator com tanque pipa é utilizado nesse processo (Figura 10C), em que uma mistura de água e argila utilizando cerca de 1.100 litros de água para 660 kg de barro é despejado. O barrelamento é feito uma vez por dia durante dois dias, visando resfriar e fechar totalmente qualquer abertura do forno para que se empeça a entrada de oxigênio, evitando a ignição do carvão vegetal.



Figura 9. Fornos em processo de carbonização (A e B) e matéria prima semicarbonizada (C).

Figure 9. Furnaces in the process of carbonization (A and B) and semi-carbonized raw material (C).



Figura 10. Barrelamento dos fornos (A e B) e maquinário utilizado para essa operação (C).

Figure 10. Barrelling of the kilns (A and B) and machinery used for this operation (C).

3.9. Retirada e armazenamento do carvão vegetal

O carvão é retirado dos fornos e armazenado em caixas metálicas com capacidade de 9,7 m³ (Figura 11) (LIMA et al., 2023). Esse processo é manual, em que o colaborador é responsável por descarregar o forno utilizando garfo forçado de aço com uso dos mesmos EPIs descritos na etapa de enchimento (ver seção 3.5).

Após a abertura dos fornos, pode ocorrer a reigñição do carvão vegetal, especialmente quando não é observada a temperatura de referência ($\leq 50^{\circ}\text{C}$). Nesse sentido, o colaborador responsável marca a caixa em que ocorreu ignição e lança água para cessar o fogo. Em seguida, o carvão

deverá passar por processo de secagem natural, em que permanece nas caixas metálicas em condições de temperatura ambiente ($\sim 28^{\circ}\text{C}$) até atingir umidade abaixo de 5%. Esse controle é feito com a coleta de amostras de forma aleatória nas caixas e levado ao laboratório de qualidade do carvão da unidade.



Figura 11. Carvão vegetal armazenado em caixas metálicas.
Figure 11. Charcoal stored in metal boxes.

O carvão é armazenado em contêineres de metal que servirão de recipiente durante alguns dias até a expedição. A temperatura é um ponto essencial no controle de qualidade do carvão, pois a temperatura ambiente (aproximadamente 28°C) é a ideal para expedição do produto, evitando a combustão espontânea dentro dos caminhões durante o transporte até a siderúrgica. O container permanece coberto com uma lona para protegê-lo do sol e da chuva.

3.10. Carregamento e expedição do carvão vegetal

Após o carvão atingir a umidade exigida pelo comprador ($\leq 5\%$, base úmida), os contêineres de carvão são destinados ao carregamento dos caminhões, os quais passam por uma balança industrial para a pesagem da carga. Na comercialização, a produção é vendida atualmente por toneladas de carvão para finalidade industrial, especialmente siderurgia.

Baseando-se na simulação da produção de 1.763,96 toneladas de carvão mencionadas anteriormente, nesta unidade, e no valor da tonelada de carvão de madeira nativa residual (R\$ 1.000), é possível obter R\$ 1.763.960 de valor bruto sem adicionar os custos de produção e transporte. Vale ressaltar que é uma receita dividida para os meses mencionados.

4. DISCUSSÃO

4.1. Estoque de resíduos na floresta

Quando há a liberação para início do manejo, a equipe responsável pela colheita das árvores inicia o planejamento e execução do trabalho. Para isso, utilizam os mapas das Unidades de Produção Anual (UPA) definida pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) N° 406 como subdivisão da área de manejo florestal, destinada a ser explorada no período de um ano. A UPA é dividida em Unidades de Trabalho (UTs), definida pela mesma resolução como subdivisão operacional da UPA.

Esses mapas contêm as informações sobre as árvores que serão exploradas, as árvores substitutas, caso as árvores escolhidas não possam ser derrubadas, e as árvores proibidas de corte, seja por ela estar em uma área de risco, em área de preservação permanente ou por ser uma espécie proibida para corte definida na Autorização de Exploração Florestal

(AUTEX). Esse documento, conforme a resolução CONAMA N° 406 é expedido pelo órgão competente que autoriza o início da exploração da UPA e especifica o volume máximo por espécie permitido para exploração. Essas informações são adquiridas por meio do Inventário Florestal (IF) a 100% ou censo, definido pela Instrução Normativa N° 8/2021 como atividade que visa obter informações quantitativas e qualitativas dos recursos florestais existentes em uma área pré-especificada. O IF deve ser feito no mínimo um ano antes da exploração ser iniciada, demarcando as árvores que serão exploradas com o uso de plaquetas de ferro. Essas operações são fundamentais para o adequado planejamento e abertura das estradas de arraste.

Durante a exploração da UPA, existem atividades que acabam gerando grandes quantidades de resíduos. Tratando-se de uma floresta natural de terra firme, os resíduos florestais oriundos das árvores colhidas podem ser aproveitados, haja vista, a possibilidade de agregar maior valor econômico às espécies. Todavia, torna-se necessário a melhor utilização deste recurso florestal levando em consideração o uso múltiplo dos resíduos (LEITE, 2009).

Com base na Instrução Normativa da SEMA do Estado do Pará n° 02, de 13 de maio de 2011, o aproveitamento dos resíduos lenhosos na Amazônia só é possível quando descrito pelo responsável técnico no Plano de Manejo Florestal Sustentável/Plano Operacional Anual, plano de exploração florestal e/ou plano de utilização de resíduos lenhosos de forma detalhada. Além disso, os procedimentos para retirada e a finalidade dos resíduos precisam estar claros. O volume autorizado no primeiro ano fica limitado a 1 m^3 de resíduo por metro cúbico de tora autorizada, ou definido por meio de cubagem. A autorização a partir do segundo ano somente será emitida com base em relação dendrométrica desenvolvida para a área de manejo ou em inventário de resíduos.

A abertura das estradas, pátios e ramais de arraste, a derrubada de árvores e a extração de toras são as principais operações geradoras de resíduos. O aproveitamento dos resíduos florestais vem sendo cada vez mais evidenciado, com a possibilidade de aproveitamento desses materiais para produção de carvão vegetal. Os resíduos florestais podem ser galhos, raízes, restos de tronco e sapopemas (FRANCEZ et al., 2007). Em geral, a parte mais aproveitável do resíduo são os galhos devido a uma grande quantidade, que pode propiciar variados produtos. Árvores de grande porte geram elevada quantidade de madeira que pode ser utilizada no setor moveleiro, fabricação de pequenos artefatos, e carvoaria (LEITE, 2009).

4.2. Transporte dos resíduos do interior da floresta para os pátios de estocagem

A atividade de arraste das peças de resíduos na UMF-Rio Capim se inicia com o planejamento das estradas estratégicas para o processo de extração dos resíduos de dentro da floresta. Como a área já foi previamente explorada durante o manejo, preza-se pela reutilização das rotas utilizadas para a colheita das toras (estradas de acesso, estradas principais, estradas secundárias e ramais de arraste). Essas estradas podem ser reaproveitadas para a retirada dos resíduos, reduzindo o impacto sobre as florestas naturais.

Inicialmente é realizado o mapeamento das rotas para a entrada da máquina de extração com o uso de fitas de diferentes colorações e é orientado pelos mapas gerados para a extração da UPA. Essa operação dependerá da localização

das pilhas de resíduos na floresta e do pátio de estocagem de madeiras.

Após o zoneamento inicia-se a extração dos resíduos do interior da floresta até os pátios anteriormente utilizados para estocagem das toras. Essa etapa é realizada com auxílio dos Skidders, trator florestal utilizado para o arraste de toras com o uso de garras ou auxílio de cabos de aço.

As rotas de arraste dos resíduos florestais precisam ser planejadas de forma com que o trajeto feito pela máquina até o local de coleta, seja o mesmo utilizado na volta com a retirada do resíduo. Esse mecanismo de entrada e saída pelo mesmo local, possibilita reduzir o impacto causado pela movimentação de maquinário pesado na floresta, conservando os recursos naturais e os serviços ecológicos da floresta, como a ciclagem de nutrientes.

Após o deslocamento dos resíduos no interior da floresta, é feito o empilhamento no pátio de estocagem, anteriormente utilizado para empilhar toras de madeira. O skidder transporta as peças de madeiras residuais de interesse comercial para o pátio, onde outro trator com garfo acoplado realiza o empilhamento desses resíduos, separando-os por classe de comprimento no pátio (Figura 12). Posteriormente, os resíduos são transportados por caminhões do tipo romeu e julieta ou caminhões basculantes, diretamente ao pátio de estocagem de resíduos da UPC Rio Capim, onde serão carbonizados. No entanto, toda carga de resíduos transportadas da floresta, são pesadas para controle da unidade.

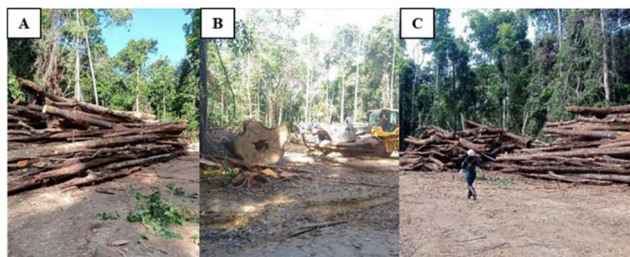


Figura 12. Transporte de resíduos ao pátio de estocagem anteriormente utilizado para toras.

Figure 12. Transportation of waste to the storage yard previously used for logs.

O controle da quantidade de resíduos retirados de dentro da floresta é importante para o planejamento da produção de carvão vegetal da unidade. Com base na quantidade de madeira especificada na Tabela 1 e no atual rendimento médio em carvão vegetal (20,1%) apresentado no estudo de Lima et al. (2023), é possível simular a produção de 1.763,96 toneladas de carvão vegetal.

4.3. Caracterização dos fornos de alvenaria

O baixo rendimento e produtividade dos fornos está associada a heterogeneidade da matéria prima e baixo nível tecnológico dos fornos de carbonização. A alta variação das propriedades tecnológicas das madeiras dificulta o controle do processo, aumenta a emissão de gases e reduz a qualidade do carvão vegetal produzido (BARROS et al., 2023).

4.4. Carbonização da matéria prima

Conforme o conhecimento empírico dos colaboradores da empresa, quando ocorre a mudança da cor da fumaça nas baianas para marrom, se entende que é o momento de fechá-las. O carbonizador aguarda a mudança da cor da fumaça que

sai pelos tatus; quando ocorre essa mudança, o operador insere um tijolo nas aberturas inferiores para cobrir parcialmente a abertura. O colaborador aguarda nova mudança na cor da fumaça para azul e enfim fecha os tatus. Após esse processo, aguarda-se o cessar da fumaça na chaminé para realizar o isolamento total da abertura com argila. O objetivo é impedir a entrada de oxigênio para que encerre o processo de carbonização.

4.5. Resfriamento e abertura dos fornos

Após os dois dias de barrelamento, o carbonizador faz um teste de tato, utilizando a palma da mão na superfície externa do forno para analisar se já pode ser aberto. Se o forno estiver com temperatura julgada pelo carbonizador, segura, abaixo de 60°C, é realizada uma abertura oposta a porta de enchimento, para realizar a retirada do carvão. A função do carbonizador requer bastante atenção e experiência, pois se o forno for aberto em uma temperatura acima da mencionada, existe o risco de reignição e acidente grave, devido o contato da matéria prima com oxigênio. A reignição promove perda de qualidade do biorredutor, sendo necessário maior controle da temperatura para abertura no momento ideal.

4.6. Retirada e armazenamento do carvão vegetal

Lima et al. (2023) recomendam que carvões com ocorrência de reignição devem permanecer no pátio de estocagem por um período maior para secagem, pois a utilização de carvão com umidade elevada apresenta redução do poder calorífico. Se o carvão for retirado antes da carbonização se completar, é classificado como atíço, o que não é adequado para uso siderúrgico. Atíço representa os subprodutos da produção de carvão, sendo assim, reduz a produtividade e rendimento da unidade de produção. Assim, maior controle do processo e investimento em tecnologia de carvão pode contribuir para a redução da produção de atíço.

Apesar da proteção, em determinadas épocas do ano com temperaturas elevadas, o container metálico é aquecido a temperatura externa acima de 30°C, aumentando os riscos de autocombustão, o que dificulta o controle. É possível que a segregação de madeiras residuais em classes de qualidade possa reduzir a possibilidade de autocombustão.

4.7. Carregamento e expedição do carvão vegetal

A expedição é a última etapa do processo produtivo da UPC, onde o carvão é expedido para a indústria e incorporados no processo siderúrgico. É importante salientar que, segundo a Portaria nº 253, de 18 de agosto de 2006, do Ministério do Meio Ambiente (MMA) é necessário o Documento de Origem Florestal (DOF) para o transporte do carvão oriundo de resíduos da indústria madeireira pelas rodovias federais.

5. CONCLUSÕES

A cadeia de produção de carvão vegetal inicia-se no manejo florestal sustentável, com a geração de resíduos, matéria prima renovável promissora para bioenergia no Carajás. Além dessa etapa, destaca-se: estocagem dos resíduos na floresta, transporte dos resíduos para o pátio de estocagem da unidade de produção, carbonização, resfriamento, retirada e expedição do carvão vegetal.

Nos meses de novembro e dezembro de 2022 foram transportadas 8.775,92 toneladas de resíduos para esta unidade de produção de carvão vegetal.

Os principais gargalos observados na produção de carvão com resíduos foram: heterogeneidade da madeira, estocagem e armazenamento ao ar livre e utilização de fornos de baixo aparato tecnológico.

6. REFERÊNCIAS

- BARROS, D. S.; LIMA, M. D. R.; JUNIOR, A. F. D.; BUFALINO, L.; MASSUQUE, J.; SANTOS, E. V.; TRUGILHOS, P. F.; OLIVEIRA, F. A.; PROTASIO, T. P. Does the segregation of wood waste from Amazonia improve the quality of charcoal produced in brick kilns? **Bioenergy Research**, v. 16, p. 1604-1617, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10551-w>
- BRASIL. Instrução Normativa N° 5. **Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de planos de manejo florestal sustentável-PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia legal, e dá outras providências**. DOU N° 162, de 11 de dezembro de 2006.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei N° 12.727, de 17 de outubro de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, Diário Oficial da União, Brasil, 2012.
- BARROS, D. S.; LIMA, M. D.; JUNIOR, A.; BUFALINO, L.; MASSUQUE, J.; SANTOS, E. V.; TRUGILHOS, P. F.; OLIVEIRA, F. A.; PROTASIO, T. P. Does the segregation of wood waste from Amazonia improve the quality of charcoal produced in brick kilns?. **BioEnergy Research**, v. 16, p. 1604-1617, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10551-w>
- BUSTOS-VANEGAS, J. D.; CARNEIRO, A. C. O.; FREITAS, A. G.; BARBOSA, R. C. Thermal inertia effects of the structural elements in heat losses during the charcoal production in brick kilns. **Fuel**, v. 226, p. 508-515, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.024>
- CRUZ FILHO, D.; SILVA, J. N. M. Avaliação da quantidade de resíduos lenhosos em floresta não explorada e explorada com técnicas de redução de impactos, utilizando amostragem por linha interceptadora, no Médio Mojú, Amazônia Oriental, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 3p. 527-532, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000300006>
- DIONISIO, L. F. S.; MARTINS, S.; CARVALHO, P. O. J.; LOPE, J. C. A. Volume of commercial timber found dead in managed Amazonian natural forests: Is it possible to take advantage?. **Forest Ecology and Management**, v. 521, e120441, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120441>
- FRANCEZ, L. M. D. E. B.; CARVALHO, J. O. P.; JARDIM, F. C. S. Mudanças ocorridas na composição florística em decorrência da exploração florestal em uma área de floresta de Terra firme na região de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 2, p. 219-228, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000200007>
- LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; JUNIOR, U. O. B.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHOS, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTASIO, T. P.. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, e105660, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105660>
- LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; PROTASIO, T. P. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, e105804, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105804>
- LIMA, M. D. R.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; JUNIOR, A. F. D.; PROTASIO, T. P.; HEIN, P. R. G. Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. **Renewable Energy**, v. 12, p. 584-594, 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.048>
- LIMA, M. D. R.; TRUGILHO, P. F.; BUFALINO, L.; JUNIOR, A. F. D.; RAMALHO, F. M. G.; PROTASIO, T. P.; HEIN, P. R. G. Efficiency of near-infrared spectroscopy in classifying Amazonian wood wastes for bioenergy generation. **Biomass Bioenergy**, v. 166, e106617, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106617>
- LIMA, M. D. R. Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. **Renewable Energy**, v. 211, p. 772-788, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.126>
- MASSUQUE, J. LIMA, M. D.R.; SILVA, P. H. M.; PROTASIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Potential of charcoal from non-commercial *Corymbia* and *Eucalyptus* wood for use in the steel industry. **Renewable Energy**, v. 211, p. 179-187, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.061>
- NUMAZAWA, C. T. D.; NUMAZAWA, S.; PACCA, S.; JOHN, V. M. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280-285, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016>
- OLIVEIRA, M. E. Q.; SILVA JR, A. J.; CARNEIRO, A. C. O.; NOBRE, J. R. C. Análise da conjuntura da produção de carvão vegetal no Brasil e no Estado do Pará. **Concilium**, v. 23, n. 21, p. 89-107, 2023. <https://doi.org/10.53660/CLM-2393-23S17>
- PALACE, M.; KELLER, M.; ASNER, G. P.; SILVA, J. N.; PASSOS, C. Necromass in undisturbed and logged forests in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 238, n. 1-3, p. 309-318, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.10.026>
- PARÁ Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Instrução Normativa 05, de 10 de Setembro de 2015. **Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Plano de Manejo Florestal Sustentável – PMFS nas florestas**. Diário Oficial do Estado, Brasil, 2015.
- PEREIRA, A. A.; LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; NUMAZAWA, S.; GOULART, S. L.; PROTASIO, T. P. Grouping of wood residues from sustainable forest management aiming at bioenergy generation. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, e3157, 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.01>
- RODRIGUES, T.; BARCELLOS, D. C.; JUNIOR, A. B. State of the art on development and improvement of slow carbonization kilns for charcoal production. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 176, e106257, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106257>
- RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, e104670, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>
- SANTOS, P. C.; DE SANTANA, A. C.; QUEIROZ, J. C. B.; DE BARROS, P. L. C.; DE SANTANA, A. L. Estimativa volumétrica de resíduos lenhosos de madeira

em uma floresta tropical através da krigagem ordinária, Paragominas, estado do Pará. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 959-968, 2014. <https://doi.org/10.1590/1980-509820142404015>

SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y.; GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000100007>

Agradecimentos: Os autores expressam seus sinceros agradecimentos ao Grupo Keilla pelo apoio operacional e logístico na realização do estudo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

Contribuição dos autores: M.D.R.L.; I.V.S.: Metodologia, investigação ou coleta de dados, análise estatística, administração ou supervisão, validação, redação (rascunho original) e redação (revisão e edição). P.P.B.C.; L.F.S.D.; J.R.; D.H.A.; F.A.R.; M.V.C.P.; P.R.G.H.; T.P.P.: Conceituação, Análise estatística, validação, redação (rascunho original) e redação (revisão e edição). Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: CNPq Processos 406593/2021-3 e 406053/2022-7.

Disponibilização de dados: Os dados podem ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente, via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses. As entidades de apoio não tiveram qualquer papel na concepção do estudo; na coleta, análise ou interpretação de dados; na redação do manuscrito ou na decisão de publicação dos resultados.