



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL – BACHARELADO

**IRISLANE VIEIRA SANTOS**

**CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS MADEIREIROS  
DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL: UM ESTUDO DE CASO NO POLO  
SIDERÚRGICO DA REGIÃO DO CARAJÁS**

Imperatriz – MA

2023

**IRISLANE VIEIRA SANTOS**

**CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS MADEIREIROS  
DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL: UM ESTUDO DE CASO NO POLO  
SIDERÚRGICO DA REGIÃO DO CARAJÁS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

**Orientador:** Prof. Dr. Michael Douglas Roque Lima

Imperatriz – MA

2023

S237c

Santos, Irislane Vieira

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 – Imperatriz, MA, 2023.

30 f.; il.

Monografia (Curso de Engenharia Florestal) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Imperatriz, MA, 2023.

1. Exploração Florestal. 2. Manejo florestal sustentável. 3. Carvão vegetal. I. Título.

CDU 630\*0:622.3

Ficha elaborada pelo Bibliotecário: **Raniere Nunes da Silva CRB13/729**

**IRISLANE VIEIRA SANTOS**

**CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL DE RESÍDUOS MADEIREIROS  
DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL: UM ESTUDO DE CASO NO POLO  
SIDERÚRGICO DA REGIÃO DO CARAJÁS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

**Orientador:** Prof. Dr. Michael Douglas Roque Lima

Aprovada em: 14/06/2023

**BANCA EXAMINADORA**



---

**Michael Douglas Roque Lima**  
**Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira**  
**Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL**  
**(Orientador)**



---

**Joabel Raabe**  
**Doutor em Ciências Florestais**  
**Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL**  
**(Membro)**



---

**Luiz Fernandes Silva Dionisio**  
**Doutor em Ciências Florestais**  
**Universidade Federal de Roraima – UFRR**  
**(Membro)**

## 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 para a atividade madeireira no Brasil, pois essa biomassa apresenta potencial interessante no que diz respeito à produção de carvão e lenha. O presente trabalho 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 estudo 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 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. Esse estudo dispõe de informações relevantes para o futuro da atividade energética na região do Carajás que representa o segundo maior polo siderúrgico do Brasil.

**Palavras-chave:** Exploração florestal. Biomassa residual. Biorredutor. Florestas naturais

## 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 the harvesting stage, especially branches and buttresses. The use of residual biomass, which is stored inside the forests, constitutes an important sustainability strategy for logging activity in Brazil, as this biomass presents interesting potential regarding the production of charcoal and firewood. 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 the generation of waste, a promising renewable raw material for bioenergy in Carajás. 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. This study has relevant information for the future of energy activity in the Carajás region, which represents the second largest steel pole in Brazil.

**Keywords:** Logging. Residual biomass. Bioreducer. Natural forests

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>8</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>9</b>
<b>3.1 Plano de manejo florestal sustentável .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2 Geração de resíduos .....</b>	<b>10</b>
<b>3.3 Produção de carvão vegetal de resíduos.....</b>	<b>11</b>
<b>3.4 Cadeia produtiva .....</b>	<b>13</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1 Área de realização do estudo .....</b>	<b>14</b>
<b>4.2. Coleta de dados referentes ao transporte de resíduos.....</b>	<b>14</b>
<b>4.3. Análises estatísticas .....</b>	<b>14</b>
<b>5 DESCRIÇÃO DO PMFS DA FAZENDA RIO CAPIM.....</b>	<b>14</b>
<b>6 CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL.....</b>	<b>15</b>
<b>6.1 Estoque de resíduos na floresta .....</b>	<b>16</b>
<b>6.2 Transporte dos resíduos do interior da floresta para os pátios de estocagem .....</b>	<b>18</b>
<b>6.3 Caracterização dos fornos de alvenaria.....</b>	<b>20</b>
<b>6.4 Enchimento dos fornos.....</b>	<b>21</b>
<b>6.5 Ignição dos resíduos .....</b>	<b>22</b>
<b>6.6 Carbonização da matéria prima .....</b>	<b>23</b>
<b>6.7 Resfriamento e abertura dos fornos.....</b>	<b>24</b>
<b>6.8 Retirada do carvão .....</b>	<b>25</b>
<b>6.9 Armazenamento do carvão vegetal.....</b>	<b>26</b>
<b>6.10 Carregamento e expedição do carvão vegetal.....</b>	<b>27</b>
<b>7 LIMITAÇÕES DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL.....</b>	<b>27</b>
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>29</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As florestas naturais representam importantes fontes de biodiversidade de uma região, em termos de fauna e flora. 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 relevante ferramenta legal 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  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  diâmetro mínimo de corte  $\geq 50 \text{ cm}$  (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 constataram a alta quantidade de resíduos gerados pela colheita florestal (CRUZ FILHO; SILVA, 2009; NUMAZAWA et al., 2017; PALACE et al., 2007). No estudo de Cruz Filho & Silva (2009), o quantitativo de resíduos reportado foi de  $137.18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  para um plano de manejo florestal sustentável com intensidade de corte de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  na cidade de Moju, Estado do Pará. Galhos, sapopemas e restos de troncos podem ser incluídos na classificação de resíduos da exploração florestal (FRANCEZ; CARVALHO; JARDIM, 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 (LIMA et al., 2020a, 2020b). Contudo, há lacunas científicas acerca da cadeia produtiva desse importante insumo industrial na região supracitada.

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 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Descrever a cadeia de produção do carvão vegetal oriundo de resíduos lenhosos do plano de manejo florestal sustentável produzido no polo siderúrgico da região do Carajás.

### **2.2 Objetivos específicos**

Descrever o protocolo da produção de carvão de resíduos realizada pelo Grupo Keilla.

Promover a divulgação de informações relevantes para o futuro do setor energético na região Amazônica Brasileira.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Plano de manejo florestal sustentável

A Lei nº 12.727 de 17 de outubro de 2012 é o Código Florestal vigente no Brasil. Esta Lei estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente, áreas de Reserva Legal, lida ainda com questões de exploração florestal, suprimento de matéria-prima florestal, controle da origem dos produtos florestais, assim como, controle e prevenção dos incêndios florestais, e prevê instrumentos econômicos e financeiros para o alcance de seus objetivos (BRASIL, 2012).

O Código Florestal apresenta princípios importantes que devem ser observados no uso da matéria-prima florestal, especialmente, observando as diretrizes da sustentabilidade da atividade madeireira no Brasil. Nesse sentido, o aproveitamento dos resíduos para produção de carvão e lenha constitui uma forma de maximizar a eficiência do aproveitamento madeireiro no que tange ao PMFS, reduzindo os desperdícios. Além disso, no artigo 33 da legislação em questão consta que pessoas físicas ou jurídicas que utilizem de matéria prima florestal oriunda de PMFS são isentas da obrigatoriedade da reposição florestal (BRASIL, 2012).

O Código Florestal Brasileiro, no capítulo VII. Art. 31. Inciso IV, diz que o ciclo de corte deve ser compatível com o tempo de restabelecimento do volume de produto extraído da floresta. O ciclo de corte pode variar de 25 a 35 anos para PMFS Pleno e 10 anos para PMFS de baixa intensidade, conforme a IN MMA nº 5 de 11 de dezembro de 2006 (BRASIL, 2006) na Amazônia brasileira, que dependerá da intensidade de corte, que por sua vez relaciona a produtividade anual da floresta e o volume de madeira permitida para retirada por hectare no ano. Nesse sentido, a quantidade de resíduos está diretamente associada ao tipo de PMFS, bem como a sua intensidade de corte, ou seja, quanto maior a intensidade maior a geração de resíduos.

A Instrução Normativa nº 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 naturais exploradas ou não e suas formas de sucessão no Estado do Pará, e dá outras providências (PARÁ, 2015). Essa importante ferramenta de regulação de PMFS no referido estado, contribui efetivamente para o desenvolvimento regional, voltado principalmente a sustentabilidade. Diversos estudos científicos apoiam o PMFS, especialmente por gerar receitas e empregos, além de preservar a resiliência da floresta natural e contribuir diretamente no produto interno bruto do país. Para

Faria (1995), a existência e atualidade do plano de manejo, entre outros fatores, são fundamentais para a avaliação da efetividade do manejo de uma área.

Na Instrução Normativa nº 05 de 10 de setembro de 2015, os resíduos são previstos e conceituados como galhos, sapopemas, restos de troncos de árvores provenientes das árvores exploradas (árvores derrubadas), que podem ser utilizados como produtos secundários do manejo florestal para a produção de madeira e energia (PARÁ, 2015). Ainda nessa legislação, os métodos de extração, o volume a ser extraído, detalhes técnicos relacionados ao diâmetro mínimo, comprimento e locais de armazenamento de resíduos devem ser previstos na elaboração do PMFS.

### **3.2 Geração de resíduos**

Dentre os produtos derivados da madeira, o carvão tem posição de destaque na geração de energia. A utilização da biomassa para fins energéticos deve ser considerada como alternativa de fontes energéticas limpas (SILVA et al., 2007). Vale mencionar que a supressão de florestas naturais para bioenergia não é incentivada, mas sim a utilização dos resíduos oriundos da exploração florestal certificada.

No Brasil, pesquisas que envolvem resíduos lenhosos são ainda consideradas raras, especificamente na Amazônia, onde são gerados quantitativos elevados. Há lacunas de conhecimento sobre essa temática, em especial sobre a quantificação de resíduos lenhosos em florestas exploradas e sobre as formas de utilização deste material. Dionísio et al. (2022) apontam que essa biomassa pode ser aproveitada economicamente, especialmente para bioenergia.

Cruz Filho e Silva (2009) reportaram  $137,18 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de resíduos gerados em uma área que foi colhida com técnica de mínimo impacto no município de Moju, no Pará. Baker et al. (2007) realizando estudos em uma floresta na Amazônia peruana, quantificaram a geração de  $62,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de resíduos da exploração florestal. Seis meses após a exploração de impacto reduzido, Palace et al. (2007) verificaram  $121,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de resíduos lenhosos resultantes da operação.

Numazawa et al. (2017) verificaram que para cada 1 tonelada de madeira colhida em plano de manejo florestal sustentável, gera-se em torno de 2,13 toneladas de resíduos lenhosos. Lima et al. (2020) estudaram a produção de carvão vegetal com matéria prima residual de diversas espécies tropicais exploradas em regime de PMFS certificado na Fazenda Rio Capim, município de Paragominas, Estado do Pará. Os autores descreveram que esse PMFS gera

anualmente em torno de 100 mil toneladas de resíduos, quantidade substancial de subproduto que precisa de alternativas para aproveitamento.

São poucos os trabalhos que procuram mostrar a quantidade de biomassa desperdiçada em função do não aproveitamento de parte das árvores tais como fustes ocos, sapopemas e copas (galhos). Na realidade, devido à alta disponibilidade de madeira oriundo do fuste comercial, o aproveitamento dos resíduos não é previsto por uma grande parcela de empresários que atuam na exploração florestal. A maioria dos trabalhos que avaliam madeiras para fins energéticos referem-se a matéria prima de florestas plantadas e, naturalmente, adotam metodologias desenvolvidas para este tipo de floresta (SANTOS et al., 2014). Por outro lado, os poucos estudos não esclarecem a cadeia produtiva, de modo a considerar, as etapas de geração, transporte e produção de carvão vegetal na Amazônia Brasileira.

Lima et al. (2020) mostraram que os resíduos de madeira da Amazônia têm propriedades promissoras para a produção de carvão vegetal, como densidade básica (0,525–0,895 g/cm<sup>3</sup>), densidade energética (9,4–16,8 GJ/m<sup>3</sup>), extrativos totais (1,8–17,9%), lignina total (30,2–38,1%) e poder calorífico superior (19,1–20,9 MJ/kg). Variações importantes que precisam de atenção, haja vista que a heterogeneidade é o problema que precisa ser sanado na produção de biorredutor siderúrgico.

A pesquisa florestal deve atrelar ao manejo florestal conceitos dos produtos e subprodutos florestais, como os resíduos lenhosos. Os estudos devem ser baseados no aproveitamento de subprodutos, especialmente no ajuste de tecnologias viáveis de produção de carvão vegetal (FRANCEZ; CARVALHO; JARDIM, 2007). Além disso, os subprodutos oriundos do carvão vegetal, como os gases e o licor pirolenhoso, precisam ser estudados, pois são promissores para bioenergia, o que contribui para o desenvolvimento da biorefinaria, tendo como base o uso de madeira.

### **3.3 Produção de carvão vegetal de resíduos**

Os resíduos florestais com potencial energético são oriundos da exploração florestal e da indústria de beneficiamento mecânico da madeira. Essas indústrias geram grande quantidade de resíduos, resultado do baixo rendimento de conversão, que dispersos ao meio ambiente podem trazer sérios problemas de poluição, especialmente, em sua incineração sem um prévio controle ambiental (SILVA et al., 2018). Em relação à biomassa residual da exploração, os resíduos são estocados no interior da floresta, o que pode culminar em incêndios florestais (LIMA et al., 2020a). Acredita-se que a retirada dessa biomassa residual pode contribuir para

o impulsionamento da regeneração natural das florestas, pois a radiação solar atinge a superfície do solo, onde há banco de sementes e plântulas.

Silva et al. (2018) avaliaram a produção de carvão vegetal de resíduos de cinco espécies tropicais *Cordia geoldiana* Huber (freijó), *Hymenolobium petraeum* Ducke (angelim-pedra), *Hymenaea courbaril* (jatobá), *Tabebuia* spp. (ipê) e *Astronium lecointei* Ducke (muiracatiara) sob a temperatura final de carbonização de 500°C em condições de laboratório. Os autores verificaram valores interessantes para a densidade básica (0,520 – 0,710 g/cm<sup>3</sup>), rendimento gravimétrico (33,9 – 37,8%), densidade aparente (0,310 – 0,390 g/cm<sup>3</sup>), poder calorífico (7,3 – 7,0 kcal/kg), material volátil (22,9 – 38,3%), carbono fixo (60,4 – 75,8 %) e teor de cinzas (1,4 – 3,0%). Esses resultados corroboram a heterogeneidade da biomassa, o que pode reduzir a qualidade do biocombustível. Elevada variação da qualidade da madeira culmina em carvão vegetal com qualidade variável, o que não é indicado para fins siderúrgicos. Nesse sentido, estudos propõem a segregação das madeiras para produzir carvão vegetal (BARROS et al., 2023; LIMA et al., 2020a) e a técnica de espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) para auxiliar na identificação das espécies (LIMA et al., 2022).

Estudo conduzido por Lima et al. (2023) demonstrou a eficiência da produção de carvão vegetal com madeiras residuais segregadas, especialmente quanto aos índices de produtividade e de conversão e rendimento da unidade de produção. Os estudos atuais demonstram ganhos significativos avaliando a matéria prima, no entanto, novas tecnologias de processo associadas ao controle e produção precisam ser estudadas.

A heterogeneidade dos resíduos florestais é uma barreira importante para obtenção de bons resultados na carbonização (PEREIRA et al., 2018). Esse gargalo é baseado nas diferentes espécies e dimensões de peças de resíduos, o que dificulta a carbonização com maior aproveitamento do carvão vegetal (NUMAZAWA et al., 2017). Além disso, o atual modelo de carbonização de resíduos conta com fornos de alvenaria do tipo rabo-quente (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019), que representam cerca de 75% da produção nacional de carvão vegetal.

Embora os estudos demonstrem elevada qualidade dos resíduos para produção de carvão vegetal, a maioria avalia o processo em condições de laboratório, onde as características do processo (temperatura final e rampa de aquecimento) são rigorosamente controladas em fornos mufla (LIMA et al., 2020b). Dessa forma, os novos estudos devem evidenciar a realidade da produção de carvão com resíduos, que utiliza fornos de alvenaria do tipo rabo quente e matéria prima heterogênea. Vale destacar que os fornos do tipo rabo quente apresentam baixa eficiência

de conversão, rendimentos abaixo de 25% na base úmida, perdas térmicas e difícil controle do processo (MASSUQUE et al., 2023; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019)

Barros et al. (2023) descrevem algumas fases do processo produtivo de carvão adotando os fornos de alvenaria no município de Paragominas, Estado do Pará. Dentre as etapas, os autores detalharam a retirada do carvão, o transporte, estoque e expedição dos carvões de madeiras residuais. Maior detalhamento da cadeia produtiva de carvão vegetal é necessário, especialmente as fases ocorridas dentro das áreas de florestas naturais e na unidade de produção de carvão vegetal. Conforme Barros et al. (2023) e Lima et al. (2023), as principais etapas da carbonização em escala industrial são: carregamento dos toretes de madeira, enchimento dos fornos de alvenaria do tipo rabo-quente, ignição dos fornos, condução da carbonização, abertura dos fornos, retirada do carvão vegetal, carregamento, estoque e expedição do carvão vegetal. A lacuna centra-se nas atividades prévias que precisam ser descritas, com vistas ao maior detalhamento da cadeia de produção de carvão para subsidiar o complexo siderúrgico na região do Carajás.

### **3.4 Cadeia produtiva**

A cadeia produtiva é o conjunto de componentes interativos, incluindo os sistemas produtivos, fornecedores de insumos e serviços, industriais de processamento e transformação, agentes de distribuição e comercialização, além de consumidores finais. Objetiva suprir o consumidor final de determinados produtos ou subprodutos (CASTRO et al., 1994).

Este tipo de cadeia é ainda visto como um sistema formado por agrupamento de setores econômicos, que estabelecem entre si significativas relações de compra e venda, os quais, articulados de forma sequencial no processo produtivo, envolvem toda a atividade de produção e comercialização de um produto, de forma que, no decorrer da cadeia, os produtos são crescentemente elaborados, obtendo agregação de valor. A cadeia de produção pode ser entendida também como “uma sucessão de operações de transformação dissociáveis, capazes de ser separadas e ligadas entre si por um encadeamento técnico” (BATALHA, 2007). Em relação a produção de carvão vegetal no Brasil, a cadeia associada ao uso de resíduos para bioenergia ainda não foi esclarecida na literatura.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 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, será 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' e 3 o 45' de latitude sul e 48° 30' e 48° 45' de longitude a oeste do meridiano de Greenwich). Foi acompanhada a cadeia produtiva, desde a fase de geração de resíduos até a expedição de carvão vegetal. Além disso, foram apresentadas as fases com fotografias para enriquecer a discussão nesta pesquisa. A fazenda onde o estudo foi desenvolvido apresenta 600 fornos de alvenaria que diariamente produz carvão com resíduos do manejo florestal certificado.

### **4.2. Coleta de dados referentes ao transporte de resíduos**

Essa etapa consistiu na obtenção da massa dos resíduos em balança industrial pertencente à própria empresa. Serão reportadas as quantidades de cargas de madeiras feitas no dia, em que será posteriormente calculada a quantidade total de resíduos transportados no mês. Para isso, será pesado o caminhão vazio e cheio com madeira, a diferença representa a quantidade de madeira residual na etapa de transporte.

### **4.3. 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. Os dados são referentes a resíduos obtidos de quatorze unidades de trabalho (UT) da unidade de produção anual (UPA) 22 do PMFS da Fazenda Rio Capim, Paragominas - PA.

## **5 DESCRIÇÃO DO PMFS DA FAZENDA RIO CAPIM**

A área de manejo da Fazenda Rio Capim (AMF-Rio Capim), é uma área de certificada onde é executado o Manejo Florestal sustentável. A AMF é administrada pelo grupo Keilla,

anteriormente denominada Cikel, possui uma área total de 209.130,54 ha, subdividida em 6 UMF's (Rio Capim, Caculé, Cauaxi I, Cauaxi II, Sumal e Poty). Essas fazendas estão situadas no município de Paragominas, Estado do Pará.

O plano de manejo aplicado na AMF-Rio Capim tem como principal objetivo produzir madeira de forma sustentável, otimizando o uso dos recursos florestais e promovendo o desenvolvimento responsável do setor florestal na região em que atua, em consonância com as normas vigentes e os princípios da certificação florestal. Nessa UMF é executada o regime de Exploração de Impacto Reduzido (EIR) dos recursos florestais principalmente com a extração de madeira, arrendamento de área e a produção de carvão vegetal.

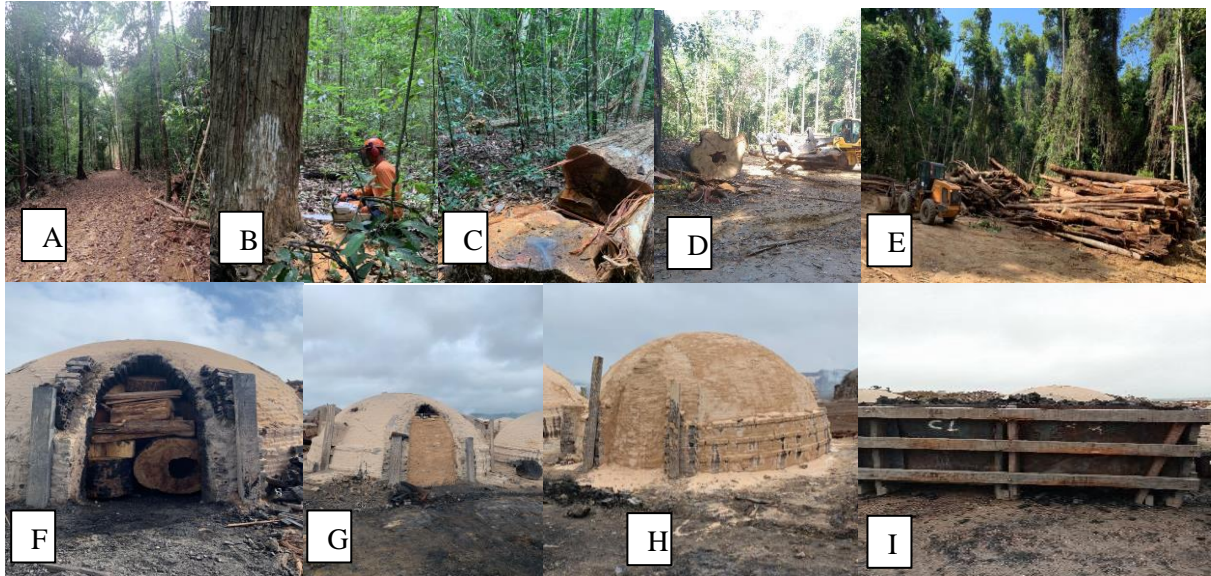
Na UMF Rio Capim é utilizado o sistema silvicultural policíclico com um ciclo inicial de corte de 30 anos e, conseqüentemente, uma divisão de 30 Unidades de Produção Anual (UPA). Atualmente, com a exploração se encontra na UPA 22, indicando que em aproximadamente 8 anos, a empresa retornará as atividades de exploração a UPA1.

O Grupo Keilla Florestal, detentor do Plano de outorga, atua hoje, principalmente com a terceirização das operações de exploração florestal da UMF a partir da comercialização do plano de manejo, ou volume de madeira em pé. Outra atuação direta do Grupo Keilla são as unidades de produção de carvão vegetal a base de resíduos oriundos do manejo florestal executado na própria fazenda.

## **6 CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL**

A cadeia de produção de carvão vegetal é representada por etapas que ocorrem, após a colheita florestal (Figura 1A, 1B e 1C), dentro da floresta e na unidade de produção. As etapas de estoque dos resíduos na floresta por período de um ano, retirada e estocagem nos pátios de toras no interior da floresta (Figura 1D e 1E), transporte para o pátio de estocagem da unidade de produção de carvão, seccionamento dos resíduos em toretes de menores dimensões, carbonização (Figura 1F e 1G), resfriamento dos fornos (Figura 1H), retirada e expedição do biorredutor (Figura 1I) representam a cadeia produtiva de carvão atualmente praticada na Amazônia.

**Figura 1** - Cadeia produtiva do carvão vegetal: A – Abertura de estrada; B – Colheita das árvores previstas para corte; C – Estoque das madeiras colhidas; D e E – Estoque dos resíduos madeireiros; F – Enchimento dos fornos de alvenaria com resíduos lenhosos; G – Carbonização na unidade de produção; H – Resfriamento dos fornos; e I – Retirada do carvão vegetal produzido para expedição.



Fonte: Autoria própria, 2023

### 6.1 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 contém 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,

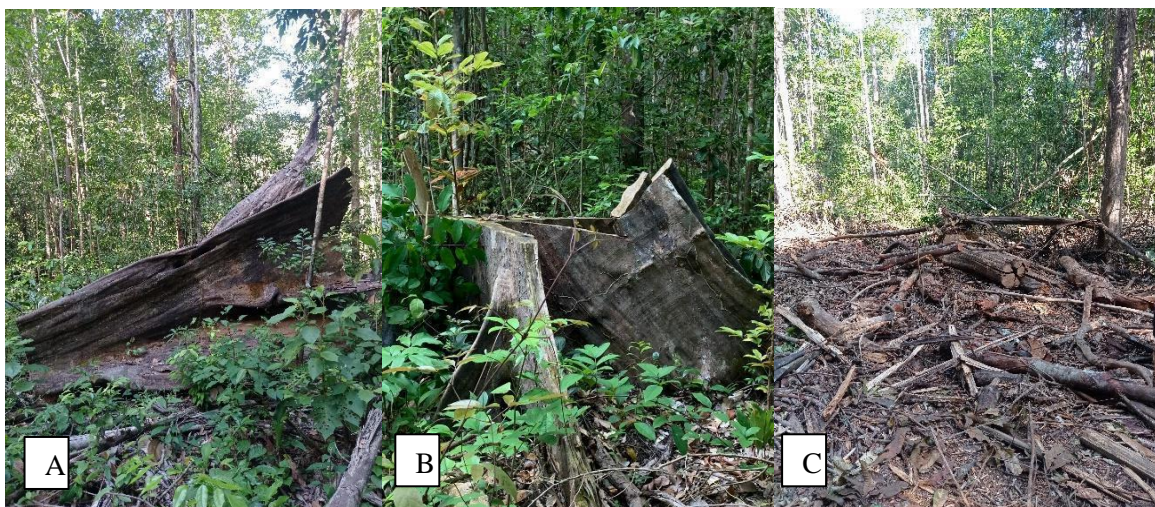
demarcando as árvores que serão exploradas com o uso de plaquetas de ferro. Essas operações são fundamentais para o adequado planejamento e abertura das estradas de arraste.

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).

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). 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).

Passado as operações de exploração de toras, todo o resíduo gerado fica acumulado no interior da floresta, formando estoque de madeira passível de ser utilizada (Figura 2). Segundo Lima et al. (2020) os resíduos podem ser aproveitados para produção de energia e lenha. Os autores descreveram a geração anual de 100 mil toneladas de resíduos em PMFS na Amazônia, quantidade substancial de subproduto que precisa de alternativas sustentáveis de uso.

**Figura 2** - Resíduos da exploração florestal sustentável



**Fonte:** Autoria própria, 2023

Na UMF-Rio Capim, o resíduo advindo da exploração das UPA's 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 se dá 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.

## **6.2 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. Esse mapeamento é realizado 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.

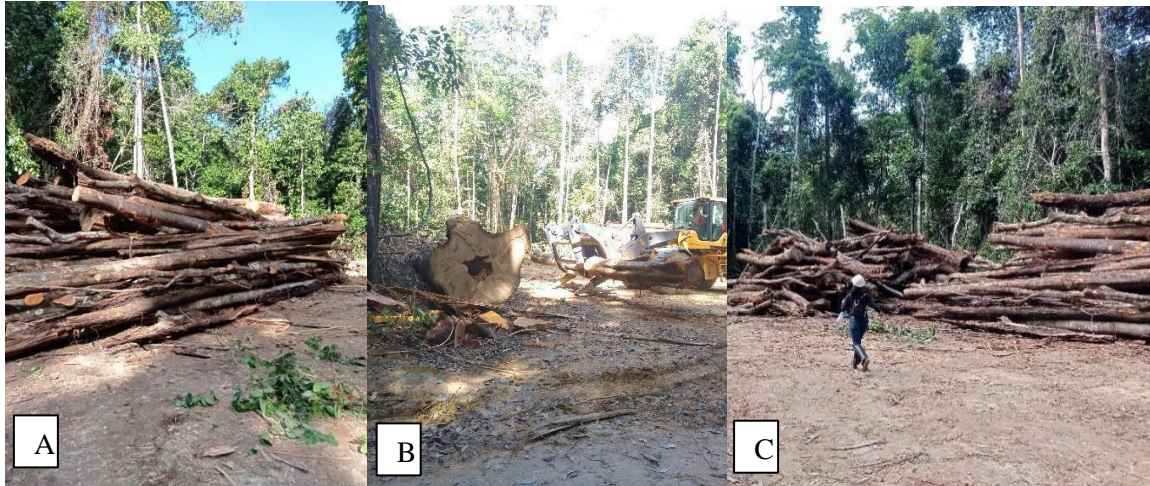
Após o zoneamento inicia-se a extração dos resíduos do interior da floresta até os pátios anteriormente utilizados para estocagem das toras. Essa etapa é realizada com auxílio dos Skidders, trator florestal utilizado para o arraste de toras com o uso de garras ou auxílio de cabos de aço.

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 todas as madeiras residuais para o pátio, onde outro trator com garfo acoplado realiza o empilhamento desses resíduos, separando-os por classe de comprimento no pátio (Figura 3). 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 3** - Transporte de resíduos ao pátio de estocagem anteriormente utilizado para toras.



**Fonte:** Autoria própria, 2023.

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 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 da malha viária. Observa-se que a UT 59 apresentou maior quantitativo de resíduos transportados no período estudado. Em 2 meses foram retiradas 8775,92 toneladas de resíduos.

Tabela 1. Massa total de resíduos retirados no período de dois meses em 14 Unidades de trabalho da unidade de produção anual 22.

<b>Unidade de trabalho</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Massa (toneladas)</b>
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	1404,24
29	100,47	256,2
30	104,46	1001,94
56	98,90	175,14
57	98,67	279,94
58	98,30	1246,38
59	99,71	2270,08
<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>8775,92</b>

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 1763,96 toneladas de carvão vegetal.

### **6.3 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 9/10 toneladas de lenha e produz, conforme, cerca de 1900 quilos de carvão, quando carbonizadas madeiras sem segregação (LIMA et al., 2023). 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 dessas madeiras dificultam o

controle do processo, aumentam a emissão de gases e reduz a qualidade do carvão vegetal produzido (BARROS et al., 2023).

**Figura 4** - Fornos de alvenaria do tipo rabo quente para a produção de carvão vegetal oriundo da colheita florestal em PMFS.



**Fonte:** Autoria própria, 2023.

A vida útil desses fornos 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 encher dois fornos com resíduos ou encher um forno com resíduo e esvaziar um forno de carvão ou esvaziar três fornos de carvão por dia.

#### **6.4 Enchimento dos fornos**

Os resíduos são seccionados com comprimento de 45 cm para que se obtenha uma padronização nas peças (Figura 5A), facilitando assim o transporte para a frente dos fornos (Figura 5B) e o seu enchimento (Figura 5C). Antes de inserir os resíduos nos fornos, é utilizado um calço de 10 cm 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 ser dificultada.

**Figura 5** - Enchimento dos fornos de alvenaria com resíduos seccionados, partindo do seccionamento dos resíduos (A), deposição dos peças em frente aos fornos (B) e enchimento (C).



Fonte: Autoria própria, 2023.

### 6.5 Ignição dos resíduos

Após o enchimento dos fornos é dada a ignição dos fornos (Figura 6A). Essa etapa se dá por meio dos chamados “ninhos” (Figura 6B), 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 (BARROS et al., 2023; LIMA et al., 2023), desde a ignição até a retirada do carvão.

**Figura 6** – Ignição das madeiras residuais por meio de aberturas denominada de ninhos.

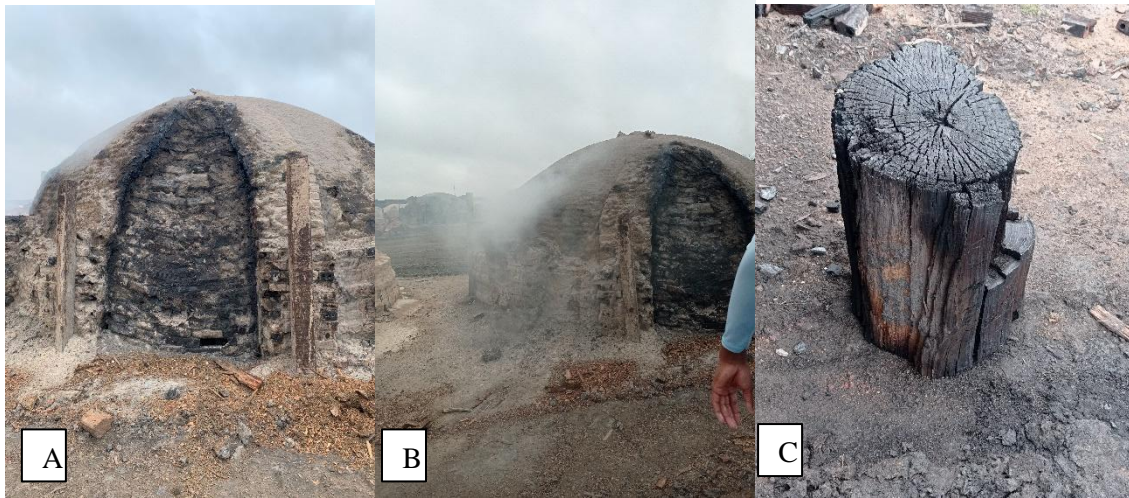


**Fonte:** Autoria própria, 2023.

### **6.6 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 dos tatus e das baianas e com base no tato, ao tocar a parede dos fornos (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019). Nos primeiros dias de queima, é deixado as baianas e tatus abertos e observado a 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). Em ordem, as Figuras 7A e 7B demonstram o processo empírico de carbonização e atijo, subproduto do processo.

**Figura 7-** Fornos em processo de carbonização (A) e matéria prima semicarbonizada (B).



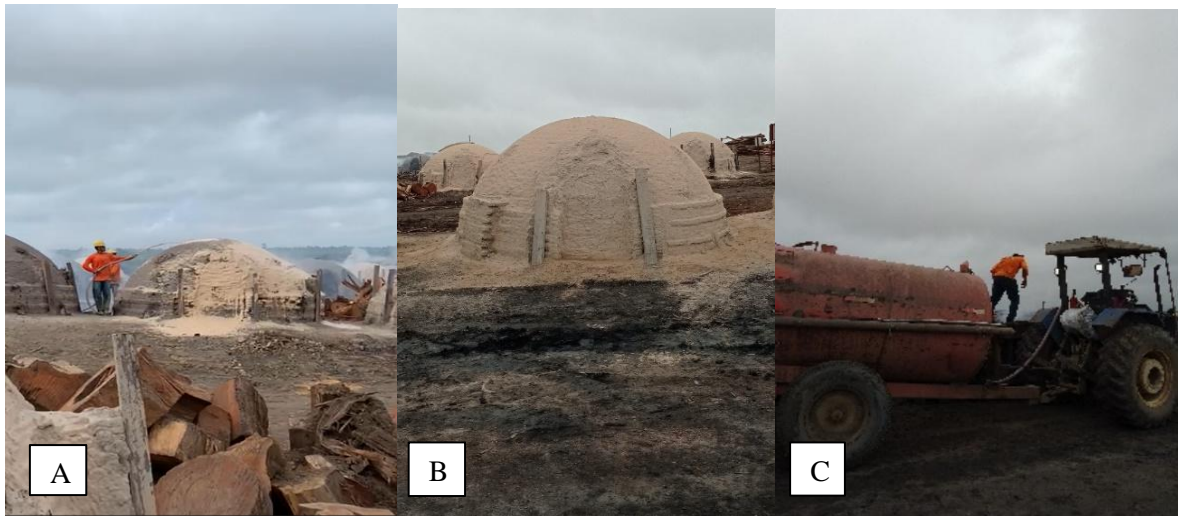
**Fonte:** Autoria própria, 2023.

Conforme o conhecimento 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 é apoiado um tijolo nas aberturas inferiores. O colaborador aguarda uma nova mudança na cor da fumaça para azul e enfim fecha os tatus. Após esses processos, aguarda-se o cessar da fumaça na chaminé para que se possa realizar o isolamento total com argila, assim é impedido a entrada de oxigênio para que encerre o processo de carbonização.

### **6.7 Resfriamento e abertura dos fornos**

O resfriamento é feito por meio do barrelamento (Figura 8A e B) com trator com tanque pipa (Figura 8C), uma mistura de água e argila utilizando cerca de 1.100 litros de água para 660 kg de barro, uma média de 220 pás. 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 reignição da matéria prima.

**Figura 8-** Barrelamento dos fornos (A e B) e maquinário utilizado para essa operação (C).



**Fonte:** Autoria própria, 2023.

Após os dois dias de barrelamento, o carbonizador faz um teste de toque, 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.

### **6.8 Retirada do carvão**

O carvão é retirado dos fornos e armazenado em caixas metálicas com capacidade de 9,7 m<sup>3</sup> (LIMA et al., 2023). Pode acontecer de o fogo não ter apagado totalmente após a abertura dos fornos e a queima continue ocorrendo. Nesse sentido, o colaborador responsável marca a caixa em que ocorreu reignição e atea água na mesma para que o fogo cesse. Em seguida, o carvão deverá passar por processo de secagem e terá qualidade reduzida.

Lima et al. (2023) recomendam que carvões com ocorrência de reignição com finalidade industrial devem permanecer no pátio de estocagem para secagem, pois a utilização de carvão com umidade elevada apresenta redução do poder calorífico. Se o carvão for retirado antes da carbonização completa, é classificado como atíço o que não é apropriado 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.

### 6.9 Armazenamento do carvão vegetal

Após a retirada, o carvão permanecerá dentro dos contêineres de metal que servirão de recipiente durante alguns dias até que o container possa ser transportado. A temperatura é um ponto essencial no controle de qualidade, 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 (Figura 9).

**Figura 9-** Carvão vegetal armazenado em caixas metálicas.



**Fonte:** Autoria própria, 2023.

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. Estudo de Barros (2023) demonstra a incidência de autocombustão do carvão vegetal oriundo de resíduos de PMFS. Os autores reportam que a segregação de madeiras residuais em classes de qualidade reduz a possibilidade de autocombustão.

## **6.10 Carregamento e expedição do carvão vegetal**

Após o carvão atingir a umidade exigida pelo comprador, os contêineres de carvão são destinados ao carregamento dos caminhões, os quais passam por uma balança industrial para a pesagem da carga. Na comercialização da UPC visitada, a produção é vendida atualmente por toneladas de carvão para finalidade industrial, especialmente siderurgia.

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.

Baseando-se na simulação da produção de 1763,96 toneladas de carvão mencionadas anteriormente e no valor da tonelada de carvão de madeira nativa residual (R\$ 1000), é possível obter R\$ 1.763.960 de valor bruto sem adicionar os custos de produção e transporte, tendo em vista tratar-se de uma simulação. Vale ressaltar que se trata de uma simulação e que são madeiras transportadas em dois meses, assim será uma receita dividida para os meses mencionados.

## **7 LIMITAÇÕES DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL**

Dentre as principais objeções atreladas a utilização de resíduos madeireiros para a produção de carvão vegetal destaca-se a heterogeneidade da madeira, tendo a necessidade de agrupar os resíduos madeireiros do manejo florestal com propriedades similares visando ganhos na quantidade e qualidade. Outro fator de importância está agregado a estocagem dos resíduos no pátio e ao armazenamento do carvão, por não serem protegidos de condições climáticas, influenciando diretamente na qualidade do carvão.

A segregação de matéria prima é uma alternativa para melhorar a produção empírica do carvão oriunda de resíduos. Segundo Lima et al. (2023) a segregação da madeira residual em fornos de alvenaria culmina em um aumento significativo da produtividade. Tendo em vista que grupos de madeira com densidades parecidas, resultam em uma carbonização com mais eficiência e menor produção de atíços.

A Técnica NIR também é uma alternativa viável para auxiliar na segregação dos resíduos a serem carbonizados. No estudo realizado por Lima et al. (2022) foi utilizada a técnica NIR, que tem como princípio a radiação eletromagnética para a identificação e posterior

segregação de madeiras por espécies, com uma precisão relevante. Essa técnica é relevante especialmente pelo baixo número de especialistas em anatomia da madeira. Além disso, o tempo em que a identificação da madeira por meios clássicos dura, que é elevada. A melhoria na tecnologia dos fornos para a produção de carvão, podem contribuir no aumento da produtividade e da qualidade do carvão. O controle da carbonização é realizado de forma empírica, investimentos no uso de equipamentos e técnicas visando aprimorar o processo produtivo implicam de forma positiva na qualidade do carvão.

## **8 CONCLUSÃO**

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.

Em 2 meses, novembro e dezembro, foram transportadas 8775,92 toneladas de resíduos para a unidade de produção de carvão vegetal.

Após a caracterização da cadeia de produção do carvão vegetal oriundo de plano manejo florestal sustentável, é notório a complexidade e a importância da realização de cada etapa de maneira eficaz, tendo em vista que uma execução sem sucesso durante o processo, compromete diretamente a qualidade do produto.

Dentre as principais objeções atreladas a utilização de resíduos madeireiros para a produção de carvão vegetal destaca-se a heterogeneidade da madeira, tendo a necessidade de agrupar os resíduos madeireiros do manejo florestal com propriedades similares visando ganhos na quantidade e qualidade, outro fator de importância está agregado a estocagem e ao armazenamento, por não serem protegidos de condições climáticas, influenciando diretamente na qualidade do carvão.

O investimento em fornos mais tecnológicos agrega de forma positiva na produção, gerando possibilidade de aumento na produção e na qualidade do carvão.

## REFERÊNCIAS

- BARROS, D. S. et al. Does the segregation of wood waste from Amazonia improve the quality of charcoal produced in brick kilns? **Bioenergy Research**, 2023.
- BRASIL. **Instrução Normativa N° 5**. 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.
- CASTRO, A. M. G. et al. **Demanda**: Análise Prospectiva do Mercado e da clientela de P&D em Agropecuária. In. *Gestão de Ciência e Tecnologia: Pesquisa Agropecuária* (ed. Wenceslau Goedert, Maria Lucia D' Apice Paez, Antônio Maria Gomes de Castro) Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994.
- CRUZ FILHO, D. et al. 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. 3, 2009.
- DIONISIO, L. F. S. et al. Volume of commercial timber found dead in managed Amazonian natural forests: Is it possible to take advantage?. **FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT**, v. 521, p. 120441, 2022.
- FARIA, H. H. Procedimento para medir a efetividade de manejo de áreas silvestres protegidas. **Revista do Instituto Florestal**, v. 7, p. 35-55, 1995.
- GEPAI - Grupo de Estudos e Pesquisas Agroindustriais. BATALHA, Mário Otávio. (Coord.) *Gestão agroindustrial*. Vol. 1. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- LIMA, M. D. R. **A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na Amazônia brasileira – Belém**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020.
- FRANCEZ, L. M. DE B. et al. 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, 2007.
- LIMA, M. D. R. et al. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, p. 105660, 2020a.
- LIMA, M. D. R. et al. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, p. 105804, 2020b.
- MASSUQUE, J. et al. Potential of charcoal from non-commercial *Corymbia* and *Eucalyptus* wood for use in the steel industry. **Renewable Energy**, 2023.

NUMAZAWA, C. T. D. et al. Logging residues and CO<sub>2</sub> of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 280–285, 2017.

PALACE, M. et al. Necromass in undisturbed and logged forests in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 238, n. 1–3, 2007.

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. et al. Grouping of wood residues from sustainable forest management aiming at bioenergy generation. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, 2020.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, p. 104670, 2019.

SANTOS, P. C. et al. Estimativa volumétrica de resíduos lenhosos de madeira em uma floresta tropical através da krigagem ordinária, Paragominas, estado do Pará. **Ciencia Florestal**, v. 24, n. 4, 2014.

SILVA, M. G. et al. 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.

SILVA, R. C. et al. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.