

Bioenergia, Inovação e Sustentabilidade: O papel Estratégico da Macaúba no Brasil

Eliana Antunes dos Santos Correia, Tatieli Dias Feliciano
Adriana Alvarenga Dezani
Henrique Dezani

Faculdade de Tecnologia, FATEC de S. J. Do Rio Preto/SP

Resumo: A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa do Brasil com grande potencial para a produção de biocombustíveis e múltiplas aplicações industriais. Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto das inovações tecnológicas na sustentabilidade ambiental e na competitividade econômica da cadeia produtiva da macaúba. Utilizou-se uma abordagem qualitativa, com base em pesquisa bibliográfica e ferramentas de gestão como o Diagrama de Ishikawa, a análise SWOT e o plano 5W2H. Os resultados apontaram gargalos na produção, tecnologia, comercialização, políticas públicas e logística. Em contrapartida, identificaram-se oportunidades promissoras, como o mercado crescente de bioenergia e o potencial de uso integral do fruto. A análise indicou que as inovações tecnológicas, associadas ao apoio institucional e à valorização dos saberes locais, poderão promover ganhos de eficiência, sustentabilidade e competitividade. Conclui-se que a macaúba pode se consolidar como alternativa estratégica para a bioenergia e outros setores industriais sustentáveis.

Palavras-chave: Macaúba, Biocombustíveis, Inovação tecnológica, Cadeia produtiva, Competitividade.

Abstract: Macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) is a native Brazilian species with significant potential for biofuel production and various industrial applications. This study aims to evaluate the impact of technological innovations on the environmental sustainability and economic competitiveness of the Macaúba palm production chain. A qualitative approach was adopted, using bibliographic research and management tools such as the Ishikawa Diagram, SWOT analysis, and the 5W2H plan. The findings revealed critical bottlenecks in production, technology, commercialization, public policies, and logistics. Conversely, promising opportunities were identified, including the growing bioenergy market and the full utilization of the fruit. The analysis suggests that technological innovations, combined with institutional support and the inclusion of local knowledge, will promote efficiency, sustainability, and competitiveness. It is concluded that the macaw palm can become a strategic alternative for Brazil's bioenergy sector and other sustainable industries.

Keywords: Macauba, Biofuels, Technological innovation, Production chain, Competitiveness.

1. INTRODUÇÃO

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart.) é uma palmeira nativa das regiões tropicais do Brasil, amplamente distribuída nas áreas do país e com grande potencial para diferentes aplicações. Sua versatilidade e o elevado rendimento de frutos oleaginosos têm atraído atenção crescente em vários setores, principalmente devido ao seu alto potencial para a produção de biodiesel (CÉSAR, 2015; EVARISTO, 2016; CARDOSO, 2017; COLOMBO, 2018). Além do uso como fonte de energia renovável, a macaúba se destaca pela possibilidade de aplicação em outras áreas, como a fabricação de sabão, alimentação animal por meio das folhas, e o uso de seus frutos para consumo humano (COLOMBO; BERTON, 2019). Dessa

forma, a macaúba se apresenta como uma matéria-prima estratégica tanto para a indústria alimentícia quanto para a produção de biocombustíveis (MOREIRA, 2016).

Nesse contexto, o cultivo da macaúba tem sido considerado uma alternativa sustentável sob diversos aspectos socioeconômicos e ambientais. Iniciativas públicas e privadas, tanto nacionais quanto internacionais, vêm reconhecendo seu potencial não apenas do ponto de vista econômico, mas também como ferramenta para a recuperação de áreas degradadas e pastagens improdutivas, contribuindo para a restauração ecológica e a valorização do uso do solo (CONCEIÇÃO, 2015; COLOMBO, 2018).

A adaptabilidade da planta a diferentes condições climáticas e a sua elevada produtividade são fatores que a posicionam como uma espécie chave para o desenvolvimento de novas cadeias produtivas no Brasil, com foco na geração de energia limpa e sustentável (VIANA, FÁVARO e ANJOS, 2021).

No Brasil, a macaúba tem se consolidado como uma importante espécie oleaginosa, com óleos extraídos da polpa e da amêndoa, cujo rendimento pode alcançar até 6.000 litros de óleo por hectare, embora ainda se encontre no estágio inicial de melhoramento (WWF, 2022). Além da produção de biodiesel, esses óleos possuem aplicabilidade em indústrias de alimentos, cosméticos, ração animal e farmacêutica. A crescente demanda por produtos derivados da macaúba tem impulsionado a bioeconomia no país, gerando novos empregos e oportunidades econômicas, ao mesmo tempo em que contribui para o avanço tecnológico em diversas áreas. No entanto, apesar de todo o seu potencial, a macaúba ainda se encontra em processo de domesticação, com soluções tecnológicas emergindo ao longo dos anos, tanto na esfera agrícola quanto na industrial (VIANA, FÁVARO e ANJOS, 2021).

Apesar do reconhecido potencial da macaúba como fonte de bioenergia e insumo para diversas cadeias produtivas, sua exploração comercial ainda enfrenta desafios relacionados à estruturação da cadeia produtiva, à falta de investimentos em tecnologia e à ausência de políticas públicas específicas que fomentem sua competitividade. Embora haja avanços no desenvolvimento de pesquisas e no interesse do setor privado, a consolidação da macaúba como uma alternativa estratégica para a bioeconomia brasileira depende da adoção de inovações tecnológicas que promovam ganhos em produtividade, sustentabilidade e viabilidade econômica. Diante desse cenário, surge a necessidade de compreender de que forma a inovação pode alavancar o desenvolvimento sustentável e competitivo dessa cadeia.

Dessa forma, este trabalho tem como ponto de partida a seguinte pergunta de pesquisa: Como as inovações tecnológicas podem promover a sustentabilidade e aumentar a competitividade econômica da cadeia produtiva da macaúba no Brasil, consolidando seu papel estratégico na bioenergia e em outros setores?

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto das inovações tecnológicas na sustentabilidade ambiental e na competitividade econômica da cadeia produtiva da macaúba no Brasil, destacando seu potencial estratégico para o desenvolvimento da bioenergia e outras aplicações industriais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MACAÚBA: CARACTERÍSTICAS, DISTRIBUIÇÃO E POTENCIAL SUSTENTÁVEL NO BRASIL

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.), também conhecida por nomes regionais como coco-de-espinho, macaíba, macaúva e mucajá, é uma palmeira oleaginosa nativa de grande porte, que pode ultrapassar 16 metros de altura. Possui tronco espinhoso, com diâmetro médio entre 30 e 45 cm, e de 20 a 30 folhas (SCARIOT, 1991; GONÇALVES, 2019).

Cada planta pode produzir entre dois e oito cachos (Figura 1), contendo de 250 a 500 frutos esféricos, com epicarpo rígido, que variam do verde ao marrom conforme a maturação (Figura 2). Suas características ecológicas e seu potencial econômico vêm despertando crescente interesse nos campos da pesquisa, sustentabilidade e geração de renda para comunidades tradicionais (CASTRO; SCINOCCA; SANTOS, 2024).

A macaúba destaca-se pelo seu potencial para o desenvolvimento sustentável no Brasil, sobretudo em regiões como o Cerrado e o Nordeste, onde o extrativismo tem forte tradição. De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a espécie possui capacidade multifuncional: fornece óleos vegetais, proteínas, energia e biocombustíveis, além de ser uma fonte alimentar segura e nutritiva para humanos e animais. Adapta-se bem a sistemas integrados de produção e contribui para a recuperação ambiental, incluindo a restauração de áreas degradadas e nascentes (FÁVARO; ROCHA, 2022).

Figura 1: Palmeira e cachos da Macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.).



A - Palmeira da Macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.)

B - Cachos da Macaúba

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir de Wikipédia e Estadão.

Figura 2: Variação dos frutos da Macaúba.



C - Frutos da Macaúba de coloração verde

D - Frutos da Macaúba de coloração marrom

Fonte: Elaborado pelas autoras a partir de Uol e Simone Favaro.

Naturalmente distribuída por diversas regiões tropicais da América Central e do Sul, sua ocorrência estende-se do sul do México até o norte da Argentina, com maior concentração populacional no Paraguai, América Central e Brasil, embora esteja ausente no Equador e no Peru (BELÉN CAMACHO, 2005; WANDECK; JUSTO, 1988) (Figura 3).

No Brasil, a planta é valorizada tanto por suas múltiplas aplicações – como na produção de óleo, biocombustível, alimentos e cosméticos – quanto por seu papel sociocultural e

ambiental (CASTRO; SCINOCCA; SANTOS, 2024). A espécie é especialmente abundante nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Ceará, com forte presença nos biomas do Cerrado (MOTTA, 2002; MOURA, 2007; LORENZI, 2006) (Figura 3).

Figura 3: Mapa de registros de ocorrência da macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) (542 Registros).



Fonte: Sistema de informação sobre a biodiversidade brasileira (SiBBr).

Essa ampla distribuição e rusticidade reforçam o potencial da macaúba como alternativa viável para diferentes aplicações agroindustriais e projetos de desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, a macaúba representa uma espécie de elevado valor ecológico, econômico e social, com potencial estratégico para o desenvolvimento sustentável em diversas regiões do Brasil. Suas múltiplas aplicações, que vão desde a produção de óleo e biocombustíveis até usos alimentares e cosméticos, associadas à sua adaptabilidade e ampla distribuição geográfica, tornam essa palmeira uma alternativa promissora para o fortalecimento de cadeias produtivas sustentáveis.

Diante disso, aprofundar os estudos sobre a espécie e investir em tecnologias de manejo e beneficiamento são passos fundamentais para integrar a macaúba de forma efetiva aos sistemas agroindustriais e às políticas de conservação e geração de renda, especialmente em áreas tradicionais e ambientalmente sensíveis.

2.2 MACAÚBA NO BRASIL: DIAGNÓSTICO DA CADEIA PRODUTIVA E DESAFIOS PARA SUA CONSOLIDAÇÃO

Embora a cadeia produtiva da macaúba demonstre crescimento promissor, ela ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento, sobretudo no que se refere ao aproveitamento total e com valor agregado dos coprodutos. Atualmente, a comercialização concentra-se majoritariamente na venda do fruto in natura, com pouca diversificação de produtos e baixa valorização econômica.

A informalidade, com a presença de atravessadores e a escassa emissão de notas fiscais, compromete o acesso a políticas públicas essenciais, como a Política de Garantia de Preços Mínimos da Sociobiodiversidade (PGPM-Bio), que visa assegurar renda ao agricultor familiar extrativista mediante subsídio para vendas abaixo do preço mínimo (CICONINI, 2013).

Outro desafio estrutural reside no longo ciclo produtivo da macaúba. A planta inicia sua frutificação somente após cerca de cinco anos do plantio, demandando que o produtor suporte custos sem retorno financeiro imediato, o que pode afastar pequenos agricultores e dificultar o acesso ao crédito. As linhas de financiamento rural, como as do Plano Safra, geralmente apresentam carência inferior a três anos, incompatível com o ciclo produtivo da macaúba, limitando sua efetividade para essa cultura (LOPES, 2020; MOTOIKE; NACIF; PAES, 2012; PIMENTEL, 2012).

Apesar desses obstáculos, avanços tecnológicos têm impulsionado a cadeia. A Universidade Federal de Viçosa (UFV), em 2007, desenvolveu técnica para superar a dormência das sementes, elevando a taxa de germinação de 3% para 80%, viabilizando a produção comercial de mudas e atraindo investimentos (JAGER, 2023). Paralelamente, a inclusão da macaúba no Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) trouxe maior segurança para novos plantios, classificando regiões por níveis de risco climático e auxiliando na concessão de crédito e seguro rural (EMBRAPA, 2024; FAVARO, 2024).

O potencial econômico da macaúba ultrapassa o óleo da polpa tradicionalmente extraído, contemplando produtos como óleo da amêndoa, tortas para ração animal, farinha e biocosméticos. Destaca-se o óleo da amêndoa, conhecido localmente como “gordura do coco”, que possui alto valor agregado e é comercializado a cerca de R\$ 90,00 o litro, valor muito superior ao óleo da polpa, vendido a aproximadamente R\$ 15,00 o litro. Este óleo é valorizado por suas propriedades sensoriais e nutricionais, sendo utilizado tanto na culinária regional — em preparações tradicionais como bolinho de chuva e bolinho de polvilho — quanto na indústria cosmética, como hidratante para cabelo e pele (GRUPIONI, 2024).

Do ponto de vista ambiental, a cadeia da macaúba oferece benefícios importantes, como o aumento da renda familiar, melhorias na alimentação, recuperação do solo, aumento da biodiversidade e restauração de áreas degradadas. A captura de carbono durante o ciclo produtivo, especialmente em sistemas que promovem o reflorestamento com espécies nativas, agrega valor ambiental significativo, alinhando o cultivo à agenda climática (LIMA; PEDROZO; RESENDE, 2011; WWF-BRASIL, 2022).

A produção de bioquerosene de aviação a partir da macaúba tem sido apontada como um dos principais vetores de expansão da cultura, associando desenvolvimento econômico à sustentabilidade ambiental. Iniciativas como a Plataforma de Bioquerosene e Renováveis da Zona da Mata (PBIOZM) incentivam a recuperação ambiental de Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reservas Legais (RL), estimulando um modelo de bioeconomia integrado (WWF-BRASIL, 2022).

Para mitigar o desafio do longo ciclo produtivo, recomenda-se a integração da macaúba com culturas de curto ciclo, como milho, feijão e amendoim, além da pecuária, assegurando fontes alternativas de renda durante o período inicial de formação do dossel produtivo (CICONINI, 2013).

Assim, apesar das fragilidades estruturais e dos desafios de financiamento e comercialização, a macaúba apresenta-se como uma cultura estratégica para o Brasil, com potencial para fortalecer o agronegócio, promover a bioeconomia sustentável e gerar impactos socioambientais positivos.

2.3 BIOCOMBUSTÍVEIS E A INSERÇÃO DA MACAÚBA NA MATRIZ ENERGÉTICA

A macaúba destaca-se por sua elevada produtividade oleaginosa e capacidade de adaptação a solos pobres, o que a torna promissora para usos agroindustriais e ambientais, como em sistemas agroflorestais e na recuperação de áreas degradadas (SCARIOT, 1991; GONÇALVES, 2019; CASTRO, 2024). Sua versatilidade permite aplicações nos setores alimentício, cosmético e, especialmente, na produção de biocombustíveis, como o bioquerosene de aviação.

O Brasil possui uma trajetória consolidada no desenvolvimento dos biocombustíveis, iniciada com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975, que promoveu o uso do etanol como combustível (FERREIRA, 2023). Ainda na década de 1970, o país se destacou como pioneiro ao estudar o biodiesel, utilizando o óleo de dendê como matéria-prima (ABREU, 2006). A consolidação do biodiesel na matriz energética nacional ocorreu com a Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que instituiu a adição obrigatória de biodiesel ao diesel comercializado, além de estabelecer incentivos tributários e políticas de apoio ao agronegócio e à agricultura familiar (FERREIRA, 2023).

Desde então, as políticas públicas passaram a incorporar uma abordagem social, com a criação do Selo Biocombustível Social (SBS), concedido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) às usinas que firmam contratos com agricultores familiares (MILANEZ, 2022). A partir da instituição do RenovaBio (Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017), regulamentado pelo Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019, o Brasil reconheceu os biocombustíveis — como etanol, biodiesel, biometano e bioquerosene — como estratégicos para a segurança energética, a previsibilidade do mercado e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (SAMPAIO, 2022).

A produção de biodiesel também é regulamentada pela Lei nº 13.033, de 27 de novembro de 2014, que determina sua obrigatoriedade na mistura com o diesel fóssil (ABIOVE, 2020). Desde o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2005, o país já produziu mais de 53,8 bilhões de litros até dezembro de 2021 (EPE, 2022). O programa visa fomentar a sustentabilidade, assegurar preços mínimos, garantir a qualidade e estimular a diversificação regional da produção (FERREIRA, 2023).

No setor de aviação, o Programa Nacional de Bioquerosene, instituído pela Lei nº 14.248, de 19 de janeiro de 2021, incentiva a pesquisa e o uso de biomassas para promover a sustentabilidade no transporte aéreo (FERREIRA, 2023). Complementarmente, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) lançou o Programa Combustível do Futuro, que estabeleceu diretrizes para a descarbonização da matriz de transportes, culminando no Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), que busca introduzir o combustível sustentável para aviação (SAF) e atrair investimentos ao setor. A sanção da Lei nº 14.993, de 10 de abril de 2024, consolidou esse avanço, fixando metas de redução de emissões para a aviação e reafirmando o compromisso nacional com a transição energética (BRASIL, 2024; ESTEVO; THOMAZ; GONDIM, 2024).

Apesar dos avanços, a soja ainda predomina como principal matéria-prima para o biodiesel, o que gera preocupações quanto à sustentabilidade devido ao baixo rendimento e aos impactos ambientais associados (WWF-BRASIL, 2022). Nesse contexto, a macaúba desponta como uma alternativa mais eficiente, com rendimento de até 6.000 litros de óleo por hectare,

menor impacto ambiental e viabilidade econômica, inclusive em áreas marginalizadas (RODRIGUES, 2021; MOTA, 2011).

De acordo com a Embrapa, o Brasil reúne condições favoráveis para liderar a produção e o uso de biocombustíveis no cenário global, graças à sua extensão territorial e diversidade de matérias-primas. A produção nacional de biocombustíveis fortalece a economia e gera impactos positivos nas esferas social e ambiental, promovendo um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável (GALVEAS; LOPES, 2025).

Assim, observa-se que o Brasil consolidou, ao longo das últimas décadas, uma base normativa e institucional robusta voltada à ampliação do uso de fontes renováveis na matriz energética, especialmente no setor de transportes. O fortalecimento de políticas como o RenovaBio e o ProBioQAV, aliado à valorização da agricultura familiar e à promoção de práticas sustentáveis, evidencia o comprometimento do país com a transição energética. Essa trajetória posiciona o Brasil como referência internacional na produção de biocombustíveis, ao mesmo tempo em que abre espaço para inovações que combinam eficiência energética, crescimento econômico e preservação ambiental.

2.4 INICIATIVAS ESTRATÉGICAS E DESAFIOS TECNOLÓGICOS

Iniciativas como o projeto da Acelen, que prevê o cultivo de 180 mil hectares de macaúba e a produção anual de 1 bilhão de litros de combustíveis renováveis, consolidam a planta como vetor estratégico na transição energética brasileira, promovendo inclusão social, inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental (ACELEN, 2024; BNDES, 2024).

O extrativismo da macaúba envolve práticas tradicionais que fazem parte do cotidiano de diversas comunidades, em especial aquelas situadas em áreas rurais e periurbanas. Contudo, o processo de mecanização e aproveitamento em escala produtiva ainda exige adaptações técnicas que considerem o saber local, as condições ambientais e a viabilidade econômica e social (CASTRO; SCINOCCA; SANTOS, 2024).

A valorização do conhecimento etnoecológico é fundamental para a construção de soluções tecnológicas eficazes e sustentáveis. A integração entre ciência e saber local é vista como um caminho para fortalecer cadeias produtivas baseadas na macaúba, respeitando a biodiversidade e promovendo a inclusão social (CASTRO; SCINOCCA; SANTOS, 2024).

Diante do cenário energético atual e das exigências por soluções mais sustentáveis, a macaúba consolida-se como uma alternativa estratégica e promissora para a produção de biocombustíveis no Brasil. Sua elevada produtividade, adaptabilidade a solos pobres e baixo impacto ambiental posicionam-na como uma opção viável frente às limitações de culturas tradicionais, como a soja.

Associada a políticas públicas e investimentos privados, como os projetos de larga escala da Acelen, a macaúba representa não apenas um avanço na diversificação da matriz energética nacional, mas também uma oportunidade concreta de aliar desenvolvimento econômico, inclusão social e conservação ambiental na transição rumo a um futuro energético mais limpo e sustentável.

2.5 COMPETITIVIDADE DA MACAÚBA FRENTE À SOJA NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

A predominância da soja como principal matéria-prima para a produção de biodiesel no Brasil tem suscitado questionamentos quanto à sustentabilidade e à excessiva dependência de uma única oleaginosa. Atualmente, cerca de 70% da produção nacional de biodiesel é oriunda da soja, com maior concentração nas regiões Sul e Centro-Oeste do país (JAGER, 2023). Esse domínio é sustentado por uma cadeia produtiva consolidada, altamente tecnificada e com

capacidade de produção em larga escala, o que mantém a soja como uma opção tradicional e confiável (MOTA, 2011).

Entretanto, a produtividade da soja é relativamente limitada em termos de extração de óleo, gerando aproximadamente 500 litros de óleo por hectare (WWF-BRASIL, 2022). Essa limitação é típica de culturas anuais, que exigem replantio a cada ciclo e apresentam maior impacto ambiental devido ao manejo frequente. Em contraste, espécies perenes como a macaúba têm se destacado por seu elevado rendimento e menor impacto ambiental. A macaúba pode alcançar até 6.000 litros de óleo por hectare, considerando os óleos da polpa e da amêndoa. Estudos indicam que, com avanços no melhoramento genético, essa produtividade pode chegar a até oito toneladas de óleo por hectare (WWF-BRASIL, 2022; RODRIGUES, 2021; MOTA, 2011).

Além de seu elevado rendimento, a macaúba apresenta vantagens agronômicas e ambientais significativas. Por ser uma cultura perene, evita os custos anuais com replantio, reduz os impactos no solo e contribui para uma produção mais sustentável a longo prazo (RODRIGUES, 2021). Sua adaptabilidade a ambientes secos a torna uma alternativa viável para o cultivo em áreas menos favorecidas pela agricultura tradicional, sem competir com culturas alimentares em regiões de alta produtividade (MOTA, 2011).

A vulnerabilidade da cadeia do biodiesel às oscilações dos preços internacionais da soja e à priorização da exportação do grão, em detrimento do abastecimento interno, reforça ainda mais a necessidade de diversificação das fontes de matéria-prima. Essa dinâmica já provocou escassez de insumos e elevação do preço final do biodiesel (MILANEZ, 2022). Nesse cenário, a macaúba surge não apenas como uma alternativa estratégica para mitigar riscos de abastecimento, mas também como uma opção ambientalmente mais eficiente, apresentando menores emissões de poluentes em comparação ao biodiesel de soja (WWF-BRASIL, 2022).

Atenta a esse potencial, a empresa de energia Acelen iniciou um projeto inovador voltado à produção de combustíveis renováveis a partir da macaúba. Com investimento previsto superior a R\$ 12 bilhões, a iniciativa visa cultivar 180 mil hectares da palmeira em áreas degradadas, com a meta de produzir 1 bilhão de litros de diesel renovável e querosene sustentável por ano (ACELEN, 2024). O projeto conta com a parceria da MulticanaPlus, especializada em micropropagação vegetal, responsável pela clonagem de plantas de elite com foco em características como resistência e produtividade (ACELEN, 2024).

Os ganhos ambientais são expressivos: a macaúba contribui para a recuperação da biodiversidade, conservação do solo e das nascentes, além de favorecer a captura de carbono, reduzindo a pegada de emissões em toda a cadeia produtiva (ACELEN, 2024). Para dar suporte técnico ao projeto, o BNDES aprovou um financiamento de R\$ 257,9 milhões para a construção do Acelen Agripark — centro de inovação localizado em Montes Claros (MG), voltado à pesquisa, desenvolvimento e melhoramento genético da macaúba. A estrutura terá capacidade para germinar até 1,7 milhão de sementes por mês e produzir 10,5 milhões de mudas por ano, posicionando o Brasil como referência em biotecnologia aplicada a essa oleaginosa (BNDES, 2024).

O investimento total, estimado em US\$ 2,7 bilhões, prevê a produção de 20 mil barris diários de combustíveis renováveis, a captura de cerca de 60 milhões de toneladas de CO₂ equivalente e a geração de mais de 90 mil empregos — dos quais 70% serão permanentes. Cerca de 20% da produção será proveniente da agricultura familiar, beneficiando diretamente mais de dez mil famílias em Minas Gerais e na Bahia (BNDES, 2024).

Diante desses fatores, torna-se evidente que a macaúba reúne atributos que a tornam altamente competitiva frente à soja. Sua elevada produtividade, menor impacto ambiental, adaptabilidade climática, potencial econômico e papel social conferem-lhe destaque como uma candidata estratégica para liderar a próxima fase da transição energética brasileira, promovendo segurança, sustentabilidade e inovação na cadeia de biocombustíveis.

2.6 PARCERIAS SUSTENTÁVEIS NO CAMPO: O MODELO INOCAS PARA O CULTIVO DA MACAÚBA

Embora amplamente explorada em Minas Gerais desde o início do século XX, a atividade extrativista da macaúba não se consolidou de forma duradoura (PINTO, 1932). Atualmente, no entanto, a cadeia produtiva da espécie vem se fortalecendo com iniciativas que integram recuperação ambiental, produção sustentável e impacto social, inaugurando um novo ciclo com práticas alinhadas à bioeconomia (FAVARO; ROCHA, 2022).

Nesse contexto, destaca-se a atuação da Inocas, empresa cuja missão é estruturar a cadeia produtiva da macaúba, buscando torná-la uma referência global na produção de óleos vegetais sustentáveis, sem comprometer a oferta de alimentos ou causar desmatamento (INOCAS, 2025). Entre suas metas, está o compromisso de regenerar 30 mil hectares de pastagens degradadas por meio do cultivo da macaúba, promovendo também o envolvimento da agricultura familiar (INOCAS, 2025).

A Inocas é responsável pela implantação do cultivo, fornecendo mudas, insumos e assistência técnica, enquanto o agricultor cede a área e cuida da manutenção das plantas. Nos cinco primeiros anos — período em que a palmeira desenvolve sua estrutura reprodutiva — o produtor recebe uma compensação financeira: cerca de R\$ 250/ha até o terceiro ano, devido à interrupção do pastejo para proteger as mudas, e aproximadamente R\$ 100/ha no quarto e quinto anos, quando o gado pode voltar à área. A colheita é partilhada entre empresa e agricultor durante 20 anos, conforme percentuais definidos por três modalidades de colheita, carregamento e transporte. Nesse período, a venda da fração pertencente ao produtor é exclusiva à Inocas. Após as duas décadas, toda a produção torna-se propriedade do agricultor, que poderá seguir comercializando com a empresa, se desejar. Em Minas Gerais, a Inocas também adota o arrendamento de terras como alternativa para o plantio da macaúba (JAGER, 2023).

O Projeto Macaúba, iniciativa piloto da Inocas, foi implantado inicialmente na região do Alto Paraíba (MG), aproveitando a presença de macaúbas nativas, a concentração de pequenos produtores de leite e uma infraestrutura favorável. Entre 2018 e 2022, foram plantados 2.139 hectares, com aproveitamento dos coprodutos do fruto como ração animal, integrando-se à cadeia produtiva local (INOCAS, 2025). O projeto contou com um investimento total de US\$ 6 milhões, sendo cofinanciado pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), por meio do Fundo Multilateral de Investimentos (FOMIN) e do Programa de Investimentos Florestais (FIP), que aportaram US\$ 4 milhões. Os US\$ 2 milhões restantes vieram de investidores privados, viabilizando o plantio experimental em sistema silvipastoril e ações voltadas ao extrativismo (FAVARO; ROCHA, 2022).

A expansão do Projeto Macaúba no Vale do Paraíba (SP), também conduzida pela Inocas, foca em áreas de pecuária extensiva de baixa produtividade e pequenos produtores rurais — público prioritário nas parcerias da empresa. Com apoio do Governo do Estado de São Paulo, por meio da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA), a iniciativa se articula com políticas públicas de recuperação ambiental, como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que remunera proprietários rurais por práticas sustentáveis (INOCAS, 2025).

Nesse contexto, o Projeto Conexão Mata Atlântica investirá R\$ 5 milhões para incentivar o cultivo da macaúba em propriedades rurais da região. A proposta integra esse plantio a ações de conservação e restauração da vegetação nativa, recuperação de pastagens degradadas, sequestro de carbono e preservação da biodiversidade, da água e do solo. A SIMA também firmou um convênio com a Inocas para apoiar o cultivo da palmeira por meio de contratos de parceria rural com duração de 20 anos e compromisso de compra da produção. Nessa parceria, a empresa fornece mudas, insumos e assistência técnica, e o produtor disponibiliza a área e se responsabiliza pela manutenção das plantas. Ao final do contrato, toda a produção será do

agricultor, que poderá continuar vendendo à Inocas. Embora independentes, o PSA e o convênio com a empresa se complementam, gerando benefícios significativos aos produtores e ao meio ambiente, ao promover serviços ecossistêmicos e o aumento da renda nas propriedades (SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2021).

A etapa mais recente do Projeto Macaúba está em desenvolvimento no Nordeste Paraense (PA), com a meta de implantar 5.000 hectares até 2026, utilizando modelos adaptados à realidade local. A escolha da região se deve a fatores estratégicos como o interesse crescente de investidores em negócios sustentáveis na Amazônia Legal, a presença da pecuária em áreas sem histórico de desmatamento e a proximidade com um comprador estratégico que absorverá toda a produção de óleos vegetais (INOCAS, 2025).

Para fortalecer sua atuação na região amazônica e enfrentar seus desafios específicos, a Inocas firmou parceria com a Amaz, uma aceleradora de impacto que apoia empreendedores alinhados à sustentabilidade. Desde 2022, a empresa é acelerada pela Amaz, beneficiando-se de sua *expertise* e rede de apoio, que conta com um fundo híbrido de R\$ 25 milhões voltado ao financiamento de negócios de impacto na Amazônia pelos próximos cinco anos. Essa colaboração visa ampliar o alcance e a eficácia do projeto, unindo inovação, geração de renda local e impacto socioambiental positivo (FAVARO; ROCHA, 2022).

Com a meta de converter 30 mil hectares de pastagens degradadas em áreas produtivas até 2030, a Inocas aposta na restauração ecológica e produtiva por meio do cultivo da macaúba em Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs). Essa abordagem tem promovido impactos ambientais, sociais e econômicos relevantes (Quadro 1).

Quadro 1 – Indicadores de impacto até o momento.

Indicador	Quantidade	Descrição
Hectares de macaúba plantados	3.031 ha	Em sistemas ILPF ou SAF em áreas de pastagens degradadas.
Produtores rurais em parceria/fomento	66	Agricultores com plantio de macaúba, majoritariamente familiares.
Produtores com áreas arrendadas	13	Agricultores familiares com cultivo de macaúba por arrendamento.
Pessoas em ressocialização beneficiadas	241	Pessoas do sistema prisional com oportunidades de trabalho na produção de sementes.
Corredores ecológicos em formação	13	Conectando áreas de APP e RL anteriormente isoladas.
CO ₂ e sequestrado nos plantios	76.703t	Toneladas de CO ₂ equivalente sequestradas, segundo estudo do imaflora (2020).

Fonte: Inocas. Tabela elaborada pelos autores.

Essa iniciativa conta com o apoio de parceiros como a Iniciativa 20x20, o WRI, o IAC, a UFV, a Althelia e a Natura. Estima-se que a adoção de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) com a macaúba possa resultar na produção de mais de 120 milhões de toneladas de óleo, o que representaria um volume 60% superior à produção global atual de óleo de palma, estimada em 75,6 milhões de toneladas. O cultivo da macaúba em áreas de pastagens degradadas no Cerrado também é apontado como uma estratégia promissora para contribuir com os compromissos de descarbonização assumidos pelo Brasil (FRANCO; ZIMPEL, 2022).

Dessa forma, o cultivo da macaúba, impulsionado pelas iniciativas da Inocas, vem se consolidando como uma alternativa estratégica para a restauração produtiva de pastagens degradadas, ao integrar inovação, sustentabilidade e inclusão social. A estruturação dessa cadeia produtiva sustentável contribui não apenas para o desenvolvimento territorial e a geração de renda, mas também para a mitigação das mudanças climáticas e a promoção da bioeconomia, posicionando o Brasil como um potencial protagonista na produção global de óleos vegetais em bases ambiental e socialmente responsáveis.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste Trabalho de Graduação consiste na pesquisa bibliográfica, que se caracteriza pelo levantamento e análise de materiais já publicados sobre o tema em questão. Conforme Lakatos e Marconi (2001), esse tipo de pesquisa busca reunir o conhecimento disponível em livros, artigos científicos, teses, dissertações e outras fontes confiáveis, proporcionando ao pesquisador uma compreensão mais ampla e fundamentada do objeto de estudo. Vergara (2000) ressalta que a pesquisa bibliográfica é essencial para embasar teoricamente qualquer investigação científica, além de evitar a repetição de estudos já realizados. No presente trabalho, essa abordagem será aplicada com o objetivo de coletar dados sobre a cadeia produtiva da macaúba, especialmente no que se refere ao papel das inovações tecnológicas na sua competitividade, a partir de fontes acadêmicas e jornalísticas disponíveis em meios físicos e digitais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 IMPACTO DAS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E NA COMPETITIVIDADE ECONÔMICA DA CADEIA PRODUTIVA DA

Para responder ao objetivo de avaliar o impacto das inovações tecnológicas na sustentabilidade ambiental e na competitividade econômica da cadeia produtiva da macaúba no Brasil, optou-se por utilizar o **Diagrama de Ishikawa**, também conhecido como **Diagrama de Causa e Efeito** ou **Diagrama Espinha de Peixe**, como ferramenta de apoio à análise dos resultados obtidos na pesquisa.

Essa ferramenta de gestão é amplamente utilizada na identificação, organização e visualização das possíveis causas de um problema específico, permitindo compreender de forma sistêmica os fatores que influenciam os processos e os efeitos gerados ao longo de uma cadeia produtiva. No contexto da macaúba, o diagrama foi aplicado com o objetivo de mapear as principais causas que limitam o avanço tecnológico, a sustentabilidade e a inserção competitiva dessa oleaginosa nos mercados de bioenergia e outros setores industriais, como o cosmético e o alimentício.

A estrutura do Diagrama de Ishikawa possibilitou categorizar os fatores causadores de problemas em áreas-chave, como **produção, tecnologia, comercialização, política e financiamento, mercado e aspectos sócios ambientais**, o que contribui para uma análise crítica mais aprofundada. Ao associar essas categorias às evidências levantadas na pesquisa, torna-se possível identificar gargalos produtivos, limitações logísticas, entraves regulatórios, lacunas tecnológicas e fatores ambientais que afetam a viabilidade da macaúba como alternativa estratégica para o setor de biocombustíveis no Brasil.

Além disso, essa abordagem permite destacar os efeitos positivos gerados pelas inovações tecnológicas já implementadas, evidenciando os avanços em eficiência produtiva, redução de impactos ambientais e ganhos de competitividade ao longo da cadeia. Portanto, o uso do

Diagrama de Ishikawa nesta etapa do trabalho contribui significativamente para a visualização integrada das inter-relações entre causas e efeitos, subsidiando a formulação de estratégias voltadas ao fortalecimento da cadeia produtiva da macaúba e à promoção de um modelo de desenvolvimento sustentável e inovador.

A seguir, apresentam-se os principais resultados da pesquisa, estruturados a partir das categorias analisadas no diagrama, com a discussão sobre seus impactos ambientais e econômicos e o potencial estratégico da macaúba para a bioenergia e demais aplicações industriais.

O uso do diagrama revelou que a cadeia da macaúba ainda enfrenta **baixa consolidação e aproveitamento produtivo**, resultado da combinação de fatores interdependentes que limitam sua expansão como alternativa estratégica para o setor de bioenergia e para outras aplicações industriais. Os principais problemas foram agrupados em seis eixos temáticos: Produção, Tecnologia, Comercialização, Política e Financiamento, Mercado e Aspectos Socioambientais.

No **eixo da produção**, observou-se que o longo ciclo produtivo da macaúba (cerca de cinco anos até a frutificação) dificulta sua adoção por agricultores que buscam retorno de curto prazo. Soma-se a isso a escassez de incentivos para sistemas agroflorestais integrados com culturas de ciclo curto, bem como a dificuldade histórica no acesso a mudas de qualidade, agravada por problemas de germinação até meados de 2007.

No que diz respeito à **tecnologia**, a pesquisa identificou um baixo nível de mecanização adaptada às realidades do extrativismo tradicional. Ainda há pouca inovação nos processos de extração e beneficiamento do fruto, o que compromete tanto a produtividade quanto a qualidade dos produtos. Outro desafio importante é a falta de integração entre o conhecimento científico e os saberes locais, o que poderia contribuir significativamente para soluções mais sustentáveis e apropriadas às diferentes regiões produtoras.

A **comercialização** também representa um gargalo crítico. Predomina a venda do fruto in natura, com baixa diversificação e aproveitamento dos coprodutos, o que reduz drasticamente o valor agregado da cadeia. A informalidade, a presença de atravessadores e a baixa emissão de notas fiscais afetam diretamente o acesso a políticas públicas de apoio, como o Programa de Garantia de Preços para Produtos da Sociobiodiversidade (PGPM-Bio), enfraquecendo a competitividade dos produtores.

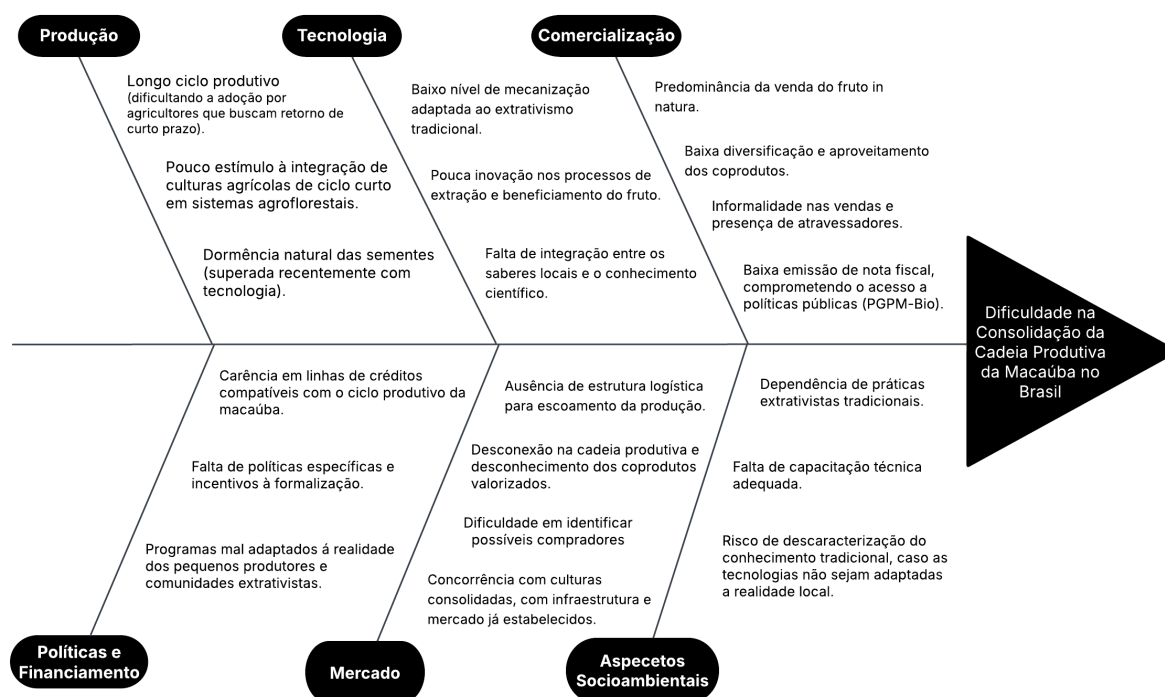
No **eixo político e de financiamento**, há uma carência de linhas de crédito compatíveis com o ciclo produtivo da macaúba, além de programas de fomento mal adaptados à realidade dos pequenos produtores e comunidades extrativistas. Faltam ainda políticas públicas específicas e incentivos à formalização, o que compromete o desenvolvimento sustentável e a estruturação da cadeia como um todo.

Em relação ao **mercado**, a cadeia enfrenta a ausência de estrutura logística adequada para o escoamento da produção, a falta de articulação entre os elos produtivos e o desconhecimento sobre o potencial de coprodutos com alto valor agregado, como o óleo da amêndoa. Soma-se a isso a dificuldade em identificar possíveis compradores, o que limita o acesso a mercados e reduz o incentivo à diversificação. Essa fragilidade é agravada pela concorrência com culturas consolidadas, como a soja, que contam com subsídios, infraestrutura e mercados já estabelecidos.

Por fim, os **aspectos socioambientais** revelam tanto desafios quanto oportunidades. A dependência de práticas extrativistas tradicionais, sem capacitação técnica adequada, limita os ganhos de eficiência e pode comprometer a sustentabilidade a longo prazo. Há também o risco de descaracterização do conhecimento tradicional, caso as tecnologias não sejam adaptadas de forma sensível às realidades locais. Por outro lado, destaca-se o potencial da macaúba para a recuperação de áreas degradadas, uma oportunidade ainda pouco explorada para promover

impactos ambientais positivos. A seguir, apresenta-se a figura 4 - Diagrama de Ishikawa na cadeia produtiva da macaúba.

Figura 4 – Diagrama de Ishikawa na cadeia produtiva da macaúba.



Fonte: Elaborado pelos autores a partir da pesquisa bibliográfica.

Dessa forma, a análise evidencia que o fortalecimento da cadeia produtiva da macaúba requer ações integradas que considerem desde a base produtiva até os aspectos mercadológicos e institucionais. A adoção de inovações tecnológicas precisa estar alinhada com estratégias de inclusão social, políticas públicas específicas e valorização do conhecimento local. Esse alinhamento é essencial para transformar a macaúba em uma alternativa viável e estratégica para a matriz energética brasileira, ampliando sua participação na produção de biocombustíveis e em mercados industriais sustentáveis.

4.2 AVALIAÇÃO ESTRATÉGICA DA CADEIA PRODUTIVA DA MACAÚBA POR MEIO DA ANÁLISE SWOT

Para responder ao objetivo de avaliar o impacto das inovações tecnológicas na sustentabilidade ambiental e na competitividade econômica da cadeia produtiva da macaúba no Brasil, foi adotada uma abordagem metodológica integrada que utilizou o Diagrama de Ishikawa como ferramenta inicial de apoio à análise. Também foi empregada a análise SWOT para sistematizar os fatores identificados e subsidiar a formulação de estratégias.

A análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats*), também conhecida como FOFA (Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças), é uma ferramenta clássica da administração estratégica, amplamente utilizada em diferentes contextos, como no autoconhecimento, no diagnóstico situacional e no suporte à elaboração de planos de ação (CHERMACK e KASSHANNA, 2007).

No contexto da macaúba, o Diagrama de Ishikawa foi aplicado para mapear as causas que impactam o avanço tecnológico, a sustentabilidade ambiental e a competitividade econômica da cadeia produtiva. Foram categorizadas áreas-chave como Produção, Tecnologia,

Comercialização, Política e Financiamento, Mercado e Aspectos Socioambientais. Essa categorização possibilitou uma análise crítica aprofundada dos elementos que limitam ou favorecem a consolidação da macaúba como alternativa estratégica na bioeconomia brasileira.

A partir do levantamento organizado pelo Diagrama de Ishikawa, procedeu-se à análise SWOT, que consiste na identificação e avaliação das **Forças (Strengths)**, **Fraquezas (Weaknesses)**, **Oportunidades (Opportunities)** e **Ameaças (Threats)** que permeiam a cadeia produtiva da macaúba. A ferramenta SWOT é essencial para traduzir o diagnóstico dos fatores internos (forças e fraquezas) e externos (oportunidades e ameaças) em insights estratégicos para o desenvolvimento sustentável da cadeia.

A análise SWOT evidenciou que as inovações tecnológicas, como a superação da dormência das sementes e a inclusão da macaúba no zoneamento climático oficial, representam forças que melhoram a produtividade e a sustentabilidade ambiental. Porém, a cadeia ainda enfrenta fraquezas importantes, como o longo ciclo produtivo, a baixa mecanização, e a informalidade da comercialização, que limitam a competitividade econômica.

Por outro lado, as oportunidades para o setor são amplas, incluindo o crescente mercado de biocombustíveis sustentáveis, políticas públicas de incentivo e projetos de grande escala que podem fortalecer a cadeia. As ameaças, como a dificuldade de acesso a crédito adequado, a concorrência com culturas consolidadas e o risco de impactos ambientais negativos, demandam atenção para mitigar riscos e promover um desenvolvimento equilibrado (Quadro 2).

Quadro 2 - SWOT da cadeia produtiva da macaúba.

Forças	Fraquezas
Potencial da macaúba para recuperação de áreas degradadas e uso em sistemas agroflorestais sustentáveis	Longo ciclo produtivo (5 anos até a frutificação), dificultando retorno econômico a curto prazo
Avanços tecnológicos na superação da dormência das sementes e no melhoramento genético	Baixo nível de mecanização adaptada às realidades do extrativismo tradicional
Riqueza de coprodutos com alto valor agregado (óleos, torta, fibra, carvão vegetal, etc.)	Baixa formalização dos produtores, o que dificulta acesso a políticas públicas e programas de incentivo
Capacidade de produção em diversas regiões do país, adaptando-se a diferentes biomas	Informalidade na comercialização (venda in natura, presença de atravessadores, baixa emissão de notas)
Integração com políticas ambientais e energéticas nacionais (como RenovaBio)	Falta de articulação entre os elos da cadeia produtiva
Inclusão no zoneamento agrícola oficial	Baixa integração entre saberes tradicionais e conhecimento científico
Oportunidades	Ameaças
Crescente demanda global por biocombustíveis sustentáveis e óleos vegetais alternativos	Dificuldade de acesso a linhas de crédito compatíveis com o ciclo da cultura
Projetos de grande escala em andamento (como no Mato Grosso do Sul), com potencial de estruturar a cadeia	Concorrência com culturas consolidadas (soja, palma) que possuem infraestrutura e subsídios consolidados
Políticas públicas de incentivo à sociobiodiversidade (PGPM-Bio, PSA, RenovaBio, etc.)	Risco de descaracterização do conhecimento tradicional e conflitos socioambientais
Potencial de parcerias com setores industriais (cosméticos, alimentício, farmacêutico, energia renovável)	Falta de infraestrutura logística adequada para escoamento da produção

Aumento da visibilidade da macaúba em debates sobre bioeconomia, transição energética e ESG	Risco de práticas não sustentáveis sem capacitação adequada nos sistemas extrativistas
Incentivo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias adaptadas às realidades locais	Baixa inserção nos canais de comercialização formais e acesso limitado aos mercados externos

Fonte: Elaborado pelos autores a partir da pesquisa exploratória.

Assim, o uso combinado do Diagrama de Ishikawa e da análise SWOT proporcionou uma visão integrada e detalhada dos desafios e potencialidades da cadeia produtiva da macaúba no Brasil. Essa abordagem permite direcionar estratégias que conciliem inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e competitividade econômica, fundamentais para consolidar a macaúba como alternativa viável e estratégica na matriz energética e nos mercados industriais sustentáveis do país.

4.3 PLANO DE AÇÃO COM BASE NA FERRAMENTA 5W2H PARA A CONSOLIDAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DA MACAÚBA NO BRASIL

A aplicação da ferramenta 5W2H permitiu a sistematização de ações estratégicas voltadas à superação dos principais entraves da cadeia produtiva da macaúba, identificados nas análises anteriores (Diagrama de Ishikawa e SWOT). Ao organizar o "o quê", "por quê", "onde", "quando", "quem", "como" e "quanto" de cada ação, foi possível estruturar um plano prático e orientado para resultados concretos, abrangendo desde aspectos técnicos e operacionais até fatores institucionais e sociais.

Os resultados do 5W2H evidenciam que a consolidação da cadeia produtiva da macaúba depende de um conjunto de medidas coordenadas. A primeira frente de ação diz respeito à ampliação da oferta de mudas de qualidade e ao incentivo a sistemas agroflorestais integrados. Tais ações visam reduzir o ciclo de espera até a frutificação e promover um uso mais eficiente e sustentável do solo, tornando o cultivo da macaúba mais atrativo para agricultores familiares e comunidades tradicionais.

Outro ponto crítico abordado no plano de ação é a necessidade de investimentos em mecanização adaptada e na qualificação da mão de obra envolvida. Essas iniciativas são fundamentais para aumentar a eficiência na colheita e no processamento, além de melhorar a qualidade dos produtos obtidos. A valorização do saber local, aliada à transferência de tecnologia de forma inclusiva e participativa, surge como estratégia essencial para garantir a sustentabilidade dos processos produtivos.

Do ponto de vista institucional e político, o 5W2H destacou a importância de fortalecer políticas públicas específicas para a cadeia da macaúba, incluindo linhas de crédito compatíveis com o seu ciclo produtivo, incentivos fiscais e mecanismos de acesso a programas como o PGPM-Bio. Tais medidas são indispensáveis para estimular a formalização dos produtores, viabilizar a comercialização com maior valor agregado e atrair investimentos para o setor.

Adicionalmente, as ações propostas incluem o desenvolvimento de plataformas digitais e campanhas de sensibilização sobre o potencial da macaúba, tanto para consumidores quanto para investidores. Essa abordagem visa ampliar a visibilidade do produto, aumentar a demanda e posicionar a cadeia de forma mais competitiva nos mercados da bioenergia, cosméticos e alimentos funcionais.

Por fim, o plano de ação elaborado com base no 5W2H contribui para a estruturação de um modelo de desenvolvimento regional sustentável, no qual a macaúba atua como vetor de geração de emprego, renda e recuperação ambiental. A clareza dos papéis, prazos e recursos

necessários para cada ação favorece sua execução e monitoramento, facilitando a articulação entre os diferentes atores envolvidos na cadeia.

Assim, os resultados do 5W2H reforçam a ideia de que a consolidação da cadeia da macaúba requer planejamento estratégico, coordenação multissetorial e investimento contínuo em inovação e inclusão. Ao orientar decisões com base em diagnósticos claros e ações bem definidas, essa ferramenta se mostra essencial para transformar potencial em realidade, promovendo um setor mais resiliente, competitivo e ambientalmente responsável. A seguir, apresenta-se o quadro 3 com ações prioritárias para promover a consolidação da cadeia da macaúba, articulando inovação, sustentabilidade e competitividade.

Quadro 3 - Plano de Ação para a consolidação da cadeia produtiva da macaúba no Brasil.

Ação	Por que?	Onde?	Quem?	Como?
Estimular a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias adaptadas	Superar gargalos de produtividade e eficiência	Instituições de pesquisa e campo	Universidades, EMBRAPA, institutos tecnológicos	Investimento em P&D, editais de fomento, parcerias público-privadas
Fortalecer viveiros e acesso a mudas de qualidade	Reduzir falhas no plantio e melhorar produtividade a longo prazo	Regiões potenciais produtoras	Governos locais, cooperativas, organizações de base	Apoio técnico e financeiro, capacitação de produtores, criação de polos de mudas
Incentivar sistemas agroflorestais integrando culturas de curto e longo prazo	Viabilizar retorno financeiro no curto prazo e sustentabilidade ambiental	Regiões agrícolas com vocação mista	Agricultores familiares, cooperativas, ONGs, extensionistas	Projetos piloto, assistência técnica, subsídios, intercâmbio de boas práticas
Estruturar linhas de crédito específicas para a cultura da macaúba	Vencer barreiras financeiras do ciclo longo e apoiar a formalização	Nacional (políticas públicas)	Bancos públicos, MAPA, BNDES, MDA	Criação de crédito rural adaptado, inclusão no Plano Safra, articulação com programas de sociobiodiversidade
Desenvolver centros de processamento e beneficiamento regionalizados	Aumentar valor agregado e reduzir perdas pós-colheita	Próximos aos polos produtivos	Setor privado, cooperativas, governos locais	Implantação de agroindústrias locais, parcerias com investidores, incentivos fiscais
Promover a capacitação técnica com base no saber tradicional e científico	Ampliar eficiência e garantir sustentabilidade sociocultural	Comunidades extrativistas	Instituições de ensino, ONGs, extensionistas, associações de base	Oficinas participativas, material didático, plataformas digitais, intercâmbio de experiências
Criar estratégia de marketing para os coprodutos da macaúba	Ampliar mercados e melhorar renda dos produtores	Mercados nacional e internacional	Associações de produtores, Sebrae, agências de marketing e comércio	Campanhas de valorização, certificações, criação de marca coletiva
Articular políticas públicas integradas e incentivos para a cadeia da macaúba	Superar desarticulação institucional e estimular o desenvolvimento regional sustentável	Esferas federal, estadual e municipal	MCTI, MMA, MAPA, MDA, frentes parlamentares, consórcios regionais	Criação de marcos legais, editais setoriais, inclusão em políticas ambientais, energéticas e rurais

Fonte: Elaborado pelos autores a partir da pesquisa.

5. CONCLUSÃO

Diante dos resultados apresentados nas ferramentas analíticas aplicadas, Diagrama de Ishikawa, Análise SWOT e Plano de Ação 5W2H, é possível afirmar que as inovações tecnológicas desempenham um papel central para transformar os desafios da cadeia produtiva da macaúba em oportunidades concretas de desenvolvimento sustentável e competitivo.

As inovações tecnológicas, quando associadas ao conhecimento tradicional e adaptadas à realidade das comunidades produtoras, podem reduzir significativamente os gargalos produtivos e logísticos identificados. Tecnologias de mecanização apropriadas ao extrativismo e à agricultura familiar, sistemas agroflorestais integrados e processos mais eficientes de extração e beneficiamento contribuem diretamente para o aumento da produtividade, a redução de perdas e a valorização dos coprodutos da macaúba. Esses avanços resultam não apenas em ganhos econômicos, mas também em benefícios ambientais, como a redução da pressão sobre ecossistemas nativos e o incentivo à recuperação de áreas degradadas.

Do ponto de vista da sustentabilidade, a macaúba se destaca por sua adaptabilidade a solos pobres, seu potencial para uso em sistemas regenerativos e sua elevada capacidade de sequestro de carbono, aspectos que podem ser potencializados com o uso de tecnologias que promovam uma gestão integrada do território e da biodiversidade. Além disso, a rastreabilidade e a certificação socioambiental da produção, viabilizadas por ferramentas digitais, ampliam a aceitação da macaúba em mercados mais exigentes e ambientalmente conscientes.

Em termos de competitividade econômica, as inovações tecnológicas aumentam o valor agregado dos produtos da macaúba, permitindo a diversificação da cadeia com a inserção em mercados como os de cosméticos, alimentos e bioquímicos. A adoção de modelos de negócio inovadores, o acesso a plataformas digitais de comercialização e a formalização da cadeia são estratégias viabilizadas por políticas públicas e investimentos privados, que podem transformar a macaúba em um ativo estratégico para o Brasil no cenário internacional da bioeconomia.

Portanto, o presente trabalho alcança seu objetivo ao demonstrar que o impacto das inovações tecnológicas na cadeia produtiva da macaúba é duplo: promove a sustentabilidade ambiental ao integrar conservação e uso racional dos recursos naturais, e fortalece a competitividade econômica ao posicionar a macaúba como uma alternativa viável e estratégica nos mercados de bioenergia e outras aplicações industriais. Para isso, é essencial a atuação articulada entre governo, setor produtivo, comunidade científica e populações locais, de forma a consolidar uma cadeia produtiva inovadora, justa e ambientalmente responsável.

Embora o presente estudo tenha proporcionado uma análise abrangente da cadeia produtiva da macaúba por meio de ferramentas qualitativas como o Diagrama de Ishikawa, a análise SWOT e o plano de ação 5W2H, vale destacar algumas limitações importantes. A principal delas está relacionada à ausência de uma pesquisa empírica com dados primários coletados diretamente junto aos atores da cadeia (produtores, processadores, pesquisadores, órgãos públicos e empresas). Além disso, não foi realizado um estudo de caso aprofundado em regiões específicas de produção, o que poderia oferecer uma compreensão mais detalhada das particularidades locais, dos modelos de negócio existentes e das variáveis socioeconômicas e ambientais envolvidas.

Diante disso, recomenda-se que pesquisas futuras adotem abordagens metodológicas complementares, como estudos de caso regionais, entrevistas em profundidade e aplicação de questionários estruturados com os diferentes elos da cadeia produtiva. Investigações quantitativas poderão contribuir para mensurar com maior precisão os impactos das inovações tecnológicas em indicadores de produtividade, renda, sustentabilidade e inclusão social. Ademais, será relevante explorar comparações internacionais com outras cadeias oleaginosas sustentáveis, de forma a identificar boas práticas e possibilidades de cooperação para o fortalecimento da macaúba como ativo estratégico da bioeconomia brasileira.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei nº 13.546, de 21 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). 2017.

CASTRO, Rafael Peron; SCINOCCA, Francisco; SANTOS, Fabio Lucio. Extrativismo da macaúba em Jaboticatubas, Minas Gerais. [S.l.]: [s.n.], 2024. Disponível em: <https://orcid.org/0000-0002-1042-649X>. Acesso em: 19 jun. 2025.

CHERMAK, T. J.; KASSHANNA, B. K. O uso e o uso indevido da análise SWOT e suas implicações para profissionais de RH. *International Human Resource Development*, v. 10, n. 4, p. 383–399, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13678860701718760>. Acesso em: 19 jun. 2025.

COLOMBO, C. A. Macaúba: uma promissora palmeira tropical para a produção de óleo vegetal. *OCL – Oleaginosas e Gorduras, Culturas e Lipídios*, v. 25, n. 1, p. 9, jan./fev. 2018. Disponível em: <https://www.ocljournal.org/articles/ocl/abs/2018/01/ocl170038s/ocl170038s.html>. Acesso em: 5 maio 2025.

COLOMBO, C. A.; BERTON, L. H. C. Sistema silvipastoril com palmeira macaúba: alternativa para produção pecuária sustentável. *Boletim de Indústria Animal – Instituto de Zootecnia*, São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.iz.agricultura.sp.gov.br/bia/index.php/bia/article/view/1745>. Acesso em: 14 maio 2025.

CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. da et al. Genetic diversity of macauba from natural populations of Brazil. *BMC Research Notes*, v. 8, Art. 406, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13104-015-1335-1>. Acesso em: 12 fev. 2025.

EVARISTO, A. B. et al. Harvest and post-harvest conditions influencing macauba (*Acrocomia aculeata*) oil quality attributes. *Industrial Crops and Products*, v. 85, p. 63-73, jul. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.052>. Acesso em: 27 mar. 2025.

FÁVARO, S. P. et al. Armazenamento e processamento da macaúba: contribuições para manutenção da qualidade e aumento do rendimento de óleo da polpa. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2018. 38 p. (Embrapa Agroenergia. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 16).

FERREIRA, Joicy Silva. O crescimento dos biocombustíveis no Brasil. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias Renováveis) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/31892/1/TCC_JOICY%20SILVA%20FERREIRA.pdf. Acesso em: 19 jun. 2025.

FRANCO, V. S. F.; ZIMPEL, J. Projeto Macaúba – Introdução de sistema silvipastoril inovador no cerrado brasileiro para a produção de óleos vegetais sustentáveis. Cepal, Nações Unidas, 2020. 12 p. Disponível em: <https://archivo.cepal.org/pdfs/bigpushambiental/Caso65-ProjetoMacauba.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2025.

GALVEAS, L. B.; LOPES, M. A. Bioinsumos e combustíveis do futuro fortalecem a transição energética. *Portal Embrapa Agroenergia*, 13 jan. 2025. Disponível em: portal Embrapa. Acesso em: 19 jun. 2025.

JAGER, E. G. A. A cadeia da macaúba como vetor de desenvolvimento sustentável do pequeno agricultor familiar no Cerrado Mineiro. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, Escola de Economia de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/7426fef-0871-4dd1-a84f-f769616732f2/content>. Acesso em: 27 maio 2025.

KLINK, C.; MOREIRA, A. G. Past and current human occupation, and land use. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (ed.). *The cerrados of Brazil*. Nova Iorque: Columbia University Press, 2002. p. 69-88. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.7312/oliv12042-004/html>. Acesso em: 17 mar. 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. Fundamentos de metodologia científica. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2001.

MOTA, Clenilso Sehnem. Photosynthetic characteristics of macaúba palm (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) subjected to water shortage. 2011. 85 f. Tese (Doutorado em Controle da maturação e senescência em órgãos

perecíveis; Fisiologia molecular de plantas superiores) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/988>. Acesso em: 19 jun. 2025.

NOBRE, S. R. Viabilidade da macaúba para a produção de biocombustível: resumo executivo. Brasília: WWF-Brasil, 2022. Disponível em: https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/resumoexecutivo_macauba_final_v3.pdf. Acesso em: 27 maio 2025.

PINTO, C. S. Coco macaúba. *Boletim de Agricultura, Zootecnia e Veterinária*, v. 5, n. 2, p. 60-69, 1932.

RODRIGUES, Artur Saturnino. Inventário do ciclo de vida da produção de biodiesel utilizando macaúba como fonte de matéria-prima. 2021. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Tecnológicos e Ambientais) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2021. Disponível em: <https://acervo.ufvjm.edu.br/server/api/core/bitstreams/1b81e8c2-b5c5-4942-9b23-eee2a11ccf24/content>. Acesso em: 19 maio 2025.

SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. F. Flowering and Fruiting Phenologies of the Palm *Acrocomia aculeata*: Patterns and Consequences. *Biotropica*, Brasília, v. 27, n. 2, p. 168-173, jun. 1995. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2388992>. Acesso em: 8 jan. 2025.

VERGARA, S. C. Projetos e relatórios de pesquisa em administração. 3. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2000.

VIANA, N. M.; FÁVARO, S. P.; ANJOS, S. S. N. dos. Análise prospectiva de tecnologias na cadeia de valor da macaúba. Brasília, DF: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1167270/1/Analise-prospectiva-de-tecnologias.pdf>. Acesso em: 27 maio 2025.