



INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL NA CAFEICULTURA: O POTENCIAL DA GESTÃO ECOEFICIENTE NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS COM O USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Aluna: Késia Gandí de Barros

Orientador: Sthéfany Rhodes Cicarini

Curso: Administração Período: 8º Período Área de Pesquisa: Sustentabilidade

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo investigar o impacto da inovação sustentável na cafeicultura, destacando o potencial da gestão ecoeficiente no tratamento de resíduos com a integração de Inteligência Artificial (IA). A pesquisa procura compreender como a Inteligência Artificial (IA) pode otimizar os processos produtivos, agregar valor aos subprodutos da cadeia de produção do café e mitigar os impactos ambientais decorrentes dessa atividade econômica. A metodologia adotada inclui uma revisão bibliográfica de estudos acadêmicos relacionados à gestão de resíduos na cafeicultura e à aplicação da Inteligência Artificial (IA) no setor agrícola. Complementarmente, foi realizado um estudo de caso único com um produtor de café que implementa práticas ecoeficientes, permitindo a análise prática das vantagens e desafios dessa abordagem. Os resultados obtidos indicam que a adoção de práticas sustentáveis apoiadas por Inteligência Artificial (IA) proporciona ganhos significativos na eficiência da cafeicultura. Entre os principais benefícios, destaca-se a identificação de oportunidades para a reutilização de subprodutos, automação de etapas do tratamento de resíduos, redução de custos operacionais e a otimização da sustentabilidade no processo. Conclui-se, portanto, que a combinação da sustentabilidade e tecnologia é fundamental para posicionar a cafeicultura em direção a um futuro mais responsável, eficiente e alinhado às demandas globais por uma agricultura resiliente e de baixo impacto ambiental.

Palavras-chave: Inovação Sustentável, Gestão Ecoeficiente, Inteligência Artificial.

1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas mais relevantes no contexto global, especialmente para países como o Brasil, líder mundial na produção de grãos de café. No entanto, a cadeia produtiva do café enfrenta desafios crescentes relacionados à sustentabilidade, devido ao alto volume de resíduos (sólidos e líquidos) gerados ao longo do processo produtivo. Quando estes resíduos não são devidamente tratados, podem ocasionar graves impactos ambientais e riscos à saúde humana, evidenciando a necessidade urgente de soluções inovadoras e eficientes. Estima-se que anualmente são geradas 225 milhões de toneladas de resíduos líquidos e 9,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos em nível mundial (DIAS, 2014).

Neste contexto, a adesão a práticas sustentáveis tem ganhado cada vez mais importância, pois permite otimizar os processos produtivos, reutilizar subprodutos do café, reduzir desperdícios e minimizar a degradação ecológica e social. A inovação sustentável, entendida como a capacidade de desenvolver soluções criativas que buscam equilibrar o progresso econômico com responsabilidade ambiental e social, emerge como uma estratégia indispensável para os setores industriais e agrícolas, uma área crucial para a economia nacional. Segundo Hart e Milstein (2003), a inovação sustentável não apenas melhora a eficiência dos processos produtivos, mas também gera novos modelos de negócios e fontes de receita sustentável, ao transformar resíduos em recursos valiosos.

Entre as práticas emergentes, destaca-se a gestão ecoeficiente, alinhada ao uso de tecnologias avançadas, como a Inteligência Artificial (IA). Essas inovações têm ganhado destaque na cafeicultura pelo seu potencial em promover maior sustentabilidade, melhorando a imagem do produtor diante dos consumidores (FIELKE, 2019; NAWANDAR; SATPUTE, 2019; MIRANDA; 2019). A Inteligência Artificial (IA) determina o momento ideal para a colheita de commodities agrícolas, tornando mais eficiente a detecção de doenças e controle das máquinas (MAUANGPRATHUB, 2019). Além disso, contribui para a redução dos custos e otimiza a coleta de dados sobre áreas cultivadas (PIVOTO, 2019), aumentando a capacidade de solucionar problemas referentes à produtividade da fazenda (OZDOGAN, 2017). A Inteligência Artificial (IA) também diminui os resíduos em plantações, água e energia, ao mesmo tempo, em que torna mais eficiente o uso dos insumos e de defensivos agrícolas (GRIEVE, 2019; QUIROZ; ALFÉREZ, 2020; ZHAI, 2020).

Nesse cenário, pretende-se, com esta pesquisa, responder à seguinte questão: “Quais os principais impactos na implementação das práticas de gestão ecoeficiente no tratamento de resíduos com o uso de inteligência artificial?” Discutir sobre a inovação sustentável na cafeicultura: o potencial da gestão ecoeficiente no tratamento de resíduos com o uso de inteligência artificial que, justifica-se, pela necessidade de práticas agrícolas que alinhem preservação ambiental com competitividade e produtividade. Portanto, a gestão ecoeficiente desses resíduos, com o apoio de tecnologias como o uso da inteligência artificial, pode trazer melhorias substanciais no tratamento de resíduos. Neste contexto, é possível notar que a inovação sustentável na cafeicultura tem potencial de impactar diretamente os produtores, comunidades e indústrias, desenvolvendo soluções eficientes. Através da minimização residual, reaproveitamento de subprodutos e otimização dos recursos.

Dessa maneira, objetiva-se com este trabalho analisar os principais impactos na implementação das práticas de gestão ecoeficiente no tratamento de resíduos com o uso de inteligência artificial, e será distribuída nas seguintes etapas: O Processamento do Café e a Geração de Resíduos; Gestão Ecoeficiente da Cafeicultura; Inteligência Artificial (IA) na Agricultura Sustentável; Inteligência Artificial (IA) Aplicada ao Tratamento de Resíduos da Cafeicultura e Analisar um estudo de caso que integre a gestão ecoeficiente no tratamento de resíduos com a utilização de Inteligência Artificial (IA).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial Teórico

A inquietação mundial com as questões ambientais passou a ser discutida com vigor, em virtude dos impactos ocasionados pela ação humana no meio, assim como a contingência de questões como o aquecimento global e as mudanças climáticas que, como consequência, expõem a necessidade da adesão de ações latentes ao assunto por parte das organizações do setor primário. A expansão da consciência coletiva com relação ao meio ambiente e à complexidade das atuais demandas ambientais que a sociedade repassa às companhias induz a um novo posicionamento por parte das organizações em fase de tais questões (TACHIZAWA, 2002). Nesse sentido, as instituições do setor agrícola adotaram um novo posicionamento de marca associada à sustentabilidade, no que lhe concerne, produzir e entregar mercadorias competitivas sem consumir de maneira exagerada os recursos naturais e poluir a biogeocenose, caracterizando o que se denomina ecoeficiência.

Segundo Alves (2010, p. 14), a ecoeficiência surge como um meio para a conquista do desenvolvimento sustentável, substancialmente no que diz respeito à prudência ecológica e eficiência econômica. Este conceito procura equilibrar a utilização sustentável dos recursos naturais com a minimização dos impactos ambientais, sem comprometer a qualidade dos produtos e serviços oferecidos. A produção ecoeficiente – produção limpa ou produção mais limpa – é uma metodologia que procura fabricar mais produtos/serviços de qualidade, com menos insumo – matéria-prima, água e energia elétrica – e poluição – emissão de gás, resíduos tóxicos e não biodegradável (GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS, 2018). No entanto, para implementar a gestão ecoeficiência de maneira eficaz e sistemática, é necessária a utilização de ferramentas tecnológicas avançadas que permitam a monetarização e gestão inteligente de recursos e resíduos.

Segundo Talaviya (2020), o setor do agronegócio vem se tornando cada vez mais digital, com o uso crescente de tecnologias baseadas em Inteligência Artificial (IA), que passou a desempenhar um papel importante para potencializar o tratamento de resíduos agrícolas. A aplicação de inteligência artificial na gestão eficiente de resíduos promove a economia circular e a sustentabilidade ambiental, otimizando a autogestão de resíduos e sua classificação (NAÑEZ-ALONSO, 2021). Essa digitalização, conhecida como Agricultura 4.0, utiliza IA para prever safras, monitorar a saúde das plantas e gerenciar recursos de forma mais eficiente, resultando em uma produção agrícola mais sustentável e resiliente.

A adoção de práticas voltadas ao meio ambiente pelas empresas nada mais é do que uma resposta ao que almeja o novo cliente, o consumidor verde ecologicamente correto, e aos impasses ambientais (TACHIZAWA, 2002). Segundo Ottman (1994), o “consumidor verde” ou “ecologicamente consciente” é aquele que, por meio de suas escolhas de consumo, busca reduzir ou eliminar impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade. Esses consumidores priorizam produtos e serviços que promovam a sustentabilidade e sejam menos nocivos ao ecossistema. Além disso, como destacado por Alves (2011), para o consumidor verde, não basta que o produto seja ecológico; é essencial que a empresa adote práticas éticas e responsáveis, demonstrando um comprometimento genuíno com questões sociais e ambientais.

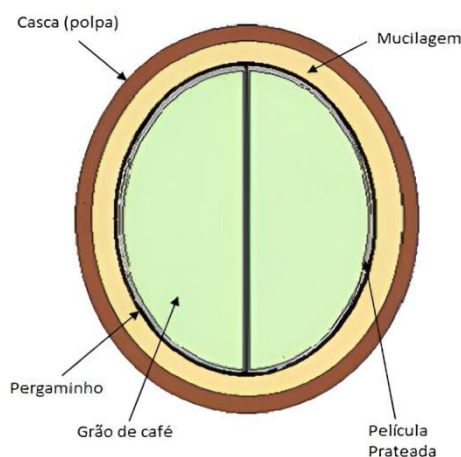
Nesse contexto, empresas que incorporam uma postura de responsabilidade socioambiental ganham não apenas a confiança desses consumidores, mas também fortalecem sua credibilidade no mercado, contribuindo para uma imagem positiva e alinhada às demandas por sustentabilidade.

2.2 O Processamento do Café e a Geração De Resíduos:

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Café Solúvel (ABICS), o Brasil é mundialmente reconhecido como o principal exportador e produtor de grãos de café do mundo. De acordo com a Embrapa (2022), em 2022 houve a produção de mais de 50,38 milhões de sacas de café, das quais 64% foram da espécie Arábica (32,41 milhões) e 36% de Conilon (17,97 milhões). Isso demonstra a relevância do café como um dos segmentos mais importantes da indústria de alimentação e bebida mundial, podendo ser considerado uma das commodities mais vendidas no mundo (BOZZOLA, 2022).

Os grãos de café – que pertence à família Rubiaceae e ao gênero *Coffea* - apresentam um formato ovóide composto por várias camadas, como casca (epicarpo), mucilagem, pergaminho (endocarpo), película prateada (espermoderma) e grão de café (endosperma). As diversas espécies de café detêm mesmo formato e separação de suas partes, representados na figura 1, diferenciando-se apenas pelas suas propriedades e quantidade de substâncias em sua composição (MUSSATO, 2011).

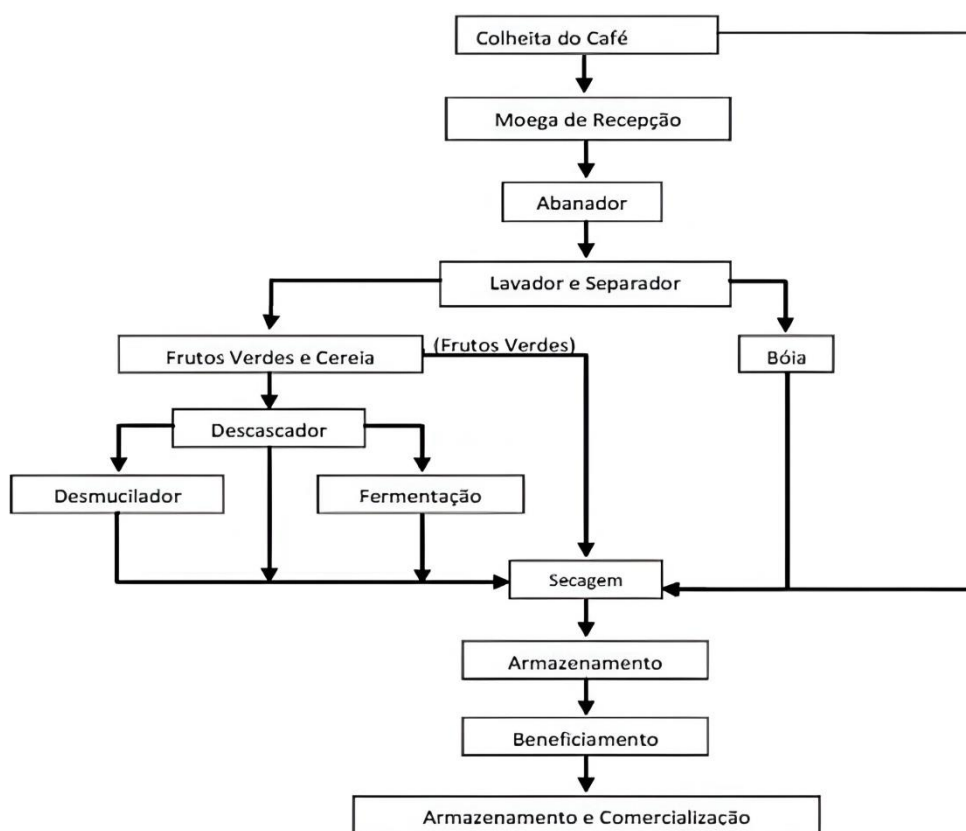
Figura 1 Esquema de um corte longitudinal do grão de café.



Fonte: Mussato (2011, p.15).

O método de processamento do café, a contar do momento da colheita até à torra do grão, é considerado uma atividade complicada para a compreensão dos indivíduos que não possuem familiaridade com a cultura, devido à riqueza de detalhes e equipamentos usados por toda a extensão da produção. No entanto, é essencial aprender detalhadamente cada etapa do processo, já que os resíduos são produzidos no decorrer da produção. A figura 2 demonstra o fluxograma das etapas da fabricação do café, apresentando as possíveis maneiras de processar o fruto colhido (ANDRADE, 2011).

Figura 2 Fluxograma do diferentes tipos de processamento do café

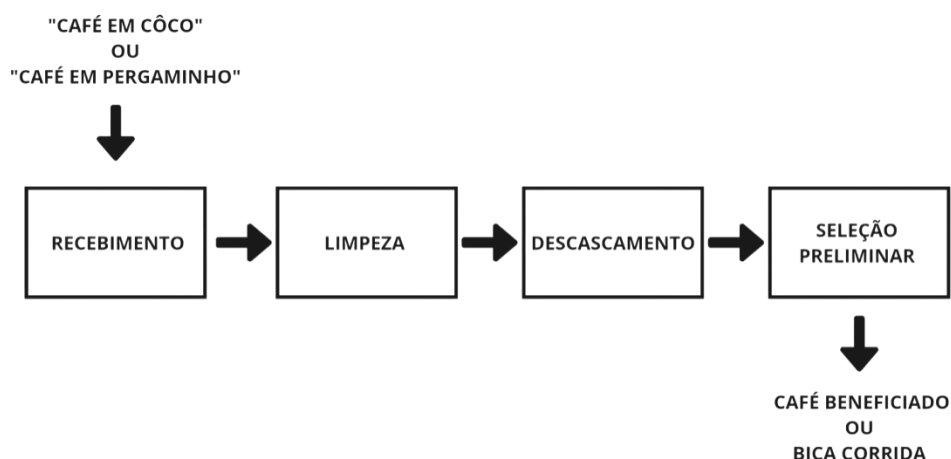


Fonte: Borém (2008, p.4).

Defronte a ilustração, é perceptível avaliar o passo a passo do processo que o grão de café é submetido, na qual a primeira etapa consiste no descarregamento dos frutos na moega de recebimento para em seguida ser encaminhado aos distintos tipos de processo, via seca ou via úmida, visto que, ambos geram resíduos que podem ser categorizados como sólido ou líquido. A produção de resíduos é significativa, com cerca de 225 milhões de toneladas de resíduos líquidos (25 t de águas por toneladas de grãos de café) e 9,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos, envolvendo casca, polpa, mucilagem, pergaminho, película prateada e borra de café (1,1 t de resíduo sólido por tonelada de grãos de café) (DIAS, 2014).

O beneficiamento do café, quando efetuado na própria propriedade, retém as vantagens de dizimar os custos com transporte de carga e garantir as perfeitas condições dos grãos beneficiários, evitando, assim, a perda de sementes na movimentação. Portanto, essa fase consiste nas operações que integram o processo de alteração do café em pergaminho, já seco, em café em grão, conforme o esquema apresentado na figura 3 (BORÉM, 2008).

Figura 3 Etapas do Beneficiamento do café.



Fonte: Borém (2008, online)

Depois da secagem e do processamento do grão, segundo ilustração acima, este será dirigido a um conjunto de operações essenciais para a etapa de descascamento, retirada de sujeiras (torrões, pedras, paus, entre outros) por meio de um catador de pedras e, por fim, fazer a separação dos frutos (em diversos tamanhos), depois é ensacado para a posterior comercialização no mercado. Contudo, a gestão dos resíduos gerados ao longo desse processo representa um grande desafio, uma vez que a destinação inadequada desses resíduos está diretamente relacionada com problemas socioambientais, como da degradação do solo, a poluição de corpos d'água, o aumento de enchentes, a poluição do ar e a propagação de doenças (BESEN, 2010).

Portanto, para enfrentar estes desafios, é preciso investir em práticas sustentáveis e inovadoras, de modo a minimizar os danos ambientais e contribuir para uma cadeia produtiva mais responsável e circular. A implementação de práticas de economia circular nas empresas é crucial, pois a interseção da economia circular e a sustentabilidade são inegavelmente profunda, fundamentada em princípios que defendem a preservação e a melhoria do capital natural, otimização da eficiência dos recursos e promoção da eficácia do sistema (FOUNDATION, 2013). A minimização do consumo de recursos, o uso eficiente de materiais e a redução da produção de resíduos não são apenas benéficos para o meio ambiente, mas também oferecem oportunidades significativas para a inovação e a eficiência econômica (GEISSDOERFER, 2017). Ao adotar essas práticas, torna-se possível promover uma gestão de resíduos mais eficientes e alinhada aos princípios da gestão ecoeficiente.

2.3 Gestão Ecoeficiente na Cafeicultura:

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2015), “se o crescimento da economia global seguir o ritmo observado nos últimos dez anos, o planeta não será capaz de suprir a demanda por recursos naturais até 2050”. Em outras palavras, em poucas décadas, o homem enfrentaria a escassez de itens indispensáveis à sua existência, a menos que algo seja tomado a respeito (PEARSON, 2011). Nesse cenário, a conscientização global sobre as questões ambientais forçou os empreendedores a reavaliar suas práticas produtivas, procurando alternativas que permitam elevar a produção sem comprometer o ecossistema do planeta.

O termo ecoeficiência, introduzido pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) em 1992, no livro *Changing Course*, está enraizado na proposta de desenvolvimento sustentável apresentado no Relatório *Brundtland* - elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) das Nações Unidas (ONU). Que define o desenvolvimento sustentável como “aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”. A ecoeficiência, portanto, visa explorar os ecossistemas de maneira responsável, reduzindo os impactos econômicos e ambientais da produção. Observe que os benefícios não se restringem à conservação ambiental, mas abrangem também o desempenho econômico dos negócios. (PEARSON, 2011).

A implementação da gestão ecoeficiente na cafeicultura, um setor agrícola de grande importância mundial, é fundamental para assegurar a sustentabilidade ambiental e econômica da atividade. Segundo Sérgio Parreiras Pereira (2017), a produção de café sustentável tende a envolver menores riscos do que a produção convencional, pois “trata da aplicação do conhecimento gerado pela pesquisa visando bons produtos, com redução de riscos”, assegurando um produto de maior qualidade, com valor de revenda superior (ABIC, 2017). Esse enfoque é crucial, pois o cultivo de grãos de café tem impacto significativo na utilização de recursos naturais, como água, energia e solo, além de gerar emissão de gases do efeito estufa e resíduos (líquido e sólido). Dessa maneira, adotar práticas de ecoeficiência na cafeicultura não só preserva o meio ambiente, mas também melhora a viabilidade econômica dos cafeicultores e a competitividade no mercado.

O conceito de ecoeficiência, portanto, vai além da simples diminuição de custos e abrange a criação de valor ao decorrer da cadeia produtiva. A gestão ecoeficiente é alcançada quando uma companhia, através do fornecimento de bens e serviços a preços competitivos, consegue satisfazer às necessidades humanas, trazer qualidade de vida, reduzindo progressivamente o impacto ambiental e o consumo de recursos ao longo de suas operações (WBCSD, 1996). A gestão ecoeficiente oferece inúmeros benefícios para os produtores de grãos de café. Segundo o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável – CEBDS (2005), esses benefícios incluem:

- Diminuir o dano ambiental reduz o risco e responsabilidades derivadas,
- Oferecer condições otimizadas de saúde e segurança ocupacional,
- Reduzir custos devido à otimização do uso de recursos e da redução de capital dedicado à infraestrutura,
- Permitir maior competitividade e eficiência, patrocinando a inovação,

- Aprimorar a imagem da empresa e ampliar a confiança das partes interessadas,
- Melhorar o relacionamento com os órgãos ambientais, com as comunidades vizinhas e a mídia,
- Intensificar a reciclagem de materiais,
- Estimular a utilização de recursos renováveis

A gestão ecoeficiente na cafeicultura revela-se uma abordagem essencial para o desenvolvimento sustentável do setor. Ao implementar práticas agrícolas mais conscientes, como o uso racional de recursos, redução de insumos químicos e preservação da biodiversidade, é possível equilibrar a produtividade com a preservação ambiental. Além de minimizar os impactos negativos ao ecossistema, essa gestão favorece a rentabilidade dos produtos e serviços em atender as exigências de um mercado cada vez mais consciente sobre a origem dos produtos. Assim sendo, investir em estratégias eficientes coopera para um futuro mais sustentável e equilibrado para as gerações futuras.

2.4 Inteligência Artificial na Agricultura Sustentável:

A Revolução Verde, ocorrida entre as décadas de 1940 e 1970, foi um movimento agrícola responsável pela introdução de novas tecnologias, como sementes melhoradas, defensivos e fertilizantes, com o objetivo de elevar a produtividade e atender a demanda gradativa da época (LAZZARI & SOUZA, 2017). Esse movimento teve um impacto profundo na segurança alimentar, permitindo que países em desenvolvimento, como México, Índia e Filipinas, aumentassem significativamente suas produções agrícolas e mitigassem crises de fome. No entanto, seus impactos ambientais, como degradação do solo e a contaminação da água, deixaram lições importantes sobre os limites da intensificação agrícola baseada em insumos químicos. Esses desafios abriram caminho para as novas tecnologias, como a Inteligência Artificial (IA), que surge como uma solução promissora para mitigar os efeitos negativos da Revolução Verde e promover uma agricultura mais sustentável.

A Inteligência Artificial (IA), termo cunhado por Jhon McCarthy, professor da Universidade de Stanford, durante a conferência de Dartmouth em 1956, foi definida como “a ciência e a engenharia de fabricar máquinas inteligentes”. Esse conceito reflete a ambição inicial de McCarthy e seus colegas de desenvolver sistemas capazes de “pensar”, ou seja, realizar tarefas humanas, como resolver problemas, aprender e tomar decisões. Desde então, a Inteligência Artificial (IA) evoluiu consideravelmente, abrangendo subcampos como aprendizado de máquinas e redes neurais artificiais, tornando a Inteligência Artificial (IA) uma ferramenta crucial em diversas indústrias, com destaque para a agricultura, onde ela está transformando a forma como os recursos naturais são geridos, otimizando a produtividade e auxiliando na tomada de decisão. Como destaca um estudo publicado Universidade de Liège (2024), “essa tecnologia está se posicionando como um pilar essencial para o futuro da agricultura sustentável”.

No âmbito da agricultura sustentável, segundo um artigo da *PLOS* (2023), “enquanto a agricultura convencional busca maximizar o rendimento com o uso intensivo de recursos, a agricultura sustentável adota uma

abordagem ecológica, enfatizando a preservação do solo, da água e da biodiversidade para garantir a viabilidade a longo prazo" (DAS, RAY, PANDAY, MISHRA, 2023). O objetivo principal da agricultura sustentável é assegurar às necessidades das gerações sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras satisfazerem suas próprias necessidades (WCED, 1987, p. 43). Neste contexto, a Inteligência Artificial (IA) desempenha um papel central, promovendo eficiência e sustentabilidade na agricultura. A chegada da Agricultura 4.0, com a integração de tecnologias digitais avançadas como Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IOT), inaugura uma nova era na produção agropecuária, onde o equilíbrio entre inovação tecnológica e preservação ambiental é cada vez mais essencial para o futuro.

A Agricultura 4.0, também conhecida como a quarta revolução agrícola, representa uma transformação radical no setor, baseada na incorporação de tecnologias digitais em todas as fases da produção agrícola, desde o plantio até a colheita. Como observado por Yang (2007), "esta tecnologia melhorou o desenvolvimento agrícola e o monitoramento; colheita; processamento e comercialização em tempo real". A Agricultura 4.0 fundamenta-se nos princípios da agricultura de precisão, utilizando sensores, drones e algoritmos de Inteligência Artificial (IA) para coletar e processar grandes quantidades de dados sobre o solo, as culturas e as condições climáticas. Segundo Capelli (1996), esse modelo inovador apresenta as vantagens de possibilitar um melhor conhecimento do campo de produção, permitindo, desta forma à tomada de decisão melhor embasada, otimizando o uso de recursos e reduzindo custos e impactos ambientais.

Além disso, a Inteligência Artificial (IA) tem um papel central na detecção e gestão de ameaças, como doenças, pragas e espécies invasoras. Estudos recentes, como o de Hasseb (2024), demonstram que a Inteligência Artificial (IA) pode melhorar a velocidade e a precisão na detecção, monitoramento e gestão de influências, ajudando a mitigar o impacto de espécies invasoras e contribuindo para a segurança alimentar. A capacidade de análise em tempo real permite a identificação precoce de ameaças e a implementação de soluções sustentáveis e eficazes. A adoção dessa tecnologia no setor agrícola tem contribuído para a redução dos custos operacionais e o aumento da produtividade, ao potencializar o uso de insumos com maior precisão e menor degradação ecológica.

2.5 Inteligência Artificial Aplicada ao Tratamento de Resíduos da Cafeicultura:

O café é uma das principais commodities agrícolas do mundo e é consumido diariamente por milhões de pessoas (NOVAIS, 2023). Além de seu valor econômico, o café desempenha um papel importante na cultura e nos hábitos de inúmeras sociedades, como o Brasil, maior produtor mundial. Contudo, o aumento na demanda por café gera preocupações ambientais significativas, especialmente relacionadas à gestão e descarte de resíduos. Segundo Silva (2020), para cada quilo de café produzido, são gerados cerca de 0,91 kg de resíduos sólidos e aproximadamente 2,3 litros de resíduos líquidos, provenientes da água usada no processamento dos grãos, muitas vezes carregada de matéria orgânica e outros poluentes. Diante disso, a busca por

soluções sustentáveis é fundamental para mitigar os impactos ambientais associados à produção de café.

Neste contexto, a integração de tecnologias emergentes, como Inteligência Artificial (IA) e a Internet das Coisas (IoT), tem se mostrado promissora na gestão dos resíduos de café, permitindo a otimização de processos de reciclagem e a descoberta de novos usos para esses materiais (COSTA, 2022). A Internet das Coisas (IoT) tem um papel crucial ao integrar sensores inteligentes, análise de dados em tempo real e automação no tratamento de resíduos sólidos e líquidos da produção de café. Segundo Ocampo e Haddad (2020), “a IoT oferece um sistema interconectado de sensores que permite o monitoramento contínuo das variáveis críticas no tratamento de resíduos, promovendo o uso eficiente de recursos e a redução de desperdícios”.

Esses sensores podem monitorar parâmetros como temperatura e umidade em processos de compostagem inteligente, otimizando a decomposição dos resíduos sólidos, como borras e cascas de café. Além disso, a Internet das Coisas (IoT) permite realizar uma análise detalhada da qualidade dos resíduos, ativando automaticamente processos de conversão em bioenergia. Segundo Marino e Garcia (2021), a integração de sensores IoT em processos de compostagem e biodigestão aumenta a precisão no controle das condições de produção de biogás e biofertilizantes. Isso não apenas melhora o aproveitamento de resíduos, mas também assegura a rastreabilidade completa, monitorando todo o ciclo de vida dos resíduos, desde a origem até o destino final, proporcionando transparência e eficiência ao processo.

Em relação aos resíduos líquidos, como as águas residuais do processamento do café, a Internet das Coisas (IoT) oferece soluções robustas para o monitoramento em tempo real de parâmetros críticos, como pH, teor de resíduos orgânicos e a presença de substâncias tóxicas. Os sensores conectados à IoT podem detectar rapidamente a qualidade da água e ativar sistemas de filtragem ou purificação de forma automática, garantindo a reutilização segura da água no processo produtivo (ZHANG, 2019). Esse nível de automação melhora a eficiência no uso dos recursos hídricos, reduz os custos operacionais e minimiza significativamente os impactos ambientais associados ao tratamento inadequado de efluentes.

A combinação de Internet das Coisas (IoT) e visão computacional proporciona uma infraestrutura capaz de otimizar processos de tratamento de resíduos (BELLO & ZEADALLY, 2016). A visão computacional usa câmaras e algoritmos de Inteligência Artificial (IA) para identificar e classificar automaticamente resíduos sólidos e líquidos, melhorando significativamente a precisão da separação e do direcionamento para o tratamento adequado (SILVA & COSTA, 2020). Através da análise de características visuais, como forma, textura e nível de contaminação, a visão computacional garante uma separação precisa dos resíduos, acelerando o processamento e reduzindo os custos operacionais, além de diminuir a margem de erro humano.

Outra aplicação relevante da Inteligência Artificial (IA) no setor da produção de café está na extração de compostos valiosos, como antioxidantes e polifenóis, que podem ser reaproveitados em indústrias alimentícias, farmacêuticas e cosméticas. O uso de técnicas de *deep learning* permite otimizar a extração de compostos bioativos ao simular cenários de degradação, possibilitando a obtenção de melhores resultados com menor impacto

ambiental (OLIVEIRA & SANTOS, 2021). Ao transformar subprodutos em ingredientes valiosos, a Inteligência Artificial (IA) contribui para a economia circular, gerando novas fontes de receita e diminuindo os impactos ambientais da produção de café. Este reaproveitamento de subprodutos não só diminui o desperdício, como também fomenta a economia mais sustentável, transformando resíduos em novos produtos de valor acrescentado.

Em suma, a utilização de tecnologias emergentes como a Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT) e Visão computacional na gestão de resíduos da cafeicultura proporciona uma abordagem eficiente e inovadora, promovendo a sustentabilidade e potencializando o reaproveitamento de subprodutos. Essas soluções tecnológicas melhoram a eficiência e eficácia dos processos e, também, contribui para a redução das degradações ecológicas e o desenvolvimento de uma economia circular ecológica.

3. METODOLOGIA

O tipo de pesquisa trabalhada, na primeira parte deste trabalho, foi de natureza bibliográfica, com o propósito de trazer robustez ao texto e aprofundar o conhecimento sobre o tema proposto. Essa etapa foi conduzida por meio de uma apuração de artigos científicos disponíveis no meio acadêmico, escolhidos com base em sua relevância e contribuição teórica. Segundo Macedo (1994, p.13), a investigação bibliográfica trata-se do primeiro passo em qualquer tipo de pesquisa científica, com o fim de revisar a literatura existente e não redundar o tema de estudo ou experiência.

Na segunda etapa, a metodologia foi desenvolvida com base em uma pesquisa descritiva de abordagem qualitativa, complementada por um estudo de caso único. Segundo Gil (2009), a pesquisa descritiva tem como principal objetivo descrever as características de um fenômeno, de uma população ou de relações entre variáveis, além de oferecer novas perspectivas sobre a realidade investigada. Este método foi selecionado por sua capacidade de captar nuances do contexto estudado e aprofundar a compreensão dos aspectos analisados.

A coleta de dados ocorreu por meio de entrevistas semiestruturadas, associadas às técnicas da história oral. Esse formato permitiu combinar um roteiro previamente definido com a flexibilidade necessária para explorar questões emergentes durante as interações com o participante, proporcionando maior profundidade na análise. Segundo Bertucci (2009), ressalta que as entrevistas semiestruturadas oferecem riqueza investigativa ao adaptar as perguntas às respostas e ao contexto do entrevistado, o que enriquece o material coletado.

Neste estudo, o participante foi um agricultor rural atuante no setor cafeeiro, cuja entrevista teve como objetivo compreender sua percepção sobre ações ambientais adotadas no setor agrícola. O conteúdo da entrevista foi gravado, preservando a fidelidade ao relato original. Contudo, na redação dos resultados, optou-se por narrar as falas em terceira pessoa do singular, de forma a adaptar o discurso às normas acadêmicas e garantir maior coesão textual, conforme recomendado em pesquisas qualitativas (MINAYO, 2009). Segundo Flick (2009), a adaptação da fala do entrevistado para a terceira pessoa na análise qualitativa é uma prática comum, pois contribui para a

sistematização dos dados e para a construção de um texto narrativo coeso, ao mesmo tempo em que preserva a integridade e a autenticidade do relato.

A unidade de análise selecionada foi à cidade de Chalé, localizada na região da Vertente Ocidental do Caparaó, no estado de Minas Gerais. Com uma população de estimada em 6.075 habitantes (IBGE, 2022), Chalé destaca-se por sua economia baseada no setor de serviço e agropecuária. A escolha do município justifica-se pela relevância econômica da região e pela representatividade das práticas empresariais locais no contexto investigado.

Por fim, a análise qualitativa dos dados possibilitou uma compreensão aprofundada do cenário estudado e gerou contribuições relevantes para o aprimoramento ou implementação de práticas de gestão ecoeficiente, alinhando a teoria à prática observada no contexto analisado.

3.1 Estudo de Caso Único:

O agricultor está há 40 anos no mercado de Chalé (MG) e região, atuando no setor cafeeiro, com produção de café e fabricação de sementes. Visando produzir um produto de qualidade sem agredir o meio ambiente, o cafeeiro investe em infraestrutura e inovações tecnológicas sustentáveis, seguindo as leis e regulamentos ambientais.

Em seguimento a uma entrevista semiestruturada, obteve-se as seguintes indagações sobre a temática, onde “P” refere-se às indagações formuladas e “R” corresponde às informações obtidas a partir das respostas do entrevistado.

P: Em qual setor o senhor atua e há quanto tempo dedica-se à produção agrícola de mudas e sementes de café? Quais fatores o influenciaram a tornar-se produtor, e quantas pessoas atualmente colaboram na gestão administrativa do seu negócio?

R: O produtor rural está presente há 40 anos no setor cafeeiro – 17 anos fabricando mudas e 23 anos produzindo sementes - dedicando-se à produção de café fino e especial para cafeterias. O espírito visionário e empreendedor manifestado pelo agricultor é uma característica sanguínea, visto que seu pai foi o primeiro cultivador a confeccionar café de bebida dura na região, ou seja, grão de relevante qualidade no mercado que após a torrefação apresenta intensa e encorpada bebida, ao longo da década de 80. A administração do negócio é feita em conjunto com seu irmão e o auxílio de 3 colaboradores.

P: Onde está localizado o viveiro de café, quais espécies de café são fabricadas nele, qual a quantidade de mudas é produzida e qual o processo de produção das mudas?

R: O agricultor é conhecido na região pela excelente categoria da muda de café, que apresenta uma elevada resistência ao ataque de pragas, baixo percentual de perda – de 5 mil mudas plantadas a probabilidade de falha é inferior a 40 pés de café - e alto nível de produtividade. Situado na cidade de Chalé (MG), os principais grãos produzidos no viveiro são da espécie Arábica e Catucaí Amarelo, sendo que o último é o carro-chefe das vendas devido à sua peculiaridade quanto à resistência à

doença, compacidade da semente e qualidade da bebida. O processo de fabricação das mudas conta com a participação de 20 funcionários temporários alocados para encher sacolinha, plantar a semente, podar e distribuir as 800 mil plantas nos municípios. O viveiro possui certificado e segue legislação, isto é, realiza análise da macrolídeo para verificar se o produto contém alguma doença. É importante ressaltar que, o produtor utiliza matéria orgânica (esterco de boi) e fertilizante na fabricação das mudas de café.

A descrição enfatiza a aplicação de boas práticas na produção agrícola, como o uso de matéria orgânica e o cumprimento da legislação, que são pilares da agricultura sustentável. A resistência das mudas e o baixo índice de perda refletem os princípios defendidos por Parreiras Pereira (2017), que argumenta que a sustentabilidade reduz riscos e aumenta a qualidade do produto (ABIC, 2017). Adicionalmente, a ênfase na qualidade das mudas e no controle de doenças dialoga com o foco na preservação do solo e na biodiversidade destacado por Das, Ray, Panday, Mishra (2023). A certificação do viveiro e os cuidados sanitários também apontam para uma abordagem ecologicamente responsável, alinhada ao conceito de preservação do capital natural defendido pela Foundation (2013) no contexto da economia circular.

P: Em relação à produção de grãos de café para bebida, onde está localizado o sítio e quais espécies de plantas são cultivadas na área e qual o processo adotado na produção dos grãos?

R: O sítio Santa Rita, localizado no município de São Luiz (MG), possui uma área de 28 hectares destinada à produção de cafés finos e especiais de alta categoria com o emprego de técnicas modernas. A propriedade se destaca pelo cultivo do café Arara, Catucaí Amarelo (24/137 e 2SL) e Vermelho, favorecidos pelo clima favorável, fertilização e o bom cuidado do solo. Todo o processo da preparação de café é executado dentro do mais rigoroso padrão de qualidade e cumprindo a legislação ambiental, visto que, a missão do agricultor é produzir um produto de qualidade sem agredir o meio ambiente, visando alcançar o selo verde de certificação do Net Zero, no qual está concorrendo. Anualmente, o elevado investimento realizado pelo empreendedor na infraestrutura da herdade, desperta a curiosidade de grandes companhias internacionais, como Louis Dreyfus Company, Atlântica, Aoran e entre outras, que já visitaram o local. “As empresas do exterior estão interessadas em olhar a sustentabilidade do processo produtivo aplicado pelo produtor, isto é, a responsabilidade que ele tem com o ambiente”, afirma o agricultor.

A atratividade do sítio para empresas estrangeiras, como mencionado, evidencia como práticas sustentáveis promovem não apenas a conservação ambiental, mas também fortalecem a competitividade econômica, conforme apontado por Pearson (2011). A busca pelo selo verde Net Zero, alinhada à preservação do ambiente, remete à análise de Geissdoerfer (2017), que destaca como a redução de resíduos e a eficiência de recursos geram inovação e vantagens econômicas. A atenção às exigências ambientais

também dialoga com Ottman (1994) e Alves (2011), que enfatizam a importância de atender consumidores ecologicamente conscientes e de adotar práticas empresariais éticas.

P: Como é realizado o processo produtivo dos grãos de café, a colheita é feita de maneira manual ou mecanizada, e quantas pessoas são empregadas durante o período de colheita?

R: Atualmente, a colheita de café é feita de maneira mecanizada com o auxílio de 20 a 30 empregados provisórios para coletar os 110 mil pés de café do sítio. O despoldador usado para separar as cascas dos grãos de café tem um filtro de purificação para reaproveitar a água no próprio sistema de lavagem, porém, toda água do procedimento é despejada em um poço de decanto (calçado e gramado por dentro e ao redor) que fica a 50 metros do córrego para não escorrer resquícios. Além disso, o reservatório possui uma caixa de 9 litros por baixo para armazenar a água suja dos resíduos que, depois de cheia, é bombeada para outro poço com intuito de evitar transbordo e vazamento para o córrego. Em julho, 30 dias após o término da colheita, a água do poço terá evaporado e um trator irá realizar a limpeza, em outras palavras, retira os sobejos da casca de café.

P: Qual é o destino dado aos resíduos de café, como são armazenados os agrotóxicos e pesticidas, e a propriedade possui sistema de captação de água da chuva?

R: A casca da semente é descarregada no terreiro de pedra para enxugar a água e, posteriormente, é mesclado com a cinza do secador de café e o pó de serra a fim de servir de nutriente para o solo. O cultivador acredita que a adubação feita com estes nutrientes ajuda a planta a crescer saudável e resistente a doenças, contribuindo, assim, para a redução dos custos com agrotóxico e elevação da qualidade/quantidade do café. Vale ressaltar que, a propriedade contém depósito agroquímico para guardar os produtos e um sistema de captação d'água da chuva para pulverizar a lavoura. Segundo o produtor, "o agricultor precisa pesquisar, investir em novas tecnologias, inovar o processo de produção e, principalmente, respeita as normas do meio ambiente, pois aquele que cuidar do ambiente terá um ganho maior".

O reaproveitamento de resíduos agrícolas é uma prática que exemplifica o conceito de economia circular, conforme discutido pela Foundation (2013), ao otimizar recursos e reduzir desperdícios. Essa abordagem também reflete os princípios de eficiência de recursos e minimização do impacto ambiental mencionados por Geissdoerfer (2017). A declaração do agricultor sobre a necessidade de pesquisa e inovação está alinhada ao argumento de Parreiras Pereira (2017) de que a aplicação de conhecimento científico resulta em produtos de maior qualidade e menor risco.

P: O senhor conhece ou já ouviu falar no conceito gestão ecoeficiente, acredita que essa prática pode trazer vantagens para a cafeicultura e qual

investimento pretende realizar a mais na propriedade com foco em sustentabilidade?

R: O agricultor tem conhecimento sobre os conceitos de produção ecoeficiência aplicada no processo de fabricação dos grãos de café, uma vez que a missão do proprietário é produzir um produto de qualidade sem agredir o meio ambiente. Este acredita que as adoções das práticas sustentáveis são essenciais para agregar valor à saca de café e melhorar a imagem do negócio diante do mercado internacional, visto que as instituições estrangeiras observam o cuidado que o produtor tem com o ecossistema ao redor. O cafeicultor revelou que investiu em 70 placas de energia solar com intuito de reduzir o consumo de energia do despulpador e secador de café que possui 20 motores, contribuindo, assim, para a geração de 40 mil kW por ano. Além disso, deseja instalar um filtro de fumaça no secador para minimizar 90% da emissão de gases nocivos na atmosfera, visando conseguir o selo verde.

4. DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) NA CAFEICULTURA:

A aplicação da Inteligência Artificial (IA) na agricultura tem o potencial de transformar a cafeicultura, promovendo maior eficiência e sustentabilidade ao longo da cadeia de produção dos grãos de café. Como observado por Romeiro (1998), o setor agrícola é um campo propício para integrar a sustentabilidade ecológica com o crescimento econômico socialmente desejável. No entanto, o setor enfrenta desafios significativos, especialmente entre pequenos produtores rurais e em países em desenvolvimento, onde a infraestrutura tecnológica é insuficiente ou inexistente. Nessas regiões, muitas vezes há limitações de infraestrutura, restrições financeiras e falta de conhecimento técnico, dificultando a introdução de ferramentas de Inteligência Artificial (IA) (KAUSHAL & YADAV, 2022). Pequenos agricultores, geralmente localizados em áreas remotas, enfrentam dificuldades relacionadas à conectividade e o uso de dispositivos modernos que suportem a Inteligência Artificial (IA), como sensores e drones. Para que soluções baseadas em Inteligência Artificial (IA) sejam eficazes, é necessário um ambiente com conectividade adequada, especialmente em áreas rurais que frequentemente sofrem com a falta de cobertura de internet de alta velocidade (BORBA, 2022).

Além disso, a adoção de técnicas de produção mais limpa e sustentável com o uso de Inteligência Artificial (IA) depende da regulamentação governamental, visto que o desenvolvimento de novos processos pode demandar, inicialmente, maiores recursos (ROMEIRO, 1994). A falta de crédito e a escassez de políticas de incentivo para a modernização do setor agrícola em diversos países produtores de café são obstáculos frequentes para investimentos, impactando o crescimento da produtividade (SOUSA & OTTAVIANO, 2018). Para Costa Borda (2022), pequenos produtores ainda enfrentam dificuldades para justificar o custo-benefício de implementar Inteligência Artificial (IA), principalmente em um setor onde os sobre o investimento podem demorar a se materializar. Outro obstáculo à adoção da Inteligência Artificial (IA) é a capacitação dos agricultores. A utilização de tecnologias avançadas exige habilidades em tecnologias digitais e a

capacitação para interpretar dados complexos. Segundo Jornal da Faculdade de Professores de *Anqing* (2013), a educação e o treinamento dos agricultores enfrentam problemas, como a demanda inadequada e supervisão insuficiente de programas e financiamento limitado. Esse desafio é ainda mais acentuado em comunidades rurais com altos índices de analfabetismo funcional, onde a falta de conhecimento técnico dificulta a implementação de novas práticas.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS E INOVAÇÕES POTENCIAIS:

A Inteligência Artificial (IA) tem grande potencial para contribuir para a sustentabilidade na agricultura, promovendo o uso eficiente de água, energia elétrica e insumos. Na cafeicultura, a Inteligência Artificial (IA) pode ser empregada para monitorar o clima, controlar pragas e prever a ocorrência de doenças, além de identificar plantas daninhas (LIAKOS, 2018), reduzindo assim, o uso de agrotóxicos e minimizando o impacto ambiental. Essas práticas promovem uma produção mais sustentável e aumentam o valor do café no mercado, especialmente no cenário internacional, onde o apelo por produtos ecológicos é crescente, o que impulsiona o setor agrícola (SAMPAIO, 2021).

Entre as inovações promissoras está a utilização da Inteligência Artificial (IA) para a gestão de resíduos (sólidos e líquidos), transformando subprodutos do café, como cascas, em biomassa para geração de energia elétrica. Segundo Noman (2022), esses avanços tecnológicos têm o potencial de otimizar a coleta de resíduos, reduzir o impacto ambiental, promover a sustentabilidade e oferecer uma fonte alternativa de renda aos produtores rurais. A Inteligência Artificial também pode auxiliar na identificação de métodos mais eficientes para a transformação de resíduos, como a compostagem otimizada, viabilizando o reaproveitamento de subprodutos de forma econômica.

Para facilitar a implementação de Inteligência Artificial (IA) na cafeicultura, é essencial que haja apoio governamental. Políticas públicas que incentivem a inovação sustentável e a modernização tecnológica, como subsídios para aquisição de tecnologias de Inteligência Artificial (IA), incentivos fiscais para práticas sustentáveis e programas de capacitação, podem acelerar a transformação digital no setor. Segundo Margarido & Beskon (1998), a agricultura sustentável é a abordagem ideal para assentamentos de reforma agrária, justificando políticas públicas voltadas para seu desenvolvimento. Ademais, a criação e o fortalecimento de cooperativas e redes de compartilhamento de tecnologias são estratégias para democratizar o acesso à inovação no campo.

6. CONCLUSÃO:

A análise do estudo de caso do produtor rural evidencia como a implementação de práticas ecoeficientes no tratamento de resíduos, alinhada ao uso de Inteligência Artificial (IA), gera benefícios significativos nos âmbitos ambiental, econômico e tecnológico na cafeicultura.

No eixo ambiental, destaca-se o manejo sustentável de resíduos, como casca de café, cinzas e pó de serra, são reaproveitadas como fertilizantes naturais, contribuindo, assim, para a nutrição do solo e a redução no uso de agrotóxicos. A implementação de sistemas de captação de água da chuva e a utilização de poços de decantação previnem a contaminação ambiental e otimizam o uso dos recursos hídricos. O investimento em energia renovável,

por meio de placas solares, demonstra o compromisso com a redução de emissões e a adoção dos princípios da economia circular, alinhando a produção às demandas globais por práticas sustentáveis.

Na perspectiva econômica, a gestão ecoeficiente proporciona redução de custos operacionais ao minimizar a dependência de fertilizantes químicos e agrotóxicos por intermédio do reaproveitamento de resíduos. Além disso, práticas sustentáveis agregam valor ao produto final, atraindo consumidores que valorizam produtos ambientalmente responsáveis. Esse diferencial competitivo fortalece o posicionamento no mercado, gerando reconhecimento de grandes companhias internacionais e ampliando a aceitação em mercados exigentes.

Por último, mas não menos importante, no aspecto tecnológico, evidencia-se a integração de soluções inovadoras, como sistemas automatizados de gestão de recursos e o potencial do filtro de fumaça, demonstram a importância da inovação para otimizar processos produtivos, aumentar a eficiência e reduzir impactos ambientais. A combinação entre tecnologia e rigoroso controle de qualidade potencializa os resultados produtivos e a sustentabilidade da atividade.

No entanto, há desafios a serem superados, como o alto custo inicial de investimento, a necessidade de capacitação técnica, a resistência cultural à adoção de novas tecnologias e a infraestrutura rural limitada, como acesso instável à internet e energia. Esses fatores podem dificultar a aplicação em larga escala, especialmente para pequenos produtores.

Em síntese, o estudo de caso comprova que a gestão ecoeficiente associada à Inteligência Artificial (IA) fortalece a sustentabilidade e a competitividade da cafeicultura. A Inteligência Artificial (IA) possibilita otimizar processos, tratar resíduos de forma eficiente e ampliar o monitoramento das condições produtivas. Para garantir a adoção em larga escala, é fundamental investir em infraestrutura e na qualificação técnica dos produtores. Conclui-se que a inovação sustentável, impulsionada pela tecnologia, é essencial para o desenvolvimento rural, a preservação ambiental e o posicionamento competitivo dos produtores em um mercado cada vez mais exigente e voltado para práticas sustentáveis.

7. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO:

ALVES, J. L. S. Ecoeficiência como fator de competitividade em micro e pequenas empresas: um estudo de caso no setor de serviços automotivos. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Faculdade de Recife, 2010. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_099_667_13932.pdf. Acesso em: 19 Ago. 2024.

ALVES, R. R. Consumo verde: comportamento do consumidor responsável. Viçosa: UFV, 2011.

ANDRADE, T, E; ESPÍNDOLA, Z, J; HALL, J. Aplicação da Metodologia Produção Mais Limpa (P+L) como Sugestão de Redução de Resíduos Sólidos em Agroindústrias de Café. VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão.

Disponível em: <www.inovarse.org/sites/default/files/T11_0354_1857>. Acesso em: 16 set. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ (ABIC). Café Orgânico, 2017. Disponível em: www.abic.com.br/Cafe/Saude. Acesso em: 16 Set. 2024.

BELLO, O; ZEDADALLY, S. Comunicação Inteligente entre Dispositivos na Internet das Coisas. IN: IEEE Systems Journal, vol. 10, no. 3, p.1172-1182, Sept. 2016, Doi: 10.1109/JSYST.2014.2298837. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6725683>. Acesso em: 20 Set. 2024.

BERTUCCI, J. L. de O. Metodologia básica para elaboração de trabalhos de conclusão de cursos (TCC): ênfase na elaboração de TCC de pós-graduação Lato Sensu. São Paulo: Atlas, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279514535_Metodologia_Basica_para_Elaboracao_de_Trabalhos_de_Conclusao_de_Curso_TCC. Acesso em: 21 Out. 2024.

BESSEN, G. R. Resíduos sólidos: vulnerabilidades e perspectivas. In: SALDIVA P. Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles. São Paulo: Ex Libris, 2010. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002144137>. Acesso em: 17 Set. 2024.

SILVA, M. A.; NEBRA, M. J.; SILVA, M.; SANCHEZ, C. G. THE USE OF BIOMASS RESÍDUOS NA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE CAFÉ SOLÚVEL. Biomassa e Bioenergia, v. 14, p. 457-467, 1998. Acesso em: 18 Set. 2024.

BORBA, M. da C., RAMOS, J. E. S., RAMBORGGER, B. M., MARQUES, E. O, MACHADO, J. A. D (2022). Gestão no meio agrícola com o apoio da Inteligência Artificial: uma análise da digitalização da agricultura. Revista Em Agronegócio e Meio Ambiente, 15(3), 1–22. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2022v15n3e9337>. Acesso em: 23 Set. 2024.

BORÉM, F. M. Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas – Congresso de Engenharia Agrícola. nº27. SBEA. Poços de Caldas - MG. UFLA 1ª ed. p. 282 1998. Acesso em: 16 Set. 2024.

BOZZOLA, M.; CHARLES, S.; FERRETTI, T.; GERAHARI, E.; MANSON, H.; ROSSER, M.; VON DER GOLTZ, P. (2022). O Guia do Café. Genebra: Centro do Comércio Internacional (ITC).

CAPELLI, N. L. Agricultura de precisão - Novas tecnologias para o processo produtivo. LIE/DMAQAG/FEAGRI/UNICAMP, 1999. Disponível em: <http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc>. Acesso em: 23 Set. 2024.

CEBDS. Projeto da rede de ecoeficiência 2005 - 2007. 2005. Disponível em: <http://www.cebds.org.br>. Acesso em: 20 Set. 2024.

COSTA, A. (2022). Gestão de resíduos de café: Tecnologias emergentes e sustentabilidade. *Revista Brasileira de Inovação Agrícola*, 15(3), 45-60. Acesso em: 23 Set. 2024.

DAS, S; RAY, MK; PANDAY, D; MISHRA PK (2023). Papel da biotecnologia na criação de uma agricultura sustentável. *PLOS Sustain Transform* 2(7): e0000069. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000069>. Acesso em: 18 Set. 2024.

DIAS, D. R. Gestão e aproveitamento de resíduos do processamento do café. In: SCHWAN, R. F.; FLEET, G. H. (Org.). *Cocoa and coffee fermentations*. Boca Raton: CRC Taylor & Francis, 2014. Cap. 15, p. 376-382. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b17536-20/management-utilization-wastes-coffee-processing-disney-beiro-di-elson-rodr%C3%ADgu-ez-va-lenci-di-eg-zam-br-fra-nco-ua-ca-os-%C3%B3pez%E9%BAAn-ez>. Acesso em: 25 Ago. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Produção de Café Arábica corresponde a 64% e Café Conilon a 36% da safra total dos Cafés do Brasil em 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/73940564/producao-de-cafe-arabica-corresponde-a-64-e-cafe-conilon-a-36-da-safra-total-dos-cafes-do-brasil-em-2022>. Acesso em: 16 Set. 2024.

FAO. Organização para Alimentação e Agricultura das Nações Unidas. Agricultura global rumo a 2050: fórum de especialistas de alto nível sobre como alimentar o mundo em 2050, 12-13. Outubro de 2009 pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, 2009. Disponível em: <https://reliefweb.int/report/world/global-agriculture-towards-2050-high-level-expert-forum-how-feed-world-2050-12-13-oct>. Acesso em: 18 Set. 2024.

FIELKE, S. J. GARRARD, R. JAKKU, E. FLEMING, A. WISEMAN, L. TAYLOR, B. M. Conceituando o DAIS: Implicações da Digitalização de Sistemas de Inovação Agrícola' na tecnologia e na política em vários níveis. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*. 90, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573521418301532>. Acesso em: 26 Ago. 2024.

FLICK, U. (2009). Introdução à pesquisa qualitativa. Porto Alegre: Artmed, 2009. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/ideias/article/download/8649420/15975/27891>. Acesso em: 16 Dez. 2024.

FOUNDATION, E. M. Rumo à economia circular: Justificativa econômica e empresarial para uma transição acelerada, 2013. Disponível em: <https://emf.thirdlight.com/file/24/xTyQj3oxiYNMO1xTFs9xT5LF3C/Towards%20the%20circular%20economy%20Vol%201%3A%20an%20economic%20and%20business%20rationale%20for%20an%20accelerated%20transition.pdf>. Acesso em: 17 Set. 2024.

GEISSDOERFER, M., SAVAGET, P., BOCKEN, N. M. P., HULTINK, E. J. A Economia Circular – Um novo paradigma de sustentabilidade? Revista de Produção Mais Limpa, 143, 757–768. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>. Acesso em: 17 Set. 2024.

GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS (2018). Ecoeficiência no gerenciamento de resíduos sólidos: Impactos positivos das tecnologias. Disponível em: <https://journalmediacritiques.com/index.php/jmc/article/view/63>. Acesso em: 19 Ago. 2024.

GIL, A. C. Como elaborar Projetos de Pesquisa. 4. Ed. São Paulo: Atlas, 2009. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/mauriciofacanha/ensino-superior/redacao-cientifica/livros/gil-a.-c.-como-elaborar-projetos-de-pesquisa.-sao-paulo-atlas-2002./view>. Acesso em: 16 Dez. 2024.

GRIEVE, B. D. DUCKETT, T. COLLISON, M. BOYD, L. WESTE, J. YIN, H. ARVIN, F. PEARSON, S. Os desafios colocados pelas culturas agrícolas globais no fornecimento de soluções agro robóticas inteligentes: É necessário repensar fundamentalmente. Segurança Alimentar Global. 23, 116- 124, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.04.011>. Acesso em: 26 Ago. 2024.

GONZALEZ, L. F., MONTES, G. A., PUIG, E., JOHNSON, S., MENGERSEN, K., & GASTON, K. J. (2016). Veículos aéreos não tripulados (UAVs) e inteligência artificial revolucionando o monitoramento e a conservação da vida selvagem. Sensors, 16(1), 97. Disponível: https://www.researchgate.net/publication/290625551_Unmanned_Aerial_Vehicles_UAVs_and_Artificial_Intelligence_Revolutionizing_Wildlife_Monitoring_and_Conservation. Acesso em: 18 Set. 2024.

HART, S. L.; MILSTEIN, M. B. Criando valor sustentável. Academia de Executivos de Gestão, v.17, n.2, 2003. Disponível em: <https://www.kuleuven.be/emeritiforum/em/Forumgesprekken/F1617/230217/creating-sustainable-value-stuart-l-hart-and-mark.pdf>. Acesso em 21 Out. 2024.

KAUSHAL, V. AND YADAV, R. O papel dos chatbots nas bibliotecas acadêmicas: uma perspectiva baseada na experiência. Jornal da Associação Australiana de Bibliotecas e Informações, 71(3): 215-232, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362622457_The_Role_of_Chatbots_in_Academic_Libraries_An_Experience-based_Perspective. Acesso em: 18 Set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2022. Cidades e Estados, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/chale.html>. Acesso em: 16 Dez. 2024.

LAZZARI, F.; SOUZA, A. Revolução verde: impactos sobre os conhecimentos tradicionais. Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2017. Acesso em: 18 Set. 2024.

LIAKOS,K.;BUSATO,P.;MOSHOU,D.;PEARSON,S.;BOCHTIS, D. Aprendizagem na agricultura: uma revisão. Sensores, v. 18, n. 8, p.2674,2018. Doi: 10.3390/s18082674. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2674>. Acesso em: 21 Out. 2024.

MACEDO, N. D. Iniciação à pesquisa bibliográfica: guia do estudante para a fundamentação do trabalho de pesquisa. São Paulo, SP: Edições Loyola,1994. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000888014>. Acesso em: 21 Out. 2024.

MARGARIDO, L. A. C.; BESKOW, P. R. Agricultura ecológica para o desenvolvimento sustentável. Informações Econômicas, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 39 - 43. fev. 1998. Acesso em: 26 Out. 2024.

MARINO, J. E GARCIA, P. (2021). Compostagem e biodigestão inteligentes através da integração IoT. Jornal de Energia Renovável, 19(1), 33-49. Acesso em: 23 Set. 2024.

MINAYO, M. C. DE S. (2009). O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde. São Paulo: Hucitec. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/FgpDFKSpjsybVGMj4QK6Ssv/>. Acesso em: 16 Dez. 2024.

MIRANDA, J. PONCE, P. MOLINA, A. WRIGHT, P. Tecnologias sensíveis, inteligentes e sustentáveis para o Agroalimentar 4.0. Computadores na Indústria. 108, 21-36, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.02.002>. Acesso em: 26 Ago. 2024.

MUANGPRATHUB, J. BOONNAM, N. KAJORNKASIRAT, S. LEKBANGPONG, N. WANICH-SOMBAT, A. NILLAOR, P. Análise de dados agrícolas e de IoT para fazendas inteligentes. Computadores e Eletrônicos na Agricultura. 156, 467–474, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.011>. Acesso em: 26 Ago. 2024.

MUSSATO, S. I, MACHADO, E. M., MARTINS, S., TEIXEIRA, J.A., 2011. Produção, composição e aplicação do café e seus resíduos industriais. Tecnologia de Alimentos e Bioprocessos, 4 (5), 661-672. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-011-0565-z>. Acesso em: 16 Set. 2024.

NAÑEZ ALONSO, S. L.; REIER FORRADELLAS, R. F.; PI MORELL, O; JORGE-VAZQUEZ, J. Digitalização, Economia Circular e Sustentabilidade Ambiental: A Aplicação da Inteligência Artificial na Autogestão Eficiente de Resíduos. Sustainability 2021, 13, 2092. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13042092>. Acesso em: 27 Ago. 2024.

NAWANDAR, N. K. SATPUTE, V. R. Módulo inteligente e de baixo custo baseado em IoT para sistema de irrigação inteligente. Computadores e Eletrônicos na Agricultura. 162, 979-990, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334143691_IoT_based_low_cost_and_intelligent_module_for_smart_irrigation_system. Acesso em: 26 Ago. 2024.

NOMAN, A., AKTER, U., PRANTO, T., & HAQUE, A. (2022). Aprendizado de máquina e inteligência artificial na economia circular: uma análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura. Anais de Tecnologias Emergentes em Computação, 6(2), 13-40. Disponível em: <https://doi.org/10.33166/aetic.2022.02.002>. Acesso em: 21 Out. 2024.

NOVAIS, W. P. S. A Financeirização do Agronegócio do Café no Brasil: A Trama do Capital Fictício na Produção Capitalista do Espaço. 2023. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Paraíba, Faculdade de João Pessoa (PB), 2023. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/29912/1/WeldonPereiraSilvaDeNovais_Tese.pdf. Acesso em: 16 Dez. 2024

OCAMPO, L., & HADDAD, J. (2020). Aplicações IoT na gestão de resíduos: foco em sistemas de produção de café. Jornal de Ciência e Tecnologia Ambiental, 12(2), 89-105. Acesso em: 23 Set. 2024.

OLIVEIRA, M., & SANTOS, L. (2021). Aplicações de aprendizagem profunda na extração de compostos bioativos de resíduos agrícolas. Revista de Economia BioCircular, 9(1), 70-80. Acesso em: 28 Set. 2024.

OTTMAN, Jaquelin A. Marketing verde: desafios e oportunidades para nova era do marketing. São Paulo: Makron Books, 1994.

OZDOGAN, B. GACAR, A. AKTAS, H. Práticas de agricultura digital no contexto da agricultura 4.0. Revista de Economia, Finanças e Contabilidade. (JEFA). 4, 184-191, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.17261/Pressacademia.2017.448>. Acesso em: 26 Ago. 2024.

PEREIRA, Sérgio Parreiras. Produção de café sustentável: aplicação do conhecimento científico na redução de riscos e aumento da qualidade do produto. Revista Brasileira de Café e Cultura, 2017. Disponível em: <https://revistacafeicultura.com.br/artigo-certificacao-de-cafes-sustentaveis/>. Acesso em: 16 Set. 2024.

PERSON, Academia. Gestão Ambiental. São Paulo: Editoração eletrônica e diagramação: Globaltec Artes Gráficas Ltda. Câmara Brasileira do Livro, 2011 Acesso em: 17 Set. 2024.

PIVOTO, D. BARHAM, B. WAQUIL, P. D. FOGUESATTO, C. R. ZHANG, D. TALAMINI, E. Fatores que influenciam a adoção da agricultura inteligente pelos produtores de grãos brasileiros. Revisão Internacional de Gestão de Alimentos e Agronegócios. 22, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.22434/IFAMR2018.0086>. Acesso em: 26 Ago. 2024.

QUIROZ, I. A., ALFÉREZ, G. H. Reconhecimento de imagem de mirtilos legados em uma fazenda inteligente chilena por meio de aprendizagem profunda. *Computadores e Eletrônica na Agricultura*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105044>. Acesso em: 26 Ago. 2024.

ROMEIRO, A. R. Mecanismos indutores de progresso técnico na agricultura: elementos de uma abordagem evolucionária. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, Brasília, v. 11, n. 1/3, p. 32 – 57, 1994. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/9025>. Acesso em: 19 Out. 2024.

ROMEIRO, A. R. Meio ambiente e dinâmica de inovações na agricultura. São Paulo: Annablume/FAPESP. 1998. 277p. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=113023&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22ROMEIRO,%20A.%20R.%22&qFacets=autoria:%22ROMEIRO,%20A.%20R.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>. Acesso em: 19 Out. 2024.

SAMPAIO, R. M., & FREDO, C. E. (2021). Características socioeconômicas e tecnologias na agricultura: um estudo da produção paulista de amendoim a partir do Levantamento das Unidades de Produção Agropecuária (LUPA) 2016/17. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 59(4), e236538. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.236538>. Acesso em: 21 Out. 2024.

SILVA, F., & COSTA, R. (2020). IA baseada em visão para classificação de resíduos na produção de café. *Diário de Aprendizado de Máquina Aplicado*, 5(3), 110-125. Acesso em: 23 Set. 2024.

SOUSA, F. L; OTTAVIANO, G. I. P. Aliviando as Restrições de Crédito em Países Emergentes: O Impacto dos Financiamentos do BNDES na Produtividade das Firms Industriais Brasileiras. *BNDES – O Banco Nacional do Desenvolvimento*, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15520>. Acesso em: 26 Set. 2024.

TACHIZAWA, T. Gestão Ambiental e responsabilidade social corporativa: estratégias de negócios focadas na realidade brasileira. São Paulo: Atlas, 2002. Acesso em: 26 Ago. 2024.

TALAVIYA, T. et al. Implementação de inteligência artificial na agricultura para otimização de irrigação e aplicação de pesticidas e herbicidas. *Inteligência Artificial na Agricultura*, v. 4, p. 58-73, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340869105_Implementation_of_artificial_intelligence_in_agriculture_for_optimisation_of_irrigation_and_application_of_pesticides_and_herbicides. Acesso em: 19 Ago. 2024

UNIVERSIDADE DE LIÈGE. Inteligência artificial avançada: uma revolução para a agricultura sustentável. *ScienceDaily*. ScienceDaily, 18 Jun.

2024. Disponível em:
www.sciencedaily.com/releases/2024/06/240618115419.htm. Acesso em: 18 Set. 2024.

WBCSD – World Bussines Council for Sustainable Development, 1996.
Disponível em: <https://www.wbcsd.org/>. Acesso em: 20 Set. 2024

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). Nosso Futuro Comum. Oxford: Imprensa da Universidade de Oxford, 1987. Acesso em: 18 Set. 2024.

YANG,H.; LIUSHENG, W.;HONGLIJUNMIN, X. Redes de sensores sem fio para agricultura irrigada intensiva, comunicações de consumo e conferência de redes, 2007. CCNC 2007. 4th IEEE,p.197-201. Las Vegas, Nevada. Jan. 2007. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4199134>. Acesso em: 19 set. 2024.

ZHAI, Z. MARTÍNEZ, J. F. BELTRAN, V. MARTÍNEZ, N. L. Sistemas de apoio à decisão para a agricultura 4.0: Levantamento e desafios. Computadores e Eletrônica na Agricultura, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>. Acesso em: 26 Ago. 2024.

ZHANG, T. (2019). Tratamento de água baseado em IoT na gestão de resíduos agrícolas. Relatórios de Sustentabilidade, 7(2), 12-23.