

**“DO CAMPO À RODA”: A CADEIA DE VALOR DO ETANOL NO MERCADO DE CARBONO BRASILEIRO**

**PEDRO FORTI**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP)

**LUCAS DA SILVA NICOLETI**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP)

# **“DO CAMPO À RODA”: A CADEIA DE VALOR DO ETANOL NO MERCADO DE CARBONO BRASILEIRO**

## **1. INTRODUÇÃO**

O etanol de cana-de-açúcar é um biocombustível importante no Brasil, com potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor de transportes. No entanto, a produção de etanol também pode ter impactos ambientais negativos, como emissões de GEE, perda de biodiversidade e degradação do solo. O financiamento de carbono surge como uma ferramenta promissora para reduzir esses impactos e promover a transição para uma economia de baixo carbono na cadeia de suprimentos do etanol.

O objetivo deste relatório é analisar a cadeia de valor do etanol de cana-de-açúcar no Brasil em relação às emissões de GEE e fontes de financiamento. Pretendemos através dele: i) Descrever as práticas agrícolas sustentáveis e as técnicas de produção de etanol que minimizam o impacto ambiental; ii) Discutir os desafios e oportunidades da integração do financiamento de carbono na cadeia de valor e iii) Analisar casos relevantes de projetos de financiamento de carbono na cadeia do etanol.

O relatório é organizado da seguinte forma: O Referencial Teórico aborda as práticas agrícolas sustentáveis e as técnicas de produção de etanol que minimizam o impacto ambiental, além da integração do etanol na matriz energética de transportes urbanos. Em seguida, a Produção Técnica destaca a integração do financiamento de carbono na cadeia de suprimentos, trazendo ainda estudos de caso e exemplos relevantes de projetos de financiamento de carbono na cadeia do etanol. Por último, serão discutidos desafios e oportunidades na utilização do financiamento de carbono, propondo estratégias para superar os desafios e maximizar os benefícios.

A pesquisa para este relatório foi realizada através de uma revisão abrangente da literatura científica, relatórios técnicos e publicações de órgãos governamentais e organizações internacionais. Também foram coletadas informações de entrevistas com especialistas e representantes da indústria. Com isso, este relatório pretende fornecer uma visão abrangente da integração do financiamento de carbono na cadeia de valor do etanol de cana-de-açúcar no Brasil, agregando valor para tomadores de decisão, pesquisadores e outros interessados em promover a produção sustentável de etanol e a mitigação das mudanças climáticas.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Do campo ao tanque: Práticas Agrícolas e Produção de Etanol**

O cultivo de cana-de-açúcar no Brasil evoluiu desde os primeiros séculos de colonização, inicialmente voltado para a produção de açúcar, para se tornar um componente estratégico da

matriz energética nacional a partir da década de 1970. Durante este século, a área plantada praticamente dobrou, ultrapassando 10 milhões de hectares (IBGE, 2022), com um aumento de produtividade de cerca de 14%, alcançando aproximadamente 724 milhões de toneladas anuais (CONAB, 2020). São Paulo lidera como o maior estado produtor, contribuindo com 54% da produção total, seguido por Goiás (13%) e Minas Gerais (11%) (IBGE, 2022).

Essa expansão ocorreu principalmente em áreas anteriormente ocupadas por pastagens. *Hernandes et al. (2020)* mostram que há potencial para expandir a área cultivada em até 33,7 milhões de hectares na região centro-sul, sendo 20 milhões de hectares atualmente utilizados como pastagens e 13,7 milhões de hectares para culturas anuais. Quanto aos impactos ambientais, a conversão de vegetação de Cerrado, pastagens produtivas ou culturas perenes em cultivos de cana-de-açúcar pode reduzir o estoque de carbono no solo. *Mello et al. (2014)* indicam que o tempo médio de "payback" em relação ao estoque de carbono no solo é de 8 anos para áreas de Cerrado e de 2 a 3 anos para pastagens produtivas. Contudo, a conversão de pastagens degradadas em culturas de cana-de-açúcar pode reduzir esse período e, com práticas de cultivo sustentável, aumentar o estoque de carbono no solo através da alta produção de biomassa (*Cherubin et al., 2021*).

Nos últimos anos, houve mudanças significativas no sistema de produção de cana-de-açúcar, com cerca de 94% das áreas de plantio de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil tendo transitado da colheita manual de cana queimada para um sistema mecanizado verde, mantendo grandes quantidades de palha de colheita nos campos. A palha representa um terço do potencial energético da cultura da cana-de-açúcar e é um recurso valioso para a bioenergia (etanol celulósico, eletricidade e outros bioprodutos), cuja gestão eficiente no campo é essencial para maximizar seus benefícios agronômicos e de saúde do solo (*Silva et al., 2021*).

No entanto, a produção intensiva de cana-de-açúcar ainda enfrenta desafios ambientais como a perda do carbono estocado no solo após operações de preparo para replantio (*Barbosa et al., 2019*), além de compactação do solo, erosão, empobrecimento nutricional, aumento do uso de fertilizantes químicos, contaminação do solo e da água, eutrofização, alto consumo de água e poluição atmosférica devido à queima da palha, etc. (*Ogura et al., 2022*). Para enfrentar esses desafios, é crucial adotar práticas sustentáveis, que reduzem a perturbação do solo, promovendo maior ciclagem de nutrientes, atividade biológica, proteção contra erosão e sequestro de carbono no solo (*Cherubin et al., 2021*).

Um exemplo de prática bastante promissora é a rotação de culturas, que interrompe o ciclo monocultor e melhora a saúde do solo. Embora a cana-de-açúcar seja uma cultura semi-perene que dificulta a rotação anual, a introdução de leguminosas como adubos verdes durante o replantio pode proporcionar melhorias significativas, como a fixação de nitrogênio, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados e as emissões de óxido nitroso e lixiviação de nitrato, além de melhorias na saúde do solo, controle da erosão e outros benefícios ao sistema solo-planta (*Park et al., 2010*).

O uso eficiente de fertilizantes é essencial para o balanço energético das emissões de gases de efeito estufa na produção de etanol de cana-de-açúcar. *Bordonal et al. (2018)* destacam que os

fertilizantes podem responder por até metade das emissões de gases de efeito estufa, especialmente do óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). A gestão adequada da vinhaça, um resíduo líquido da produção de etanol, e a aplicação estratégica de fertilizantes são práticas desejáveis para reduzir essas emissões e manter um balanço favorável de gases de efeito estufa na produção de biocombustíveis (Lourenço et al., 2019). Devido à diversidade de condições agroclimáticas em que a cana-de-açúcar é cultivada, são desenvolvidas técnicas específicas para fertilização do solo e promoção do crescimento vegetal através da biomassa. As interações complexas entre os nutrientes sugerem evitar quantidades excessivas ou insuficientes de macro e micronutrientes, que podem promover o acamamento, ataques de pragas e impactos ambientais adversos (Bhatt et al., 2020).

Em termos de balanço energético das operações com máquinas em campo, a produção de etanol de cana-de-açúcar demonstra um impacto positivo significativo comparado ao uso de combustíveis fósseis. Mesmo em sistemas convencionais menos eficientes, como aqueles com ciclo de seis anos, aração e subsolagem, adubação padrão, controle de pragas, plantio em toletes, colheita manual após queima e transporte de cana e insumos por veículos a diesel, a produtividade média anual pode alcançar 6.510 L/ha, com um potencial de geração energética de 139.639 MJ/ha, equivalente a 11 vezes a energia fóssil investida (Soares et al., 2009).

No geral, Figueiredo et al. (2010) estimaram a pegada de carbono (CFP) da produção canavieira de açúcar no sudeste do Brasil em aproximadamente 241 kg CO<sub>2</sub>eq por tonelada, abrangendo emissões desde o cultivo até o produto final. A maior parte da pegada de carbono (89%) está concentrada no cultivo de cana-de-açúcar, com emissões distribuídas da seguinte forma: 43% provenientes da produção e uso de fertilizantes (sintéticos e orgânicos), 20% do uso de combustíveis fósseis, 19% da queima de biomassa, 12% do transporte da cana-de-açúcar para os engenhos e 5% da aplicação de herbicidas e inseticidas. Em comparação, as emissões dos próprios engenhos de açúcar são mínimas, principalmente devido ao tratamento de águas residuais com o uso de bagaço para geração de eletricidade, responsável por mais de 95% de suas emissões (Figueiredo et al., 2010). Cerri et al. (2010) indicam que a gestão da colheita sem queima de cana-de-açúcar pode aumentar o estoque de carbono no solo em até 1,5 Mg por hectare nos primeiros 30 cm de profundidade do solo, enquanto a retenção de palha pode aumentar em média 1,24 vezes os estoques de carbono orgânico do solo em comparação com áreas onde ocorre a queima antes da colheita.

Esses estudos destacam a importância de adotar métodos que minimizem os impactos negativos nos estoques de carbono do solo, enfatizando a gestão adequada do solo e a incorporação de matéria orgânica para maximizar os ganhos de sequestro de carbono, embora não considerem necessariamente outros GEE. Diante dessa lacuna e da crescente demanda por biocombustíveis, resultados de balanço de emissões têm sido essenciais para orientar políticas de expansão sustentável da produção de cana-de-açúcar e uso da terra.

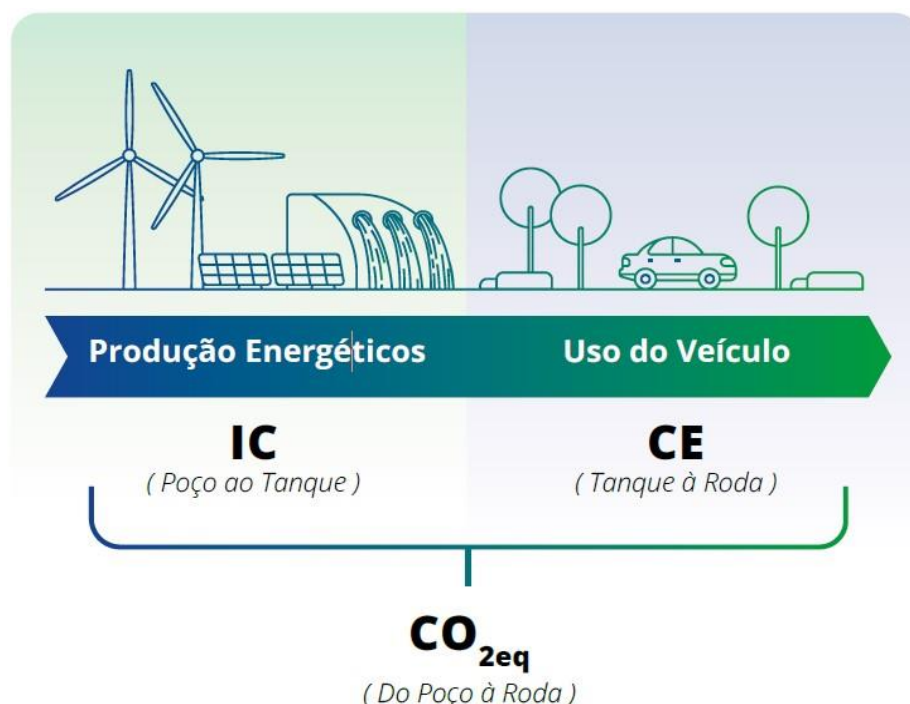
## **2.2. Do tanque à roda: Mobilidade Urbana e Uso do Etanol**

A integração do etanol na matriz energética de transportes urbanos traz benefícios significativos, como a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além de ser um biocombustível de baixo carbono, sua combustão libera menos CO<sub>2</sub> comparado aos combustíveis fósseis, devido ao ciclo equilibrado e renovável, onde o carbono absorvido pelas

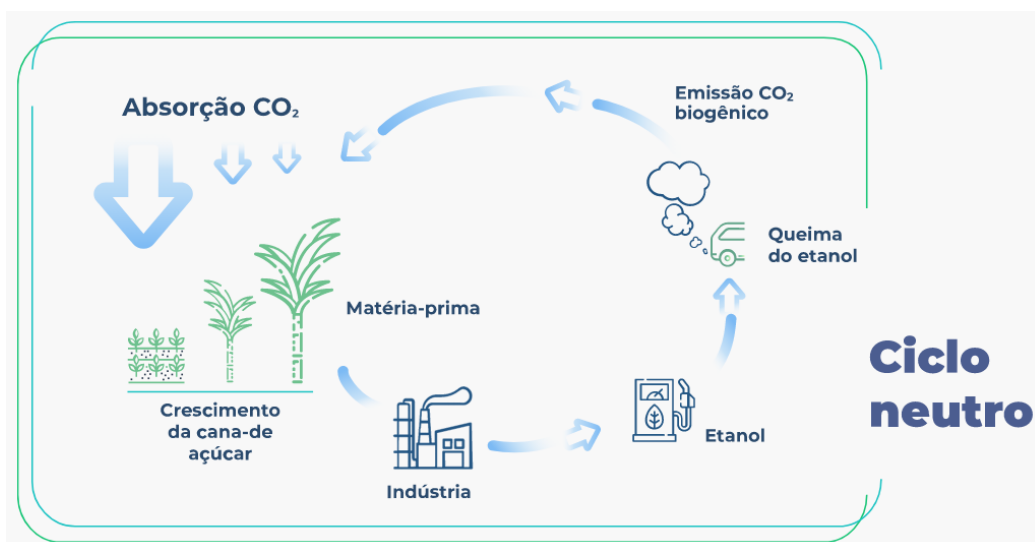
plantas durante o crescimento compensa parte das emissões. Adicionalmente, o uso de etanol pode diminuir a dependência brasileira de importações de petróleo, aumentando a segurança energética e impulsionando o desenvolvimento econômico, regional e social, através da geração de empregos e valorização da economia rural.

Por outro lado, o uso de etanol em veículos apresenta desafios significativos. Um deles é a emissão de poluentes locais, como aldeídos, durante a combustão, apesar de emitir menos CO<sub>2</sub> que os combustíveis fósseis. A gestão dessas emissões é crucial para mitigar os impactos na qualidade do ar. Além disso, a expansão da infraestrutura de distribuição, incluindo bombas de combustível e capacidade de armazenamento, é fundamental para suportar o aumento do uso do etanol ao longo de sua cadeia completa.

Para os combustíveis fósseis, essa cadeia de valor é descrita “do poço à roda” (Figura 1). Em contraste, no caso do etanol, cunhamos o termo “do campo ao tanque” (Figura 2) por se tratar de uma matriz energética baseada em uma cultura agrícola, fazendo uma analogia às cadeias agroalimentares. Este ciclo completo reflete que a cultura agrícola usada na produção do etanol também absorve os gases emitidos durante sua combustão.



**Figura 1** - Cadeia “do poço à roda”. Fonte: AEA (2022).



**Figura 2** - Ciclo “do campo à roda”. Fonte: UNICA (2024).

A comparação entre as emissões de veículos movidos a etanol e outros combustíveis é essencial para avaliar seu impacto ambiental. Em termos de rendimento, o etanol possui um conteúdo energético inferior ao da gasolina, o que significa que veículos movidos a etanol podem ter uma eficiência de combustível ligeiramente menor, porém o balanço de emissões do etanol é superior em relação à gasolina e ao diesel. Veículos movidos a etanol E100 (etanol puro) podem emitir até 60% menos CO<sub>2</sub> por quilômetro do que os veículos movidos à gasolina. Considerando o ciclo de vida completo (do campo à roda), a produção e uso de etanol de cana-de-açúcar podem reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 90% em comparação com a gasolina (Goldemberg et al., 2008). Por outro lado, os veículos movidos a etanol tendem a emitir quantidades semelhantes ou ligeiramente menores de outros poluentes, como NO<sub>x</sub> e material particulado (MP), do que os veículos a gasolina, mas maiores do que os veículos movidos à eletricidade, além de maiores quantidades de aldeído (Corrêa e Arbilla, 2006).

Em suma, o etanol oferece uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis devido aos seus benefícios ambientais e valor estratégico no caso brasileiro, enquanto enfrenta desafios como a gestão das emissões de poluentes e a adoção de inovações tecnológicas que influenciam sua produção e uso, como se discute ao longo deste relatório.

### 3. MÉTODO DA PRODUÇÃO TÉCNICA

O relatório técnico foi elaborado com base em uma abordagem que integrou a experiência profissional e prática dos pesquisadores com a interação com outros profissionais especializados, além da observação direta e a participação direta em diversas etapas do processo de cultivo de cana-de-açúcar e produção de etanol.

Inicialmente, foi identificado o problema central relacionado aos impactos ambientais e ao balanço energético da produção de etanol de cana-de-açúcar. Para isso, foram utilizadas principalmente fontes secundárias de artigos científicos e outros relatórios técnicos para contextualizar o cenário geral da produção de biocombustíveis e as diretrizes regulatórias.

Além disso, a colaboração com outros profissionais, como agrônomos, engenheiros ambientais e especialistas em biocombustíveis, foi crucial para a interpretação dos resultados. Isso permitiu uma análise mais robusta e uma discussão embasada sobre as estratégias de mitigação de impactos ambientais na cadeia de produção do etanol.

As habilidades profissionais empregadas incluíram a capacidade de observação detalhada das práticas agrícolas, análise crítica dos dados coletados, e a aplicação de métodos analíticos para avaliar o desempenho ambiental e energético da cadeia de produção do etanol. A abordagem adotada combinou técnicas qualitativas e quantitativas para uma compreensão abrangente dos problemas enfrentados e das possíveis soluções. Assim, o método utilizado neste relato técnico integrou informações primárias e secundárias de forma a qualificar as análises realizadas, garantindo uma visão holística e fundamentada sobre os desafios e oportunidades na produção sustentável de etanol de cana-de-açúcar.

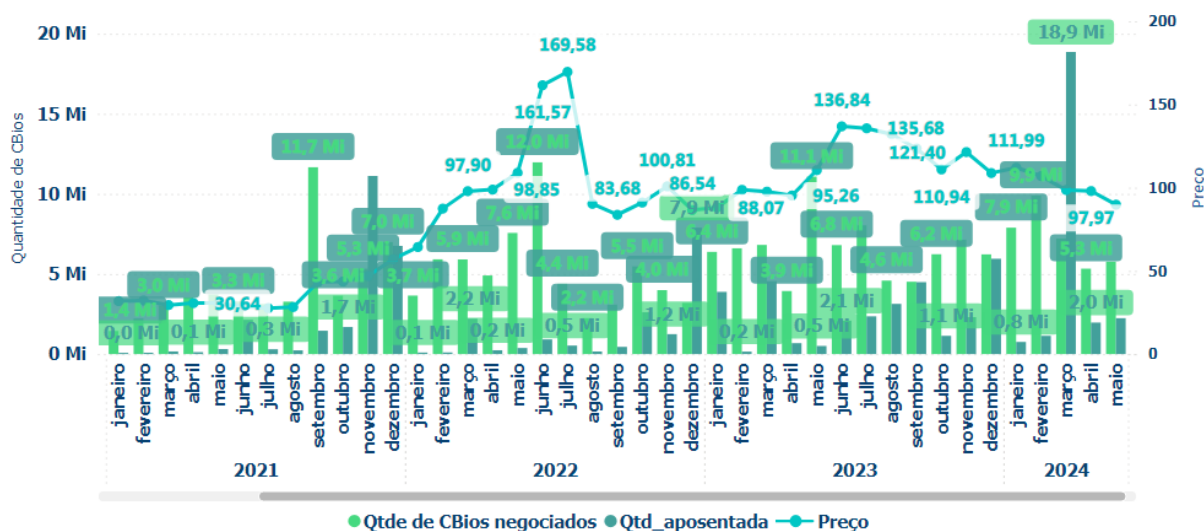
## **4. CONTEXTO DO PROJETO**

### **4.1 Integração do financiamento de carbono na cadeia de valor do etanol**

No contexto da cadeia de valor do etanol, o financiamento de carbono surge como uma ferramenta promissora para reduzir as emissões de GEE e promover a transição para uma economia de baixo carbono, facilitando a mobilização de recursos financeiros para apoiar projetos de impacto comprovado. Esses recursos podem ser provenientes de diversas fontes, como governos, empresas e investidores. No mercado de carbono, os créditos de carbono, que representam toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente removidas da atmosfera, são negociados e utilizados para compensar emissões e favorecer a adoção de práticas sustentáveis.

A integração do financiamento de carbono no ciclo “do campo à roda” pode se dar de diversas maneiras. Em campo, são exemplos de projetos de agricultura sustentável, como adoção de técnicas de manejo do solo, otimização de operações com máquinas e adoção de biofertilizantes. No processo agroindustrial, a modernização de usinas de etanol demanda investimentos na atualização de equipamentos e tecnologias para reduzir o consumo de energia e as emissões de GEE. Já a cadeia de logística verde oferece benefícios através da utilização de biocombustíveis nos veículos da frota, a otimização das rotas de entrega e a implementação de soluções logísticas inovadoras.

No Brasil, o Programa RenovaBio é um exemplo destacado de iniciativa bem-sucedida na cadeia de valor do etanol, estabelecendo metas de descarbonização e incentivando a produção de etanol com menor emissão de GEE. Através da comercialização de créditos de carbono (CBio) na B3, o setor sucroalcooleiro tem visto um mercado de CBio avaliado entre 1,69 a 3,27 bilhões de reais em maio de 2024 (UNICA, 2024), conforme indicado na Figura 4. Além disso, a securitização por tokenização surge como uma alternativa promissora para ampliar as opções de financiamento e investimento, especialmente no agronegócio e energias renováveis. Esse método permite a emissão de certificados tokenizados lastreados em recebíveis rurais verdes e títulos de créditos de carbono, facilitando o acesso a capital no mercado secundário para projetos com impacto socioambiental positivo (Nogueira, 2023).



**Figura 3** - Mercado de CBio na Indústria Sucroalcooleira desde 2021. Fonte: UNICA (2024).

Por outro lado, a integração do financiamento de carbono na cadeia de valor do etanol enfrenta desafios significativos que precisam ser superados para garantir sua eficácia na promoção da sustentabilidade (Guerra, 2023). A falta de conhecimento e expertise técnica dificulta a identificação de oportunidades e a eficácia de projetos. Além disso, o acesso limitado ao capital especialmente para pequenas e médias empresas restringe a capacidade de investimento em tecnologias limpas e processos mais eficientes. A complexidade da regulamentação e dos mecanismos do mercado de carbono pode ser um obstáculo para a participação de algumas empresas, enquanto o desenvolvimento de fatores de emissões para calcular a mitigação em diversos biomas e os custos elevados de coleta e verificação de informações dificulta a comparação entre projetos e a avaliação do impacto real das ações de mitigação (Perosa et al., 2023).

Para superar esses desafios, é crucial investir em capacitação, simplificar as regulamentações, promover a padronização dos métodos de quantificação e monitoramento de emissões, e facilitar o acesso ao capital para empresas de todos os portes (Jorcelino, 2020). Abordando esses aspectos de maneira estratégica, o financiamento de carbono pode se transformar em um instrumento poderoso para impulsionar a sustentabilidade na cadeia de suprimentos do etanol. Isso não apenas contribuirá para a redução de GEE, mas também para a construção de um futuro mais verde e resiliente.

#### 4.2. Desafios e Oportunidades na Utilização do Financiamento de Carbono

A utilização do financiamento de carbono na promoção da sustentabilidade enfrenta uma série de desafios e oportunidades que demandam uma avaliação cuidadosa para maximizar os benefícios ambientais, sociais e econômicos. A complexidade regulatória e burocrática emerge como um dos principais obstáculos, pois os mercados de carbono são regidos por regulamentos internacionais, nacionais e regionais diversos, criando barreiras à implementação eficiente de projetos. A falta de padronização nas metodologias de contabilização e verificação das reduções de emissões também representa um desafio significativo, dificultando a comparabilidade e a transparência dos créditos de carbono (Wara, 2007). Além disso, a volatilidade dos preços dos créditos de carbono constitui outro desafio crucial, afetando a previsibilidade e a viabilidade financeira dos projetos de longo prazo e desestimulando investidores e desenvolvedores (McKinsey & Company, 2009). A aceitação pública limitada e a conscientização sobre os benefícios do financiamento de



carbono também são questões importantes, podendo gerar resistência por parte de stakeholders e comunidades locais (Gloor, 2010).

Apesar dos desafios, o financiamento de carbono oferece oportunidades significativas para a promoção da sustentabilidade. Uma das principais vantagens é a capacidade de atrair investimentos para projetos que reduzem emissões de gases de efeito estufa, como iniciativas de energia renovável, eficiência energética, reflorestamento e manejo sustentável de florestas. Esses projetos não apenas contribuem para mitigar as mudanças climáticas, mas também geram benefícios sociais e econômicos, como a criação de empregos verdes e o desenvolvimento comunitário (UNFCCC, 2015).

Além disso, o financiamento de carbono pode estimular a inovação tecnológica e a transferência de tecnologias limpas para países em desenvolvimento, auxiliando-os a alcançar suas metas de redução de emissões e a construir economias mais resilientes e sustentáveis. Os créditos de carbono também podem ser utilizados como ferramentas de compensação de emissões para empresas e indivíduos que buscam diminuir sua pegada de carbono, impulsionando uma economia de baixo carbono (Streck, 2004).

Para superar os desafios associados à integração do financiamento de carbono e maximizar seus benefícios, várias estratégias podem ser implementadas. Uma abordagem crucial é a harmonização das regulamentações e metodologias de contabilização e verificação das emissões de carbono, promovendo maior transparência, confiabilidade e comparabilidade dos créditos de carbono (Bohmann et al., 2006). A implementação de sistemas robustos de monitoramento, reporte e verificação (MRV) é essencial para assegurar a integridade ambiental dos projetos financiados (Lutken, 2011).

Além disso, a diversificação das fontes de financiamento e a criação de mecanismos de estabilização de preços, como fundos de reserva ou seguros de preços, podem mitigar a volatilidade do preço do carbono e proporcionar maior previsibilidade financeira para os projetos (Grubb et al., 2011). É fundamental também aumentar a conscientização pública e o engajamento das partes interessadas por meio de campanhas educativas e de comunicação, demonstrando os benefícios do financiamento de carbono para a sociedade e o meio ambiente (Baker & McKenzie, 2010). A promoção de parcerias público-privadas e a colaboração internacional são essenciais para facilitar a transferência de tecnologia e a implementação de projetos de alto impacto em países em desenvolvimento (Streck, 2004). Além disso, é crucial que os projetos de financiamento de carbono adotem abordagens inclusivas e participativas, garantindo que as comunidades locais sejam beneficiadas e estejam envolvidas no processo de desenvolvimento e implementação (Victor, 2011).

O financiamento de carbono oferece uma gama de oportunidades para promover a sustentabilidade, desde atrair investimentos para projetos de baixo carbono até impulsionar a inovação tecnológica. No entanto, para maximizar esses benefícios, é fundamental superar os desafios regulatórios, financeiros e sociais associados, promovendo assim uma transição eficaz para uma economia de baixo carbono.

### **4.3. Estudos de Caso e Exemplos Práticos**

*Stellantis: Integração de etanol competitivo na matriz energética brasileira*

A Stellantis, um dos maiores grupos automotivos do mundo resultante da fusão entre a Fiat Chrysler e PSA, não apenas se destaca pela sua proeminência no setor automotivo global, mas também por suas iniciativas de sustentabilidade. Um aspecto especialmente notável é o compromisso da empresa com a integração do etanol na matriz energética de seus veículos e a exploração do financiamento de carbono. A análise dos estudos de caso relevantes sobre o ciclo do etanol e o financiamento de carbono pela Stellantis proporciona uma visão abrangente dos desafios e das oportunidades envolvidos nesses processos.

A Stellantis tem aproveitado o RenovaBio para desenvolver e comercializar veículos flex, capazes de operar tanto com gasolina quanto com etanol, cuja adoção tem contribuído significativamente para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> no setor de transportes no Brasil (UNFCCC, 2015). A empresa tem gerado CBio com base na redução de emissões calculada em seus veículos, criando uma fonte adicional de receita e incentivando práticas de produção mais sustentáveis (Streck, 2004). A estratégia da Stellantis em promover veículos que utilizam etanol não apenas aumenta a demanda por biocombustíveis, mas também impulsiona o programa RenovaBio, destacando como políticas bem estruturadas e o engajamento corporativo podem viabilizar iniciativas de financiamento de carbono.

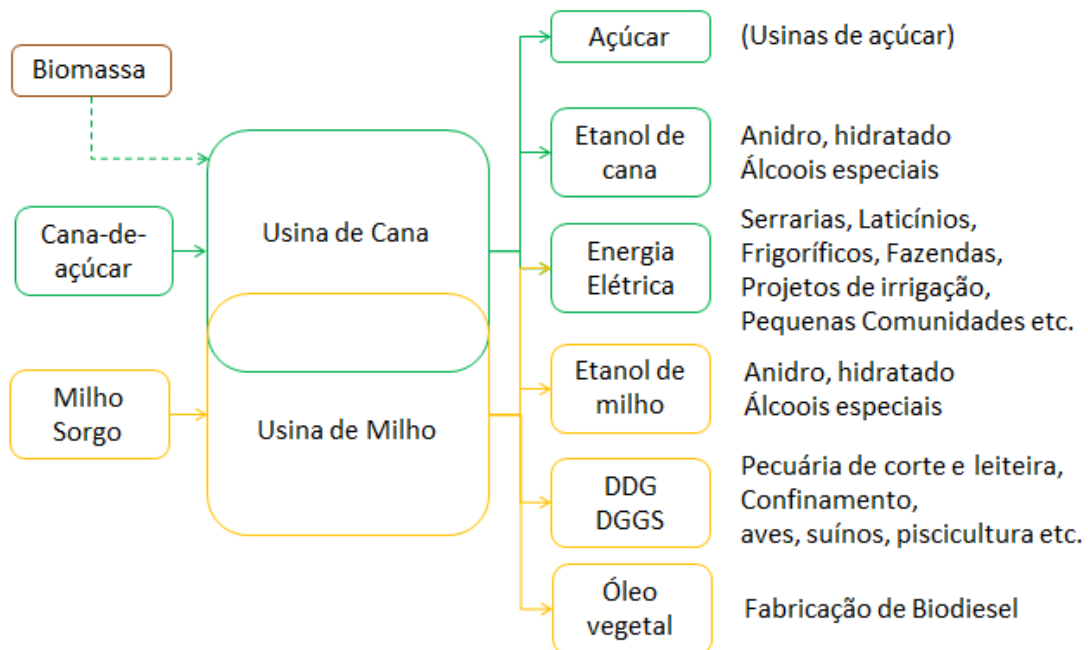
No entanto, nem todas as iniciativas têm prosperado nesse sentido. Projetos de biocombustíveis avançados, como o etanol de segunda geração (E2G), que utiliza resíduos agrícolas como matéria-prima, enfrentam desafios técnicos e econômicos significativos. Apesar do potencial teórico para reduzir ainda mais as emissões de carbono em comparação com o etanol de primeira geração, esses projetos têm sido limitados pela complexidade tecnológica, altos custos de produção e falta de infraestrutura adequada (McKinsey & Company 2009). A volatilidade dos preços dos créditos de carbono também não tem oferecido incentivos financeiros suficientes para superar esses desafios econômicos (Grubb et al., 2011). Além disso, nota-se a ausência de um programa estruturado que permita aos consumidores gerarem e reterem os benefícios dessa descarbonização, embora frequentemente sejam os responsáveis por arcar com os custos associados a essas iniciativas.

Mesmo diante desses desafios, a Stellantis continua a investir no etanol como principal matriz energética no mercado brasileiro. Em um evento para investidores em junho de 2024, o diretor executivo Carlos Tavares destacou a força do mercado de etanol no Brasil, que tem dificultado a penetração de veículos totalmente elétricos devido à sua competitividade em custo-benefício e eficiência em emissões de gases de efeito estufa. Essa dinâmica levou o governo brasileiro a ajustar sua política tributária sobre veículos elétricos e híbridos, buscando privilegiar o etanol nacional (Tieghi, 2024).

### *O RenovaBio na Produção Sucroalcooleira Brasileira*

Utilizando a ferramenta de cálculo do RenovaBio para mensurar a pegada de carbono da produção sucroalcooleira, Pighinelli et al (2021) compararam modelos de produção e calcularam as emissões de carbono “do campo à roda”, concluindo que a rotação de culturas entre cana-de-açúcar e milho (“usina flex”) demanda 678,40 L por emissão de CBio, valor 2,5% menor do que as usinas convencionais, além de proporcionar a produção de etanol durante o ano todo e uma série de subprodutos (Figura 4). Em linha com esse resultado, o programa favorece as estratégias eficazes de uso da terra através do critério de mudança de uso da terra (MUT), controlando a conversão de áreas de vegetação nativa em lavoura canavieira, que apresentam o maior potencial de emissões de GEE, e proporcionando uma certificação com custos reduzidos para usinas cujos fornecedores demonstrem conformidade

com o Cadastro Ambiental Rural (CAR), zoneamentos agroecológicos e políticas de combate ao desmatamento (Sabonaro et al, 2023).



**Figura 4** - Esquema de uma usina “flex” (cana-de-açúcar e milho). Fonte: Piracicaba Engenharia (2019).

Por outro lado, Alves (2021) aponta para um impasse na distribuição dos lucros com a geração de CBio: Enquanto os produtores, representados pela Organização de Associações de Produtores de Cana do Brasil (Orplana) pretendem receber 100% dos CBio gerados a partir da cana que cultivam, a Associação Brasileira da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) propõe que os produtores recebam até 60% dos CBio, sendo o restante absorvido pelas usinas. Visto que os produtores de cana fornecem um terço da cana processada pelas usinas, esse impasse constitui-se em um desafio ao desenvolvimento do programa RenovaBio no sentido de um modelo colaborativo de compartilhamento equânime de seus benefícios.

O programa também não é totalmente isento de críticas, principalmente devido ao fato de considerar apenas questões ambientais em sua metodologia de cálculo de emissões, deixando de lado aspectos sociais e econômicos da produção agrícola, o que acaba contribuindo para a sua concentração entre entidades representativas do setor agroindustrial como a UNICA, enquanto permanecem menos acessível a pequenos e médios produtores (Silva & Souza, 2024). Outro exemplo reside nas diferenças regionais significativas no desempenho da certificação da RenovaBio, sendo que as regiões Centro-Oeste e Sudeste apresentam os melhores resultados em termos de fração do volume de biocombustível elegível e fator para emissão de CBio em comparação ao Nordeste, demandando ações para melhorar a eficiência energética e ambiental da produção de etanol na região (Silva et al, 2023).

#### *Solinftec: Eficiência operacional e o acesso a títulos verdes*

A Solinftec representa um modelo de iniciativa para gestão operacional de máquinas em campo visando a descarbonização e a eficiência energética. Foi fundada em 2007 na cidade de Araçatuba-SP como uma startup inicialmente voltada para a customização de softwares para automação da cultura de cana-de-açúcar, consumidos majoritariamente na indústria canavieira pela Raízen. A partir disso, desenvolveu uma interface de inteligência artificial que realiza a integração e processamento de dados a partir de seus próprios dispositivos de

telemetria de maquinário em campo, além de estações climáticas e uma série de outros dispositivos para recomendações em tempo real (Dias Neto, 2022).

Em junho de 2024 a plataforma estava em uso em mais de 11 milhões de hectares, incluindo mais de 90% de toda a produção canavieira no Brasil, além de milho e soja nos Estados Unidos, e monitorando cerca de seis mil transações por segundo, com um resultado em reduções de emissões de GEE em cerca de 429 mil toneladas/ano (Solinftec, 2024). Como evolução desse modelo, a empresa lançou um rover de pulverização, o Solix, um dos primeiros exemplos do gênero na agricultura, movido à energia solar e equipado com dispositivos de reconhecimento de imagem “see and spray” para prevenção de pragas e daninhas (Lippsmeyer et al, 2024).

Essa tração no crescimento da Solinftec iniciou com a entrada de fundos de investimento a partir de 2017, com a entrada de fundos de investimento no Brasil e nos Estados Unidos, que desde então injetaram mais de 450 milhões de reais na empresa. Além disso, alcançou a marca de 500 milhões de reais captados através de emissão de Certificados de Recebíveis do Agronegócio (CRA) verdes, isto é, lastreados em compromissos de descarbonização e com benefícios verificados pela Climate Bonds Initiative (CBI), uma organização internacional sem fins lucrativos que atua na certificação de títulos e empréstimos verdes (Bertão, 2023).

O principal desafio para o crescimento desse mercado de títulos verdes é a falta de padronização. Atualmente, não há definições universais para o que constitui um projeto elegível para financiamento por meio desses títulos. Isso dificulta a avaliação do impacto ambiental dos investimentos e reduz a confiança dos investidores, embora a CBI se apresente como uma alternativa para criar um sistema internacional transparente e acreditado de títulos verdes, tornando o mercado mais atrativo para os investidores (Kidney, 2022), ainda que também não seja totalmente isento de críticas devido à ausência de critérios de validação da qualidade de fatores socioeconômicos como condições dignas de trabalho e garantia de conformidade socioambiental (Wenzel & Christie, 2023).

## **5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE**

Os estudos analisados destacam a relevância do RenovaBio como um programa estratégico para reduzir as emissões de GEE na produção de etanol, com evidências de que a implementação de práticas sustentáveis como a rotação de culturas pode diminuir a intensidade de carbono na produção de biocombustíveis, promovendo uma menor demanda de CBio. Contudo, a distribuição equitativa dos benefícios do programa continua sendo um ponto de controvérsia, com divergências entre produtores e usinas sobre a partilha dos CBio gerados sobretudo diante da falta de padronização em torno das métricas do programa.

Para avançar na agricultura de baixo carbono, é crucial investir em pesquisa para melhorar a eficiência energética das operações agrícolas, visando ainda a inclusão de pequenos e médios produtores no RenovaBio, garantindo acesso equitativo aos benefícios do programa. Incentivar e facilitar a adoção de tecnologias de monitoramento e gestão eficientes, como aquelas desenvolvidas pela Solinftec, pode potencializar a descarbonização e aumentar a eficiência energética na agricultura brasileira.

A relevância dessas descobertas se estende além do contexto específico da produção canavieira no Brasil. Por exemplo, as lições aprendidas com o RenovaBio podem ser aplicadas em outros contextos que enfrentam desafios semelhantes de mitigação de emissões

e sustentabilidade agrícola. Também a criação de políticas públicas e estratégias corporativas voltadas para a sustentabilidade ambiental e econômica a partir de experiências como as relatadas pode ajudar a demonstrar como a integração de práticas agrícolas sustentáveis e tecnologias inovadoras pode não apenas reduzir emissões de GEE, mas também melhorar a eficiência produtiva e a competitividade do setor agrícola.

Profissionais da área ambiental, agrícola e de políticas públicas podem se beneficiar desses casos ao considerar estratégias para mitigar as mudanças climáticas e promover práticas agrícolas sustentáveis em suas próprias comunidades e organizações. A socialização dessas experiências através de workshops, conferências e publicações acadêmicas é essencial para disseminar conhecimento e incentivar a adoção de soluções inovadoras em escala global.

Estudos futuros podem explorar a padronização de títulos verdes, como os Certificados de Recebíveis do Agronegócio (CRA), cujo mercado apesar de volumoso ainda é pouco mapeado, visando aumentar a transparência e atratividade para investidores. Além disso, é fundamental considerar não apenas os aspectos ambientais, mas também os impactos sociais e econômicos das políticas e tecnologias implementadas.

Em resumo, a análise crítica dos casos apresentados não apenas destaca os desafios enfrentados na implementação de iniciativas sustentáveis, mas também aponta para oportunidades significativas de desenvolvimento e colaboração entre diferentes setores. A colaboração contínua entre academia, setor privado e governamental será fundamental para alcançar uma agricultura de baixo carbono eficiente e inclusiva no futuro.

## **6. CONCLUSÃO**

O ciclo do etanol “do campo à roda” desempenha um papel crucial no mercado de carbono e na mobilidade urbana, especialmente no contexto brasileiro. Seu uso como combustível renovável tem demonstrado ser uma solução eficaz para a redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para os compromissos climáticos do Brasil. A integração do etanol na matriz energética de transportes urbanos oferece uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, promovendo uma economia de baixo carbono e incentivando o desenvolvimento de tecnologias limpas.

Através de programas como o RenovaBio, o Brasil tem liderado esforços para expandir a produção e o uso de biocombustíveis, gerando CBio e incentivando práticas agrícolas sustentáveis. Os estudos analisados destacam a relevância estratégica desse programa para reduzir as emissões de GEE na produção sucroalcooleira. Evidências indicam que a adoção de práticas sustentáveis, como a rotação de culturas entre cana-de-açúcar e milho, pode efetivamente diminuir a intensidade de carbono na produção de biocombustíveis, resultando em uma menor demanda por CBio. No entanto, a distribuição equitativa dos benefícios do RenovaBio permanece um ponto de controvérsia, com discordâncias entre produtores e usinas sobre a partilha dos CBio gerados. Além disso, a falta de padronização em torno das métricas do programa continua sendo um desafio para seu desenvolvimento.

A relevância dessas descobertas transcende o contexto específico da produção de cana-de-açúcar no Brasil. Lições aprendidas com o RenovaBio podem ser aplicadas em outros setores e regiões enfrentando desafios semelhantes de mitigação de emissões e sustentabilidade agrícola. A implementação de políticas públicas e estratégias corporativas focadas na

sustentabilidade ambiental e econômica, baseadas em experiências como as relatadas, demonstra como a integração de práticas agrícolas sustentáveis e tecnologias inovadoras pode não apenas reduzir as emissões de GEE, mas também melhorar a eficiência produtiva e a competitividade dos setores agrícolas e industrial.

O futuro sustentável do Brasil depende de uma abordagem integrada que considera tanto o contexto agrícola quanto a mobilidade urbana. A agricultura brasileira, com sua capacidade de produzir biocombustíveis como o etanol de maneira eficiente e sustentável, posiciona o país como um líder global na transição para uma economia de baixo carbono. No entanto, para maximizar os benefícios ambientais e socioeconômicos, é necessário continuar a investir em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias avançadas de biocombustíveis.

Além disso, a mobilidade urbana deve ser repensada para incluir uma maior adoção de veículos movidos a combustíveis renováveis e elétricos. A expansão da infraestrutura para suportar esses veículos, incluindo estações de abastecimento de etanol e pontos de carregamento para veículos elétricos, é fundamental para promover a transição para um sistema de transporte mais sustentável. Políticas públicas que incentivem a inovação tecnológica e a adoção de práticas sustentáveis na agricultura e no setor de transportes serão essenciais para alcançar esses objetivos.

Em suma, a análise crítica dos casos apresentados não apenas destaca os desafios enfrentados na implementação de iniciativas sustentáveis, mas também aponta para oportunidades significativas de desenvolvimento e colaboração entre diferentes setores. O Brasil, com seus vastos recursos naturais e capacidade tecnológica, está bem posicionado para liderar essa transformação. Continuar a desenvolver e implementar estratégias que integrem o financiamento de carbono, políticas públicas eficazes e inovação tecnológica será crucial para construir um futuro sustentável e resiliente.

## **7. REFERÊNCIAS**

AEA. (2022). Cartilha: cálculo do poço à roda. [Text/Online]. Recuperado de: <https://tinyurl.com/aea22CC>. Acesso em: 02 de julho de 2024.

Alves, D. A. (2021). O valor do produtor de cana no RenovaBio. *Agroanalysis*, 41(5), 551-556.

Baker, J. B., & McKenzie, M. (2010). *Carbon trading: Law and practice*. Oxford University Press.

Barbosa, L. C., Magalhães, P. S. G., Bordonal, R. O., Cherubin, M. R., Castioni, G. A. F., Tenelli, S., Franco, H. C. J., & Carvalho, J. L. N. (2019). Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil Tillage Res.*, 195, 104383.

Bertão Filho, I. (2023). Solinftec emite CRA verde de R\$ 150 milhões. *Capital Reset*. [Text/Online]. Recuperado de: <https://tinyurl.com/BF23CR>. Acesso em: 23 de junho de 2024.

Bhatt, R. (2020). Resources Management for Sustainable Sugarcane Production. In *Resources Use Efficiency in Agriculture* (pp. 647-693). Springer.

Bohmann, S., Lempriere, P., & Clark, M. (2006). Carbon trading: Current market trends and opportunities. Point Carbon.

BRASIL. (2017). Lei nº 13.576, de 23 de setembro de 2017. Dispõe sobre a regulamentação do mercado de etanol e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 set. 2017.

Cerri, C. C., Cerri, D. G. P., & Figueiredo, E. B. (2010). Carbon stocks and sugarcane: New data for Brazilian soils. *European Journal of Soil Science*, 62(1), 23-28.

Cherubin, M. R., Carvalho, J. L. N., Cerri, C. E. P., Nogueira, L. A. H., Souza, G. M., & Cantarella, H. (2021). Land Use and Management Effects on Sustainable Sugarcane-Derived Bioenergy. *Land*, 2021, 10(1), 72.

CONAB. (2020). Acompanhamento da safra brasileira: V. 6 - Safra 2019/20 N.4 - Quarto levantamento, abril 2020.

Corrêa, S. M., & Arbilla, G. (2006). Aldehydes in the atmosphere of the Rio de Janeiro downtown area, Brazil. *Atmospheric Environment*, 40(9), 1705-1714.

Dias Neto, A. F., Albiero, D., Rossetto, R., & Biagi, J. D. (2022). Modeling of Mechanized Sugarcane Harvesting to Support Decision-Making on Asset Management. In: *Innovation for Sustainability of the Sugar Agro-Industry* (Vol. 24, pp. 798-812). Springer.

Figueiredo, E. B., Panosso, A. R., Romão, R., & La Scala, N. (2010). Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. *Carbon Balance and Management*, 5(1).

Gloor, L. (2010). Public awareness and acceptance of carbon trading. *Environmental Research Letters*, 5, 034017.

Goldemberg, J., Coelho, S. T., Nastari, P. M., & Lucon, O. (2008). "Ethanol learning curve—the Brazilian experience." *Biomass and Bioenergy*, 26(3), 301-304.

Grubb, M., Kolostora, C., & Brack, D. (2011). A guide to emissions trading: Making it work for the environment and the economy. Earthscan.

Guerra, J. C. P. (2023). A cana-de-açúcar e a sustentabilidade: Desafios para a readequação do setor sucroenergético nos estados das antigas capitanias do Norte. *Revista de Estudos Interdisciplinares*, 4(5), 77-88.

Hernandes, T.A.D.; Duft, D.G.; Luciano, A.C.S.; Leal, M.R.L.V.; Cavalett, O. (2020). Identifying suitable areas for expanding sugarcane ethanol production in Brazil under conservation of environmentally relevant Habitats. *Journal of Cleaner Production*, 125318.

IBGE. (2022). Cana-de-açúcar. [Text/Online]. Recuperado de <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>. Acesso em: 2 de julho de 2024.

Jorcelino, T. M. (2020). Influência da educação a distância no desenvolvimento rural: o caso da agricultura de baixa emissão de carbono. In: Anais do 53º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. UNIOESTE.

Kidney, S., Clenaghan, S., & Oliver, P. (2022). Climate bonds – the investment case. In: Introduction to Financing Climate Change Mitigation and Adaptation. USAID.

Lippsmeyer, M., M. Langemeier & M. Boehlje. (2024) "Maintaining Key Resources Amid Strategic Uncertainty." *farmdoc daily* (14):107, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Lourenço, K. S., Rosseto, R., Vitti, A. C., Montezano, Z. F., Soares, J. R., Sousa, R. M., Carmo, J. B., Kuramae, E. E., & Cantarella, H. (2019). Strategies to mitigate the nitrous oxide emissions from nitrogen fertilizer applied with organic fertilizers in sugarcane. *Science of the Total Environment.*, 650, 1476–1486.

Lutken, S. (2011). Raising the bar: Encouraging innovation through carbon finance. *Climate Policy*, 11, 169-182.

Macedo, I. C., Seabra, J. E. A., & Silva, J. E. A. R. (2008). Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, 32(7), 582-595.

McKinsey & Company. (2009). Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve. McKinsey & Company

Mello, F. F. C., Cerri, C. E. P., Davis, C. A., Holbrook, N. M., Paustian, K., Maia, S. M. F., Galdos, M. V., Bernoux, M., & Cerri, C. C. (2014). Payback time for soil carbon and sugarcane ethanol. *Nat. Clim. Chang.*, 4, 605–609.

Nogueira, E. A. T. (2023). The legal issue in the securitization of tokenization of the green rural product certificates and carbon credits. *Brazilian Review of Finance*, 21(1), 1-18.

Ogura, A. P., da Silva, A. C., Castro, G. B., Espíndola, E. L. G., & da Silva, A. L. (2022). An overview of the sugarcane expansion in the state of São Paulo (Brazil) over the last two decades and its environmental impacts. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 66-75.

Perosa, B., Newton, P., & Silva, R. (2023). A monitoring, reporting and verification system for low carbon agriculture: A case study from Brazil. *Environmental Science & Policy*, 140, 286-296.

Piracicaba Engenharia. (2019). Etanol de Cana x Etanol de Milho. [Text/Online]. Recuperado de: <https://tinyurl.com/PE19ECM>. Acesso em: 2 de julho de 2024.

Sabonaro, D. Z., Sabonaro, C. Z., & Carmo, J. B. (2023). RenovaBio: A certificação, tencologia e transferência de tecnologia na produção da cana-de-açúcar com sustentabilidade. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 8(3), 725-735.

Silva, A. G. B., Lisboa, I. P., Cherubin, M. R., & Cerri, C. E. P. (2019). How Much Sugarcane Straw is Needed for Covering the Soil? *Bioenergy Res*, 12, 858–864.



Silva, L. R., & Souza, G. V. A. (2024). Psicofera de sustentabilidade ambiental: o setor sucroenergético e a política nacional de biocombustíveis (RenovaBio). *Geografia*, 49(1), 186-211.

Silva, U. S., Silva, M. S., Martins, L. O. S., Hocevar, L. S., Rocha, Â. M., & Torres, E. A. (2023). Análise da certificação do etanol pela RenovaBio sob aspectos regionais no Brasil. In: *Engenharias - Automação, Robótica, Metrologia e Energia*. Editora Brasileira de Engenharia e Tecnologia.

Soares, L. H. B., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., & Boddey, R.M. (2009). Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. *Circular Técnica*, 27, 1–14.

Solinftec. (2024). About us. [Text/Online]. Recuperado de: <https://www.solinftec.com/en-us/>. Acesso em: 23 de junho de 2024.

Streck, C. (2004). Innovative financing for climate change mitigation: The role of emissions trading. *Journal of Environmental Planning and Management*, 47(4), 563-580.

Tieghi, A. L. (2024). Stellantis CEO assesses ethanol's barrier to electric vehicle entry in Brazil. [Text/Online]. *Valor Econômico*. Recuperado de: <https://tinyurl.com/T24VE>. Acesso em: 2 de julho de 2024.

UNFCCC. (2015). *Climate change: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

UNICA. (2024). Nova era da mobilidade. UNICA. [Text/Online] Recuperado de <https://unica.com.br/nova-era-da-mobilidade/>. Acesso em: 02 de julho de 2024.

UNICA. (2024). Observatório da Cana. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=110>. Acesso em: 23 de junho de 2024.

Victor, D. G. (2011). *Global warming gridlock: Creating more effective strategies for protecting the planet*. Cambridge: Cambridge University Press.

Wara, M. W. (2007). Is the global carbon market working? *Nature*, 445, 595-596.

Wenzel, F., & Christe, O. (2023). UBS and Santander's 'green' bonds linked to deforesters and rancher accused of slave labour in Brazil [Text/Online]. *Unearthed*. Greenpeace. Recuperado de: <https://tinyurl.com/WC23G>. Acesso em: 23 de junho de 2024.