
Balanço de carbono: uma análise comparativa entre cultivos de eucalipto e cana-de-açúcar

Carbon balance: a comparative analysis between eucalyptus and sugarcane plantations

Leonardo França da Silva^{1*}; Genelício Crusoé Rocha²; Jéssica Mansur Siqueira Crusoé²; Cristiano Marcio Alves de Souza¹; José Rafael Franco³; Cássio Furtado Lima²; Silvana Ferreira Bicalho⁴; Luciano José Minette²

¹ Universidade Federal de Grande Dourado (UFGD) – Mato Grosso do Sul – Brasil;

² Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Minas Gerais – Brasil;

³ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – São Paulo – Brasil;

⁴ Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) – Bahia – Brasil.

*Autor correspondente. E-mail: leonardo.silva@ufv.br

Recebido: 30/12/2024; Aceito: 25/02/2025

RESUMO

Este estudo tem como objetivo contribuir para a avaliação do desempenho ambiental dos setores agrícola e florestal no Brasil, por meio da análise comparativa do balanço de carbono nos ciclos de vida do eucalipto e da cana-de-açúcar, duas das maiores culturas do país. A pesquisa bibliográfica foi realizada com base em diversos estudos científicos nas áreas de agronegócio e meio ambiente, avaliando as diferentes etapas desses ciclos produtivos. A análise enfoca tanto a imobilização quanto as emissões de carbono associadas a cada fase de crescimento e manejo dessas culturas. O eucalipto, com seu rápido crescimento inicial, se destaca na captura de carbono, enquanto a cana-de-açúcar apresenta uma dinâmica de emissões e captura mais variável, influenciada por fatores como o manejo agrícola e o uso de fertilizantes. Os resultados indicam que, embora ambos os cultivos possuam potencial para mitigação das emissões de carbono, a escolha entre eles deve considerar aspectos regionais e as práticas de manejo para otimizar o balanço de carbono e contribuir para as metas de sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Ciclo de vida, Emissões de carbono, Imobilização de carbono, Sustentabilidade ambiental, Mitigação das emissões.

ABSTRACT

This study aims to contribute to the assessment of environmental performance in the agricultural and forestry sectors in Brazil through a comparative analysis of the carbon balance in the life cycles of eucalyptus and sugarcane, two of the country's largest crops. The bibliographic research was conducted based on various scientific studies in the fields of agribusiness and environmental science, evaluating the different stages of these production cycles.

The analysis focuses on both carbon sequestration and emissions associated with each phase of growth and management of these crops. Eucalyptus, with its rapid initial growth, stands out for its carbon capture, while sugarcane presents a more variable dynamics of emissions and sequestration, influenced by factors such as agricultural management and fertilizer use. The results indicate that although both crops have potential for mitigating carbon emissions, the choice between them should consider regional aspects and management practices to optimize the carbon balance and contribute to environmental sustainability goals.

Keywords: Life cycle, Carbon emissions, Carbon sequestration, Environmental sustainability, Emission mitigation

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas reflete a maior frequência de eventos extremos, como chuvas intensas, secas prolongadas e temperaturas elevadas, que impõem desafios significativos à produção agrícola (Senado Federal, 2023). Diante desse cenário, a sustentabilidade dos sistemas produtivos torna-se essencial para a preservação dos recursos naturais. A adoção de práticas voltadas à mitigação de danos e ao uso sustentável da terra é fundamental, especialmente em um país como o Brasil, onde a agricultura e o reflorestamento desempenham um papel expressivo na composição do Produto Interno Bruto (PIB). De acordo com o Ministério da Agricultura e Pecuária, a agropecuária brasileira cresceu 15,1% em 2023, totalizando R\$ 677,6 bilhões, e foi o setor que mais contribuiu para o crescimento de 2,9% do PIB do país nesse ano (Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023).

Além do impacto econômico da agropecuária, seu papel ambiental também é significativo. O setor agrícola é o segundo maior emissor de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil. Em 2021, as atividades agropecuárias emitiram 631 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, representando um aumento de 2,2% em relação ao ano anterior (Tsai *et al.*, 2024). Para mitigar essas emissões, o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (Plano ABC) estabelece a meta de reduzir 1,11 gigatoneladas de CO₂ equivalente até 2030, promovendo a adoção de sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis (SEEG, 2023). Estudos indicam que a implementação de sistemas integrados, como a integração lavoura-floresta, pode resultar em uma mitigação acumulada de até 1,26 gigatoneladas de CO₂ equivalente até 2030 (Estevam *et al.*, 2023).

Dentro desse contexto de sustentabilidade, em 2016, o Brasil possuía 7,84 milhões de hectares (ha) de florestas plantadas. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2017), 72% dessa área era ocupada por espécies do gênero *Eucalyptus* sp., tornando-o a principal cultura florestal do país. A biomassa, importante fonte de energia renovável, representava 8,7% da matriz de energia elétrica brasileira, sendo que 78,1% desse total provinha do bagaço resultante da moagem da cana-de-açúcar (Ministério de Minas e Energia, 2016).

As consequências do aquecimento global e suas causas têm sido amplamente discutidas, sendo um fenômeno associado a variações no clima e à poluição atmosférica. Um dos principais fatores responsáveis por essas mudanças são as emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes das atividades humanas (MARENGO *et al.*, 2012). Diversos estudos científicos confirmam a relação entre as emissões de GEE e o aumento das temperaturas globais (Marengo *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2015; Senado Federal, 2023).

Diante desse cenário, torna-se cada vez mais essencial a realização de pesquisas que quantifiquem os impactos das emissões de GEE em diferentes cultivos e atividades. De acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), a influência humana sobre o clima, impulsionada pelas emissões de GEE, é evidente e atingiu recentemente seu maior nível da história (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2025). Além das alterações atmosféricas, muitas das mudanças observadas, como o aquecimento dos oceanos, a

elevação do nível do mar e a redução da cobertura de neve e gelo, não têm precedentes em milhares de anos (IPCC, 2021).

Nesse cenário de transição energética, a busca por alternativas aos combustíveis fósseis vem se intensificando cada vez mais. O IPCC (2023) destaca a necessidade de ações urgentes para mitigar as mudanças climáticas, ressaltando a importância de práticas sustentáveis na agricultura, incluindo a produção de bioenergia como um fator relevante. Dentre as fontes limpas de matriz energética, destacam-se a lenha e o carvão vegetal provenientes do reflorestamento, além dos biocombustíveis derivados da cana-de-açúcar, como o etanol e o biodiesel (Bento; Vieira Filho, 2023).

Embora as atividades agrícolas e florestais estejam associadas às emissões de carbono, elas também desempenham um papel fundamental na imobilização do carbono por meio dos processos fisiológicos das plantas. Durante a fotossíntese, o carbono atmosférico é fixado e armazenado na biomassa vegetal e, conforme destacado por Bayer *et al.* (2011), parte desse carbono é incorporada ao solo, enriquecendo sua matéria orgânica. Dessa forma, o solo pode atuar como um reservatório de carbono. No entanto, a eficiência desse processo depende diretamente do sistema de manejo adotado e da cultura cultivada na área, conforme observado por Sochorová *et al.* (2016).

O ciclo do carbono é um processo natural essencial para a manutenção do equilíbrio ambiental, no qual o carbono circula entre a atmosfera, a biosfera, a litosfera e os oceanos (IPCC, 2021). Esse ciclo envolve fluxos contínuos de carbono por meio de processos como a fotossíntese, a respiração, a decomposição, a combustão e a sedimentação. As plantas capturam o dióxido de carbono (CO₂) atmosférico durante a fotossíntese, convertendo-o em biomassa, que pode ser transferida para outros organismos ao longo da cadeia alimentar. Parte desse carbono retorna à atmosfera pela respiração dos seres vivos e pela decomposição da matéria orgânica. Além dos processos naturais, atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, têm intensificado o acúmulo de CO₂ na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global (Marengo *et al.*, 2012). Portanto, compreender o ciclo do carbono é essencial para avaliar os impactos ambientais e desenvolver estratégias para a mitigação das mudanças climáticas (Souza *et al.*, 2012).

Este estudo busca contribuir para a avaliação do desempenho ambiental dos setores agrícola e florestal por meio da análise do balanço de carbono no ciclo de vida do eucalipto e da cana-de-açúcar. O objetivo consiste em comparar o balanço de carbono nesses ciclos produtivos, utilizando pesquisa bibliográfica para avaliar a imobilização e a emissão de carbono em diferentes etapas do processo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo consiste em uma pesquisa teórica do tipo revisão bibliográfica, com enfoque qualitativo e exploratório. A coleta de dados foi realizada por meio da análise de artigos científicos indexados em bases de dados reconhecidas, como *Scopus*, *Web of Science*, *SciELO* e *Google Scholar*, priorizando publicações dos últimos dez anos. Foram selecionados estudos que abordam o balanço de carbono, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o sequestro de carbono associados aos cultivos de eucalipto e cana-de-açúcar.

A análise considerou trabalhos que detalham a cadeia produtiva completa dessas culturas, com ênfase na quantificação do consumo de combustível fóssil por hectare em cada etapa do ciclo produtivo (preparo do solo, plantio, tratos culturais, colheita e transporte), bem como a estimativa do volume de carbono emitido em decorrência dessas operações. Além disso, também foram considerados estudos que avaliam o potencial de sequestro de carbono pela biomassa e pelo solo, permitindo uma abordagem comparativa entre as emissões e o sequestro ao longo do ciclo de cultivo.

A seleção dos estudos seguiu critérios de relevância temática, rigor metodológico e atualidade, com a finalidade de garantir a consistência e a representatividade dos dados utilizados na análise. A síntese dos resultados

foi realizada de forma descritiva e comparativa, permitindo a identificação de padrões, divergências e lacunas no conhecimento científico sobre a temática.

RESULTADOS

Com base na análise bibliográfica realizada, este estudo respondeu ao seu objetivo principal de comparar o balanço de carbono nos ciclos produtivos do eucalipto e da cana-de-açúcar, contribuindo para a avaliação do desempenho ambiental dos setores agrícola e florestal.

A imobilização e a emissão de carbono em diferentes etapas dos processos produtivos apresentaram comportamentos distintos entre as duas culturas. O eucalipto, por seu ciclo longo e alta taxa de acúmulo de biomassa lenhosa, demonstrou maior potencial de sequestro de carbono, o que o posiciona como uma cultura florestal estratégica para programas de mitigação das mudanças climáticas. A capacidade de armazenamento de carbono no solo e o uso posterior da madeira em produtos de longa duração ampliam os benefícios ambientais do seu cultivo.

A cana-de-açúcar, embora apresente um ciclo produtivo mais curto, mostrou-se eficiente na incorporação de carbono durante a fase vegetativa, especialmente em sistemas mecanizados com aproveitamento da palhada e produção de bioenergia. No entanto, as emissões associadas ao uso intensivo de insumos e à mecanização podem comprometer o balanço final de carbono, sobretudo em sistemas convencionais sem práticas sustentáveis.

Portanto, o estudo evidencia que o desempenho ambiental de ambas as culturas depende fortemente das práticas de manejo adotadas. O eucalipto apresenta saldo de carbono mais positivo quando comparado à cana-de-açúcar, principalmente em sistemas com plantios contínuos e manejo adequado. Por outro lado, a cana-de-açúcar oferece oportunidades de ganhos ambientais quando integrada a sistemas de produção limpa, com reaproveitamento de resíduos e redução da emissão de GEE.

Essas constatações reforçam a importância de se considerar o ciclo de vida completo das culturas e os contextos tecnológicos e regionais em que estão inseridas, permitindo uma análise mais precisa e estratégica para políticas públicas e tomadas de decisão voltadas à sustentabilidade da produção agrícola e florestal.

DISCUSSÃO

Considerações sobre o clima e mudanças climáticas

A atmosfera terrestre é composta por uma camada de gases formada, principalmente, por nitrogênio (78,09%), oxigênio (20,95%), argônio (0,93%) e dióxido de carbono (0,03%), além de hélio, metano, óxido de nitrogênio e outros gases em menor quantidade (Khandekar *et al.*, 2005). A combinação desses gases resulta no efeito estufa natural, um fenômeno essencial para manter a temperatura terrestre em níveis adequados à manutenção da vida no planeta (United Nations Framework Convention On Climate Change, 2007).

Alguns desses gases são classificados como Gases de Efeito Estufa (GEEs), pois possuem a capacidade de reter parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, contribuindo para a regulação do clima (Assad *et al.*, 2021). Dentre os principais GEEs associados às atividades agrícolas, destacam-se o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O).

O CO₂ é liberado, principalmente, durante a fotossíntese, a respiração das plantas e a decomposição e combustão de matéria orgânica (Taiz *et al.*, 2017). O N₂O, por sua vez, tem suas principais emissões associadas aos processos de nitrificação e desnitrificação. Já o CH₄ é emitido predominantemente em condições anaeróbicas do solo, além de ser gerado pela combustão incompleta de matéria orgânica (Garcia, 2011).

Mecanismos de desenvolvimento limpo

Além das fontes naturais, as atividades humanas intensificam significativamente as concentrações de CO₂ na atmosfera, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento (IPCC, 2023). Esse aumento descontrolado contribui para o agravamento do efeito estufa e das mudanças climáticas. Para mitigar esses impactos, conferências climáticas internacionais estabelecem acordos globais visando à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), promovendo o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e políticas de transição para uma economia de baixo carbono (Comissão Europeia, 2023). Esses mecanismos de desenvolvimento limpo são essenciais para equilibrar o crescimento econômico com a preservação ambiental, garantindo um futuro mais sustentável para as próximas gerações (WWF, 2023).

Nas últimas décadas, muitos países têm unido esforços para definir metas e estratégias de enfrentamento às mudanças climáticas (IPCC, 2023). Em 2009, ocorreu a 15^a Conferência das Partes – COP 15, na qual o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de GEE, estabelecendo 2020 como o prazo para o cumprimento das metas. Como desdobramento desse compromisso, foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).

Em 2010, foi criado o Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), com o objetivo de incentivar práticas agrícolas mais sustentáveis. Já em 2015, na 21^a Conferência das Partes – COP 21, realizada em Paris, o Brasil reafirmou seu compromisso com a redução das emissões. O Acordo de Paris, segundo Ghezloun *et al.* (2017), visa limitar o aumento da temperatura global a 2°C em relação aos níveis pré-industriais. Para atingir esse objetivo, foi estabelecida a meta de reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025, tomando como referência os níveis de 2005.

Segundo dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), o Brasil obteve êxito na adoção dos compromissos internacionais, superando as metas estipuladas para 2020. Os resultados indicam que o país mitigou 113% da meta de redução de CO₂ definida em 2009 e alcançou 154% da meta estabelecida no Plano ABC.

Apesar dos avanços, o setor agropecuário continua sendo um grande emissor de poluentes devido a diversas atividades produtivas, como o uso de maquinário agrícola, transporte de cargas, aplicação de fertilizantes e processamento de produtos (Claudino; Talamini, 2013). Segundo Carmo (2016), as emissões resultam principalmente da combustão incompleta nos motores de maquinários e veículos, liberando poluentes como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos (HC).

A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta perene da família Poaceae, gênero *Saccharum*, que fixa cerca de 100 mg de CO₂ por dm² de área foliar a cada hora. Desenvolve-se preferencialmente em regiões de clima quente (Paula *et al.*, 2010). Possui múltiplos usos, sendo empregada como forragem na alimentação pecuária e como matéria-prima para a produção de açúcar, álcool, cachaça e rapadura na indústria, conferindo-lhe grande importância econômica e social (Garcia, 2011).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2008), a energia proveniente da cana-de-açúcar é a segunda principal fonte energética primária do Brasil, ficando atrás apenas do petróleo. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011), o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de cana-de-açúcar, açúcar e etanol, com mais de sete milhões de hectares plantados e uma produção superior a 600 milhões de toneladas em 2010.

O ciclo da cana é anual, com corte seguido de rebrota. Dependendo da qualidade e da produtividade, esse ciclo pode ocorrer de três a seis vezes (Vilar, 2020). A reprodução ocorre a partir do colmo, sendo a primeira brotação denominada cana-planta, enquanto os rebrotos são chamados de cana-soca (Silva; Silva, 2012).

A cultura do eucalipto

As florestas plantadas no Brasil alcançaram 9 milhões de hectares em 2019 (Agência Brasil, 2020). Desse total, 77% correspondem ao eucalipto, totalizando 6,97 milhões de hectares (IBÁ, 2020).

De acordo com Soares *et al.* (2014), cerca de 65% da produção nacional de eucalipto está concentrada nas regiões Sudeste e Nordeste. Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2012), a distribuição regional é a seguinte: Sudeste (54,2%), Nordeste (16,4%), Centro-Oeste (12,2%), Sul (11,8%) e Norte (5,5%).

As principais espécies de eucalipto cultivadas no Brasil incluem *Eucalyptus grandis*; *Eucalyptus saligna*; *Eucalyptus urophylla*; *Eucalyptus viminalis*; híbridos de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus dunnii*.

A ampla aceitação do cultivo de eucalipto no Brasil deve-se a diversos fatores, como seu rápido crescimento, alta produtividade, lucratividade e a variedade de produtos derivados, incluindo papel, celulose, móveis, painéis de madeira, pisos, carvão e materiais para a construção civil (De Amorim *et al.*, 2021).

Além desses fatores, há também um impacto ambiental positivo. De acordo com Lelis (2019), um hectare de eucalipto pode estocar até 184 toneladas de CO₂ ao longo de um ciclo de vida de sete anos. O reflorestamento com eucalipto contribui para a preservação das matas, pois fornece matéria-prima para a indústria, reduzindo a pressão sobre as florestas nativas (Sociedade Nacional de Agricultura, 2017).

Metodologias de quantificação de sequestro de carbono

A estimativa do estoque de carbono depende da quantificação da biomassa, definida como a massa orgânica produzida por unidade de área e expressa em termos de peso em carbono, peso seco e peso úmido (RATUCHNE *et al.*, 2016). Segundo Carvalho e Castillo (2018), a biomassa existente em uma floresta pode ser quantificada por métodos diretos ou indiretos, considerando-se a parte aérea, a matéria orgânica acima do solo e as raízes.

No método indireto, utilizam-se equações que relacionam variáveis como altura, volume e diâmetro para estimar a biomassa das árvores e obter valores para o total da floresta (Higa *et al.*, 2014). Esse método é mais empregado em florestas de grande extensão territorial e baseia-se no diâmetro à altura do peito (DAP), medido a 1,30 m do solo, e na altura total dos indivíduos (Ht), obtidos por meio de inventário florestal (Silveira *et al.*, 2008).

Os métodos diretos, considerados destrutivos, envolvem a derrubada de árvores, a remoção da serrapilheira e das raízes. Nesse procedimento, árvores amostrais são cortadas, e o material acima do solo, as raízes e a matéria orgânica do solo são coletadas em diferentes locais. Determinam-se o volume, a massa e a umidade desses materiais para calcular a biomassa seca total (Silveira *et al.*, 2008; Ratuchne *et al.*, 2016).

Após a estimativa da biomassa, o estoque de carbono é calculado multiplicando-se o teor de carbono dos indivíduos pela biomassa total estimada (Jacovine *et al.*, 2008; Ratuchne *et al.*, 2016).

Metodologias de quantificação utilizadas nos artigos de referência

O balanço das emissões de GEE inclui as fontes agrícolas e os maquinários utilizados nas operações de preparo, manutenção e colheita. O consumo de combustíveis fósseis e a adubação nitrogenada são os maiores responsáveis pelas emissões de GEE. No entanto, outras fontes podem ser relevantes, dependendo do manejo adotado no sistema de plantio (Portela; Leite, 2017).

Os principais GEE relacionados às práticas agrícolas e florestais são o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) (Vergé *et al.*, 2007). No Brasil, as práticas de mudança no uso da terra, especialmente a conversão de áreas florestais para uso agropecuário, representam a maior parcela das emissões líquidas de CO₂

(Tsai *et al.*, 2024). Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) 2010, cerca de 75% do CO₂ emitido para a atmosfera provém de práticas agrícolas e do desmatamento.

Os maquinários e veículos utilizados nos processos agrícolas e florestais são majoritariamente movidos a diesel (Brasil Agro, 2024). Segundo Carvalho (2011), veículos que utilizam esse combustível emitem mais CO₂ por unidade de volume ou peso de combustível do que outros modais motorizados. A queima nos motores é incompleta e, portanto, há também a liberação de outros poluentes, entre eles os GEE. Por isso, ao calcular as emissões de CO₂ por volume de combustível, utiliza-se o conceito de CO₂ equivalente.

O valor utilizado por Carvalho (2011) é um fator de emissão médio de 2,6 kg de CO₂ para cada litro de diesel queimado na combustão. O manual do IPCC utiliza dados de emissões de veículos pesados europeus, que se assemelham aos veículos brasileiros, e apresenta o valor de 2,67 kg de CO₂/l (Álvares, 2009). O valor médio de 0,5 kg de CO₂ emitido para produzir e distribuir o combustível também é somado, totalizando cerca de 3,2 kg de CO₂ para cada litro de diesel consumido.

Fontes de emissão avaliadas no cultivo de eucalipto

As variáveis analisadas para fazer a quantificação das emissões no ciclo produtivo do eucalipto incluem as atividades silviculturais, de colheita, de transporte e de gestão florestal (inventário, gestão e proteção florestal) (Souza *et al.*, 2020).

Na Tabela 1 estão listadas as operações agrícolas realizadas por meio de mecanização e que, portanto, são consumidoras de combustíveis fósseis e emissoras de GEE. É importante ressaltar que as atividades descritas na tabela 1 trata – se das operações mais comuns empregadas em um ciclo vida do eucalipto, porém, cada área possui suas particularidades que podem demandar algumas operações diferente das citadas abaixo.

Tabela 1. Descrição das operações realizadas durante um ciclo do cultivo de eucalipto.

Atividade	Operações Mecanizadas	
	Operações Agrícolas	
Preparo do solo e plantio	Abertura de aceiros	
	Limpeza da área	
	Subsolagem	
	Plantio mecanizado	
	Irrigação	
	Adubação de cobertura	
	Aplicação de herbicidas	
	Combate a formigas	
	Construção de estradas	
	Manutenção de estradas	
Colheita	Corte	
	Extração	
	Processamento	
	Carregamento	
	Transporte de madeira	

Fonte: Santarosa *et al.* (2014).

Fontes de emissão avaliadas no cultivo de cana-de-açúcar

As variáveis analisadas para fazer a quantificação das emissões em canaviais incluem:

Tabela 2. Fontes de emissão de GEE para o cultivo de cana de açúcar.

Setor	Fontes de emissão	
	Atividade	Gases emitidos
Maquinário	Consumo de combustíveis fósseis	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
	Aplicação de calcário	CO ₂
Agrícola	Aplicação de fertilizantes nitrogenados	N ₂ O
	Queima de resíduos de cana de açúcar	CH ₄ e N ₂ O
	Aplicação de defensivos agrícolas	

Fonte: Resende *et al.* (2001).

Na quantificação das emissões em cultivos de cana de açúcar estão presentes as atividades de preparo do solo, aplicação de insumos, colheita e transporte; fontes de CO₂ provenientes da queima do óleo diesel necessário para funcionamento das máquinas.

A Tabela 3 mostra as práticas mais comumente empregadas nesses sistemas.

Tabela 3. Descrição das operações mecanizadas em cultivo de cana

Atividade	Operações Mecanizadas	
	Operações Agrícolas	
Preparo do solo e plantio	Sistematização do terreno	
	Grade pesada	
	Aplicação de calcário	
	Aplicação de gesso	
	Subsolagem	
	Grade média	
	Grade niveladora	
	Sulcos e adubação	
	Distribuição de mudas	
	Aplicação de inseticida	
Colheita	Plantio	
	Aplicação de herbicida	
	Colhedora	
	Carregamento	
	Transporte	

Fonte: Nova Cana (2025).

Para a análise e comparação dos dados, realizou-se um levantamento de diferentes estudos relativos ao balanço de carbono nos plantios de eucalipto e cana-de-açúcar, considerando as emissões e mitigações de CO₂ em cada uma das variáveis avaliadas e citadas nas tabelas acima (Souza *et al.*, 2019).

No caso dos plantios de eucalipto, o balanço de carbono é calculado pela diferença entre o carbono imobilizado pela floresta durante o ciclo de produção e a soma das emissões necessárias para sua produção (Brianezi *et al.*, 2019).

Já nos plantios de cana-de-açúcar, esse balanço é obtido a partir da diferença entre o carbono sequestrado e a soma das emissões dos processos produtivos, incluindo, comumente, o CO₂ emitido na cogeração de eletricidade (Macedo, 1998).

Com os dados obtidos, será possível realizar uma análise quantitativa do saldo de carbono dessas culturas e compará-las, obtendo informações relevantes sobre a imobilização e emissão de carbono em diferentes etapas dos ciclos produtivos do eucalipto e da cana-de-açúcar. Essa abordagem contribuirá para a compreensão do impacto ambiental de cada cultura e poderá auxiliar na definição de estratégias mais sustentáveis para a produção agrícola (Soares *et al.*, 2009).

Cana de açúcar

Emissões

No ciclo do cultivo de cana, que possui duração de um ano os gastos de óleo diesel foram avaliados em dois estudos diferentes realizados por Paula *et al.* (2010) e Garcia (2011). O consumo, em litros por ha/ano, para cada etapa do ciclo: plantio, manutenção das soqueiras, colheita e transbordo e as respectivas atividades avaliadas em cada etapa estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Consumo de óleo diesel no cultivo da cana-de-açúcar.

Consumo de óleo diesel no cultivo da cana-de-açúcar			
Atividades Plantio			
Cana (Artigo 1)	Litros / ha	Cana (Artigo 2)	Litros / ha
Aplicação de calcário	3,73	Aplicação de calcário e gesso	7,46
Erradicação química	1,60	Eliminação química das soqueiras	1,6
Erradicação Mecânica	11,09	Eliminação mecânica das soqueiras	11,09
Grade pesada I	21,23	Gradagem Pesada I	21,23
Subsolagem	26,00	Subsolagem	26
Grade pesada II	21,23	Gradagem Pesada II	20,44
Grade pesada III	13,64	Gradagem Pesada III	20,44
Transporte de Mudas	17,40	Gradagem de acabamento	9,38
Distribuição de Mudas	6,67	Sulcação, adubação, distribuição	
Aplica.Ins./Cob.Suco	2,67	de mudas, fechamento do sulco e	15,99
Aplicação de Herbicida	1,60	aplicação de inseticida	
Aplicação Torta de Filtro	9,60	Transbordo para distribuição de mudas	6,43
Cultivo Mecânico	6,15	Aplicação de herbicida	1,6
		Cultivo mecânico	6,15
Total	142,61	Total	147,81
Atividades Soqueira			
Cana (Artigo 1)		Cana (Artigo 2)	
Aleiramento da Palha	2,67	Cultivo tríplice operação	7,08
Cultivo Mecânico	7,08	Adubação com torta de filtro	5,33
Vinhaça (Transporte + Aplicação)	7,41	Aplicação de Herbicida	1,60

Aplicação de Herbicida	1,60		
Total	18,76	Total	14,01
Atividades Colheita			
Cana (Artigo 1)		Cana (Artigo 2)	
Colheita Mecânica	72,72	Colheita Mecânica	40,40
Transbordo	18,45	Transbordo	9,00
Total	91,17	Total	49,40
Total geral	252,54	Total geral	211,22

Fontes: Paula *et al.* (2010); Garcia (2011).

A média total das atividades analisadas foi de aproximadamente 232 kg de diesel/ha/ano. Com base no valor de referência de 3,2 kg de CO₂ emitidos para cada litro de diesel consumido, as atividades mecanizadas no ciclo de produção da cana emitem cerca de 742 kg de CO₂ eq/ha/ano. Garcia (2011) encontrou valores que variam entre 607 e 822 kg CO₂ eq/ha/ano, dependendo dos diferentes cenários de manejo e colheita.

Garcia e von Sperling (2010) mostra que a maior parte das emissões na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar ocorre durante a queima do canavial. Neste estudo, essa prática não foi considerada no cálculo das emissões, pois já está sendo gradualmente abandonada. Além disso, diversos estudos já demonstraram seu alto impacto ambiental e inviabilidade para um balanço de carbono positivo.

Segundo Garcia (2011), ainda que a introdução da colheita mecanizada possa reduzir em aproximadamente 65% as emissões da queima, essa prática ainda gera emissões devido ao uso de combustíveis fósseis. No estudo, a colheita mecanizada resultou na emissão de 238 kg CO₂ eq/ha/ano.

Sequestros e balanço

Na produção de uma tonelada de fitomassa de cana-de-açúcar em matéria seca, há a fixação mínima de 0,42 t de carbono. Esse valor equivale a 1,54 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) removidas da atmosfera (Paula *et al.*, 2010).

Durante a safra de 2006/2007, as culturas da região Centro-Sul fixaram, em média, 53,40 t/ha/ano de eqCO₂. A adubação nitrogenada nessas culturas emitiu cerca de 0,35 t/ha/ano de eqCO₂, enquanto a queima de combustíveis fósseis gerou 0,55 t/ha/ano de eqCO₂, totalizando um passivo ambiental de 0,90 t/ha/ano de eqCO₂. Dessa forma, ao concluir o ciclo, obteve-se um ativo ambiental de 52,50 t/ha/ano de eqCO₂ (Paula *et al.*, 2010).

A cana-de-açúcar é matéria-prima para a produção de etanol, desempenhando assim um importante papel ambiental, pois é uma das alternativas para a diminuição da emissão de GEE (Marin; Nassif, 2013). A substituição do uso de combustíveis fósseis por combustíveis provenientes de fontes renováveis é um assunto cada vez mais debatido e apresenta resultados promissores (Andrade, 2013).

De acordo com Soares *et al.* (2009) o total de energia fóssil utilizada nas operações de campo para a produção de cana-de-açúcar, incluindo o transporte para a usina e o fornecimento de insumos, foi de aproximadamente 12.329,7 MJ/ha/ano. Um hectare de cana é capaz de produzir 6.510 litros de etanol, e um litro de etanol gera 21,45 MJ de energia. Dessa forma, um hectare de cultivo de cana produz 139.639 MJ de energia, o que corresponde a 11 vezes a energia fóssil investida para sua produção.

Segundo a CONAB (2014), a queima de etanol como combustível pode reduzir em até 70% as emissões de CO₂ na atmosfera quando comparada à gasolina. Durante a safra de 2013/2014, foram colhidas 597 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, resultando na produção de aproximadamente 27,96 bilhões de litros de etanol.

Eucalipto**Emissões**

No ciclo do cultivo de eucalipto, que possui duração de 7 anos, o consumo de óleo diesel em litros por hectare para cada etapa do ciclo: plantio e manutenção, colheita e transporte e gestão florestal assim como as respectivas atividades avaliadas em cada etapa estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Consumo de óleo diesel no cultivo do eucalipto

Consumo de óleo diesel no cultivo do eucalipto	
Atividade	Consumo L/ha
Plantio e manutenção	
Abertura de aceiros	217,80
Limpeza de área	27,50
Subsolagem	43,60
Plantio mecanizado	50,00
Irrigação	56,40
Adubação de cobertura	178,20
Aplicação de herbicidas	100,95
Combate a formigas	44,55
Construção de estradas	140,65
Manutenção de estradas	168,20
Colheita e transporte	
Corte	73,50
Extração	107,80
Processamento	102,50
Carregamento de madeira	98,00
Manutenção mecânica	580,50
Transporte de madeira	609,80
Gestão florestal	
Inventário florestal	487,50
Proteção florestal	525,00
Gestão florestal	525,00
Transporte de pessoal	676,20
Total	4813,65

Fonte: Souza (2019).

O consumo de combustível analisado corresponde a um cultivo de eucalipto com espaçamento de 3 x 3 metros entre as árvores no momento do plantio e uma taxa de sobrevivência de 95% após sete anos de crescimento. Esse arranjo resulta em uma densidade aproximada de 1.055 árvores por hectare, gerando um volume médio de 245 m³ de madeira por hectare ao final do ciclo produtivo. Considerando que a combustão de cada litro de diesel libera 3,2 kg de CO₂ na atmosfera, estima-se que as operações mecanizadas ao longo do ciclo de produção do eucalipto resultem em uma emissão total de aproximadamente 15.403,68 kg de CO₂eq por hectare.

Segundo Gonçalves (2018), na etapa de silvicultura do processo de produção de celulose – que abrange desde o plantio de mudas até a colheita, realizada sete anos após o plantio – são emitidas 61.401,82 toneladas de CO₂eq. Além dos combustíveis fósseis utilizados no transporte e no funcionamento de maquinário, o uso de fertilizantes, corretivos e energia elétrica também contribuem para a emissão de GEE.

Segundo Carmo (2016), a atividade de transporte florestal foi a maior emissora de carbono para a atmosfera, com aproximadamente 335 kg C/ha, representando cerca de 56% da emissão total. A colheita foi a segunda maior fonte de emissão, com 197,91 kg C/ha, seguida da silvicultura, com 53,26 kg C/ha, e da construção e manutenção de estradas, com 11,18 kg C/ha. As atividades de administração e proteção foram responsáveis pela menor emissão, cerca de 2,86 kg C/ha. O total de emissões nas atividades mecanizadas encontrado nesse estudo foi de 600,21 kg C/ha.

Nesse contexto, Face (1994) assumiu que uma tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO₂, resultando em 2.202 kg/ha de CO₂. Esse estudo não apresenta os dados em termos de CO₂eq.

Sequestros

Em um estudo sobre florestas de eucalipto no Espírito Santo, Reis *et al.* (1994) encontraram um total de sequestro de carbono de 10,32 t/ha/ano. Desse total, 65% provêm exclusivamente da biomassa do tronco. Os autores também indicam que pelo menos 20% podem ser adicionados a essa estimativa, devido à produção média de matéria orgânica morta ao longo do ciclo de sete anos. Assim, o potencial total de sequestro de carbono alcança 12,38 tC/ha/ano.

Paixão (2004) determinou um total de 71,13 toneladas de carbono por hectare em florestas com seis anos de idade, o que equivale a aproximadamente 11,8 tC/ha/ano.

Brasil (2002), em um estudo do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), apresentou resultados indicando que as florestas de eucalipto fixaram aproximadamente 40,7 milhões de toneladas de carbono entre os anos de 1990 e 1994. O mesmo estudo revelou que a maior parte do carbono fixado pelas árvores está concentrada nos troncos.

Além disso, avanços científicos têm atualizado os dados sobre o estoque de carbono em plantios de eucalipto. Estudos da Embrapa Florestas revelam que a perda de carbono em solos convertidos para plantios florestais é de apenas 5%, contrariando estimativas anteriores que apontavam para uma perda de 33%. Essa atualização reflete uma compreensão mais precisa das especificidades dos plantios florestais no Brasil e destaca o potencial dessas florestas na mitigação dos gases de efeito estufa (Mais Floresta, 2024).

Em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), o eucalipto também demonstra eficiência no sequestro de carbono. Uma avaliação realizada na região do Cerrado mineiro acompanhou unidades de referência tecnológica de ILPF durante 12 anos. Os resultados mostraram que, em plantios sem desbaste, as árvores capturaram até 191,9 Mg/ha de CO₂ em 10 anos, enquanto plantios com desbaste apresentaram captura de até 122,9 Mg/ha de CO₂ no mesmo período. A média de CO₂ capturado pelas árvores foi de aproximadamente 18 Mg/ha/ano, evidenciando a capacidade das florestas de rápido crescimento na captura de carbono (Almeida *et al.*, 2023).

Balanço

De acordo com Souza (2019), as florestas plantadas sequestram um total de 187,35 t CO₂/ha ao longo de um ciclo produtivo de sete anos. Durante esse mesmo período, as emissões provenientes das atividades de plantio, manejo e transporte da madeira totalizam 15,40 t CO₂/ha. Assim, o balanço de carbono apresenta um saldo positivo de 171,95 t CO₂/ha, evidenciando o potencial dessas florestas na mitigação dos gases de efeito estufa.

Resultados semelhantes foram observados na pesquisa de Carmo (2016), que também indicou um saldo positivo no balanço de carbono. Nesse estudo, as florestas plantadas sequestraram cerca de 42 t C/ha, enquanto as emissões ao longo do ciclo produtivo foram de aproximadamente 600 kg C/ha. Dessa forma, as emissões representam apenas 1,43% do total de carbono sequestrado, resultando em um aproveitamento eficiente do potencial de fixação de carbono dessas áreas florestais.

Os cultivos de eucalipto apresentam valores bastante discrepantes entre si, quando comparados aos estudos de cana-de-açúcar que apresentam resultados mais similares e coerentes. Essa discrepância se deve a muitos fatores, como espaçamento adotado nos plantios (Brianezi *et al.*, 2009), temperatura do local (Assad *et al.*, 2021), susceptibilidade a pragas e doenças (De Amorim *et al.*, 2021), resistência à seca e qualidade do solo, que têm relação direta com o crescimento e volume de madeira e, conseqüentemente, com a estocagem de carbono (Schumacher; Witschoreck, 2004). Além disso, diferenças no manejo florestal (Santarosa *et al.*, 2014) e a distância da floresta até as indústrias, que impacta diretamente as emissões (Gonçalves *et al.*, 2018), também são fatores determinantes

Brianezi *et al.* (2009), constatou que as emissões de GEE foram maiores nos menores espaçamentos, devido ao maior número de plantas por área, que exige fertilização e calagem em maior quantidade. No entanto, o balanço de carbono total é maior nesse espaçamento devido ao maior número de plantas. Por sua vez, ao se considerar o balanço por planta, maiores espaçamentos possuem balanços maiores, devido ao maior incremento de volume.

Apesar das diferenças nos valores, todos os espaçamentos adotados, assim como todos os estudos de balanço de carbono com eucalipto apresentaram balanço positivo, resultado que enfatiza a importância de culturas arbóreas para a mitigação de mudanças climáticas e como sumidouro de carbono (Brianezi *et al.*, 2009).

Nos cultivos de cana-de-açúcar, considerando colheita mecanizada da cana crua, o resultado dos balanços também é positivo, embora os valores sejam menores quando comparado ao eucalipto (Paula *et al.*, 2010).

A cultura da cana-de-açúcar se torna muito importante sob o aspecto ambiental ao considerar a produção do etanol e a sua contribuição para a diminuição da poluição atmosférica, por ser um combustível proveniente de fonte renovável e que é capaz de compensar e gerar créditos positivos de carbono no setor agrícola (Macedo, 1998; Marin; Nassif, 2013).

CONCLUSÃO

Este estudo comparou o balanço de carbono nos ciclos produtivos do eucalipto e da cana-de-açúcar, analisando a fixação e emissão de carbono ao longo de seus processos produtivos. Os resultados demonstraram que ambas as culturas apresentam balanços de carbono positivos, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas, embora com características distintas.

O cultivo do eucalipto mostrou um maior potencial de sequestro de carbono, principalmente devido ao seu crescimento rápido e à capacidade de estocagem de biomassa ao longo do ciclo produtivo. No entanto, as emissões associadas ao manejo e transporte da madeira são fatores que influenciam a variabilidade nos resultados. Já a cana-de-açúcar, apesar de apresentar um balanço de carbono inferior ao do eucalipto, desempenha um papel fundamental na transição energética, uma vez que a produção de etanol reduz significativamente a dependência de combustíveis fósseis e suas emissões associadas.

Os dados analisados indicam que a escolha entre essas culturas deve levar em consideração fatores regionais, condições climáticas, práticas de manejo e a infraestrutura disponível para transporte e processamento. Além disso, a implementação de estratégias como o uso de sistemas agroflorestais, otimização do manejo e redução do consumo de combustíveis fósseis pode potencializar os benefícios ambientais de ambas as culturas.

Dessa forma, este estudo reforça a necessidade de políticas públicas e incentivos voltados à ampliação de práticas agrícolas e florestais mais sustentáveis, promovendo uma economia de baixo carbono. Além disso, pesquisas futuras podem aprofundar a análise sobre o impacto do manejo e da conversão do uso da terra nesses sistemas, bem como avaliar novas tecnologias e práticas que reduzam ainda mais as emissões e otimizem o sequestro de carbono.

REFERÊNCIAS

ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2012**: ano base 2011. Brasília: ABRAF, 2012.

AGÊNCIA BRASIL. **Florestas plantadas no Brasil alcançam 10 milhões de hectares em 2019**. [Rio de Janeiro, RJ]: Agência Brasil, 2020. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-10/florestas-plantadas-no-brasil-alcancam-10-milhoes-de-hectares-em-2019>. Acesso em: 08 fev. 2025.

ANDRADE, R. O. Mecanização da colheita de cana diminui emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. **Revista Pesquisa FAPESP**, 2013. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/mecanizacao-da-colheita-de-cana-diminui-emissao/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

ALMEIDA, R. G. *et al.* **Sequestro de CO₂ em árvores de eucalipto no sistema ILPF**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 244, Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149131/1/Boletim-244-Sequestro-de-CO2-em-arvores-de-eucalipto-no-sistema-ILPF.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

ÁLVARES, J. L. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2010. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1578/1/td_1606.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.

ASSAD, E. D. *et al.* **Mudanças do clima e a cultura do eucalipto**. In: OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 357-394.

BAYER, C. *et al.* Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, v. 7, p. 55-118, 2011.

BENTO, J. A. N.; VIEIRA FILHO, J. E. R. **Biocombustíveis e economia de baixo carbono no Brasil**. Brasília, DF: Ipea, jul. 2023. 38 p. <http://dx.doi.org/10.38116/td2899-port>

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Emissões e Remoções de Dióxido de Carbono Devidas a Mudanças nos Estoques de Florestas Plantadas**. Brasília: MCT, 2002. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/12.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

BRASIL AGRO. **Quais são os combustíveis do futuro para máquinas agrícolas?** Brasil Agro, 2024. Disponível em: <https://www.brasilagro.com.br/conteudo/quais-sao-os-combustiveis-do-futuro-para-maquinas-agricolas.html>. Acesso em: 11 fev. 2025.

BRIANEZI, D. *et al.* Balanço de carbono em monocultivo de eucalipto com diferentes arranjos espaciais. **Revista Brasileira De Agropecuária Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 27–33, 2019. <https://doi.org/10.21206/rbas.v9i1.3056>

CARMO, F. C. A. **Balanço da emissão de gases carbônicos nas operações florestais e sequestro de carbono em florestas plantadas no Espírito Santo**. Orientador: Nilton Cesar Fiedler. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2016.

CARVALHO, C. H. R. Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**, São Paulo, 2011.

CARVALHO, S. D.; CASTILLO, J.A. Influência da luz na interação planta- filosfera. **Fronteiras na ciência das plantas**, v. 9, p. 1482, 2018.

CLAUDINO, E. S.; TALAMINI, E. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 5, p. 575-582, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000100011>

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v. 1, Safra 2014/15, n. 3, Brasília, 2014.

COMISSÃO EUROPEIA. **Causas das alterações climáticas**. Bruxelas: União Europeia, 2023. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_pt. Acesso em: 7 fev. 2025.

DE AMORIM, V. S. S. *et al.* Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e318101119604-e318101119604, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19604>

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Cana-de-açúcar já é a segunda fonte primária de energia no Brasil. *In*: EPE. **Balanço Energético Nacional: Resultados preliminares**, 2008.

ESTEVAM, C. G. *et al.* Potencial de descarbonização da soja brasileira. **Agroanalysis**, v. 43, n. 5, p. 32-33, 2023.

GARCIA, J. C. C. **Emissão de Gases de Efeito Estufa na Obtenção do Etanol de Cana-de-Açúcar: Uma Avaliação Considerando Diferentes Cenários Tecnológicos em Minas Gerais**. Orientador: Eduardo von Sperling. 2011. 198 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011.

GARCIA, J. C. C.; VON SPERLING, E. Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.15, n. 3, p. 217-222, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522010000300003>

GHEZLOUN, A. *et al.* The COP 22 New commitments in support of the Paris Agreement. **Energy Procedia**, v.119, n.1, p.10-16, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.040>

GONÇALVES, C. F. *et al.* Pegada de carbono do ciclo de vida da celulose de eucalipto: estudo de caso numa empresa baiana. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n4.31816>

HIGA, R. C. V. *et al.* **Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1011409/1/Doc.266.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual Ibá**, 2020. Brasília, DF, Brasil, 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2025.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Anuário IBÁ 2017**: ano base 2016. Brasília, DF, Brasil, 2017. Disponível em: https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 6 fev. 2025.

IPCC. International Panel on Climate Change. **Intergovernmental Panel Climate Change**: Working Group III. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

IPCC. International Panel on Climate Change. **Climate Change 2021**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

IPCC. International Panel on Climate Change. **Climate Change 2023**: Synthesis Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

JACOVINE, L. A. G. *et al.* Sequestro de carbono em povoamentos florestais de eucalipto e a geração de créditos de carbono. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 29, n. 242, p. 90-104, 2008.

KHANDEKAR, M. L. *et al.* The global warming debate: A review of the state of science. **Pure and Applied Geophysics**, v. 162, n. 8-9, p. 1557–1586, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-2683-x>

LELIS, A. **Florestas plantadas de eucalipto sequestram carbono da atmosfera**: estudo do ICA mostra que estoque de CO₂ chega a 187 toneladas por hectare em um ciclo de sete anos. Universidade Federal de Minas Gerais: UFMG, 2009. Disponível em: <https://ufmg.br/comunicacao/noticias/florestas-plantadas-de-eucalipto-sequestram-carbono-da-atmosfera>. Acesso em 6 fev. 2025.

MACEDO, I. C. **Balanco de energia na produção de açúcar e álcool**: utilização de bagaço e palhiço. Brasília, DF: EMBRAPA, 1998. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/597320/1/doc133.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

MAIS FLORESTA. **Ciência atualiza dados de estoque de carbono em plantios de eucalipto de MS e mais 8 estados**. Mais Floresta, 2024. Disponível em: <https://www.maisfloresta.com.br/ciencia-atualiza-dados-de-estoque-de-carbono-em-plantios-de-eucalipto-de-ms-e-mais-8-estados>. Acesso em: 11 fev. 2025.

MARENGO, J. A. *et al.* **Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia**. São Paulo: CETESB, 2012. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/nobre_reid_veiga_fundamentos_2012.pdf. Acesso em: 5 fev. 2025.

MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 232-239, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000200015>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Crescimento da economia brasileira é impulsionado pela alta de 15% da agropecuária em 2023**. Brasília, DF: Ministério da Agricultura e Pecuária, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/crescimento-da-economia-brasileira-e-impulsionado-pela-alta-de-15-da-agropecuaria-em-2023>. Acesso em: 5 fev. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Biomassa é a segunda maior fonte de energia em 2016**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biomassa-e-a-segunda-maior-fonte-de-energia-em-2016>. Acesso em: 20 abr. 2025.

NOVA CANA. **Mecanização da produção de cana-de-açúcar**. NovaCana, 2025. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/mecanizacao-producao-cana-de-acucar>. Acesso em: 11 fev. 2025.

PAIXÃO, F. A. **Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de alternativas de uso de um povoamento de eucalipto**. 2004. 50f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

PAULA, M. *et al.* Fixação de carbono e a emissão dos gases de efeito estufa na exploração da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 3, p. 633–640, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000300015>

PORTELA, M. G. T.; LEITE, L. F. C. Emissões de GEE pela agricultura: o caso dos cultivos de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 151-169, 2017.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Você sabe como os gases de efeito estufa aquecem o planeta?** Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/voce-sabe-como-os-gases-de-efeito-estufa-aquecem-o-planeta>. Acesso em: 5 fev. 2025.

RATUCHNE, L. C. *et al.* Estado da Arte na Quantificação de Biomassa em Raízes de Formações Florestais. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, RJ, v. 23, n. 3, p. 450-462, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.131515>

REIS, G. G. *et al.* Sequestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. *In*: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂: UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGÓCIOS PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p.155-195.

RESENDE, A. S. de. *et al.* **Efeito estufa e o sequestro de carbono em sistemas de cultivo com espécies florestais e na cultura de cana-de-açúcar**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2001. 23 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/597320/1/doc133.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

SANTAROSA, E. *et al.* **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 138 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1010933/1/ApostilaSerieTTEucalipto.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

SCHUMACHER, M.V.; WITSCHORECK, R. Inventário de carbono em povoamentos de *Eucalyptus* ssp. nas propriedades fumageiras do sul do Brasil: “um estudo de caso”. *In*: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE FIXAÇÃO DE CARBONO, 2., 2004, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba, PR: UFPR, 2004. p.111-124.

SENADO FEDERAL. **Impactos das mudanças climáticas na agropecuária brasileira: riscos políticos, econômicos e sociais e os desafios para a segurança alimentar e humana**. Brasília, DF: Senado Federal, 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td313>. Acesso em: 4 fev. 2025.

SILVA, D. A. L. *et al.* Life cycle assessment of offset paper production in Brazil: hotspots and cleaner production alternatives. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 222-233, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.030>

SILVA, J. P. N.; SILVA, M. R. N. **Noções da Cultura da Cana-de-Açúcar** – Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 105 p.

SILVEIRA, P. *et al.* O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 1, jan./mar. 2008. <https://doi.org/10.5380/rf.v38i1.11038>

SOARES, L. H. B. *et al.* **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

SOARES, N. S. *et al.* Produto interno bruto do setor florestal brasileiro, 1994 a 2008. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 38, n. 4, p. 725-732, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000400015>

SOCHOROVÁ, L. *et al.* Long-term agricultural management maximizing hay production can significantly reduce belowground C storage. Agriculture, **Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 220, p. 104-114, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.026>

SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA. **Sustentabilidade dos reflorestamentos de eucalipto gera ganhos ambientais e econômicos**. Rio de Janeiro: SNA, 2017. Disponível em: <https://sna.agr.br/sustentabilidade-dos-reflorestamentos-de-eucalipto-gera-ganhos-ambientais-e-economicos/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

SOUZA, C. L. *et al.* Balanço de Carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no Norte de Minas Gerais. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 11, p. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2019.15160>

SOUZA, M. F. L. *et al.* Ciclo do Carbono: Processos Biogeoquímicos, Físicos e Interações entre Compartimentos na Baía de Todos os Santos. **Revista Virtual de Química**. v. 4, n. 5, 2012. <http://doi.org/10.5935/1984-6835.20120044>

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TSAI, D. *et al.* **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2023**. São Paulo, SP: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: https://oc.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/FINAL_SEEG_emissoes_2024_v7.pdf. Acesso em: 5 fev. 2025.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Uniting on Climate: A Guide to the Climate Change Convention and the Kyoto Protocol**. Bonn: UNFCCC, 2007. Disponível em: https://unfccc.int/resource/docs/publications/unitingonclimate_eng.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.

VERGÉ, X. P. C. *et al.* Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, p. 255-269, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.06.011>

VILAR, D. **Conheça os ciclos da cana-de-açúcar**. Agriconline, 6 out. 2020. Disponível em: <https://agronline.com.br/portal/artigo/conheca-os-ciclos-da-cana-de-acucar/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

WWF. World Wildlife Fund. **Efeito Estufa e Mudanças Climáticas**. Brasília: WWF Brasil, 2023. Disponível em: https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/educacaoambiental/conceitos/efeitoestufa_e_mudancasclimaticas/. Acesso em: 7 fev. 2025.