

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA
MADEIRA

ELOISA BUENO DA SILVA SENA

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS FLORESTAIS
POR MEIO DA INTRODUÇÃO DO MERCADO DE CARBONO
VOLUNTÁRIO NO ESPÍRITO SANTO

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2026

ELOISA BUENO DA SILVA SENA

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS FLORESTAIS
POR MEIO DA INTRODUÇÃO DO MERCADO DE CARBONO
VOLUNTÁRIO NO ESPÍRITO SANTO

Monografia apresentada ao
Departamento de Ciências Florestais e da
Madeira da Universidade Federal do
Espírito Santo, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro
Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2026

ELOISA BUENO DA SILVA SENA

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS FLORESTAIS POR
MEIO DA INTRODUÇÃO DO MERCADO DE CARBONO
VOLUNTÁRIO NO ESPÍRITO SANTO**

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovada em 06 de fevereiro de 2026.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANO RIBEIRO DE MENDONÇA**
Data: 09/02/2026 21:06:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **GILSON FERNANDES DA SILVA**
Data: 11/02/2026 17:11:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente
 **WENDEL SANDRO DE PAULA ANDRADE**
Data: 10/02/2026 09:46:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wendel Sandro de Paula Andrade
Universidade Federal do Espírito Santo

DEDICATÓRIA

Ao meu avô, Abel (*in memorian*), de quem eu herdei a coragem e o apreço pela natureza.

À minha avó, Maria, de quem eu herdei o sentimentalismo e o respeito pelas minhas raízes.

Aos meus pais, Bernardino e Eliane, por enfrentarem o Sol para que eu pudesse trilhar meu caminho na sombra.

À minha irmã, Bernarda, que, estando ao meu lado durante toda a vida, tornou tudo mais leve.

À Danielly, minha melhor amiga, que ao longo de desde a infância me faz acreditar que eu podia ir além.

À toda a minha família e amigos, que me ajudaram a suportar o medo e as incertezas.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que em sua infinita grandeza se revela nos detalhes.

À minha família e amigos, por todo amparo e conselho.

À Clara, que acompanhou e vibrou minhas vitórias, torcendo e cuidando de mim.

Ao LaMFLOR pelas amizades, suporte e por me instigar a me desenvolver cada vez mais.

Ao meu orientador, Adriano, por toda paciência e dedicação.

RESUMO

A crescente relevância dos mercados de carbono tem ampliado o interesse pela integração de ativos ambientais à viabilidade econômica de projetos florestais, especialmente no contexto do plantio de eucalipto. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto econômico da comercialização de créditos de carbono sobre plantios de eucalipto, considerando o efeito da capacidade produtiva do local e diferentes estratégias de comercialização de créditos de carbono. A metodologia baseou-se na simulação da produção volumétrica por classes de sítio, utilizando modelos de crescimento compatíveis, e na análise econômica por meio de indicadores financeiros tradicionais, como Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno, Relação Benefício-Custo, Valor Anual Equivalente e *Payback*. Foram avaliados cenários voltados exclusivamente à produção de madeira, à comercialização isolada de créditos de carbono e à combinação entre ambos, incluindo diferentes intensidades de desbaste. Os resultados indicaram que a viabilidade econômica dos projetos é fortemente influenciada pela qualidade do sítio e pela porcentagem de venda da madeira. O cenário baseado exclusivamente na comercialização de créditos mostrou-se economicamente inviável em todos os índices de sítio analisados, enquanto os cenários baseados somente na venda da madeira destacaram-se, já os cenários integrados apresentaram bom desempenho econômico, sobretudo nos sítios de maior produtividade, demonstrando que a venda de carbono pode tornar o projeto mais atrativo dada a entrada de receita para além do ano de corte. Conclui-se que os créditos de carbono atuam como um mecanismo complementar de valorização do projeto florestal, contribuindo para a melhoria dos indicadores econômicos, mas não substituindo a madeira como principal ativo financeiro do empreendimento.

Palavras-chave: Créditos de carbono; Eucalipto; Projetos florestais; Viabilidade econômica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Mudanças Climáticas e Mercado de Carbono	3
2.1.1 Mercado Regulado de Carbono no Brasil	5
2.1.2. Plano de descarbonização e neutralização das emissões de GEE do Espírito santo	8
2.2 Quantificação de biomassa e carbono	9
2.2.1 Padrões de certificação no mercado voluntário	12
2.3 Análise da viabilidade econômica de projetos florestais	13
3. METODOLOGIA.....	17
3.1 Local de Estudo.....	17
3.2 Coleta de Dados	18
3.3 Cenários Avaliados.....	19
3.4 Estimativa de Biomassa e Carbono.....	20
3.4 Avaliação econômica do plantio de eucalipto em diferentes cenários	
22	
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5. CONCLUSÃO.....	31
6. REFERÊNCIAS	32
APÊNDICE	41

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Principais parâmetros do SBCE estabelecidos pela Lei nº 15.042/2024.	6
Tabela 2 - Parâmetros considerados na estimativa da receita de carbono.	22
Tabela 3 - Informações gerais dos plantios.	23
Tabela 4 - Custos fase de manutenção florestal.	23
Tabela 5 - Média de sequestro de CO ₂ e/ha/ano.....	26
Tabela 6 - Resultado das análise de viabilidade econômica para índice de sítio 20 (valores em vermelho indicam projetos inviáveis economicamente segundo o indicador)	26
Tabela 7 - Resultado das análise de viabilidade econômica para índice de sítio 25 (valores em vermelho indicam projetos inviáveis economicamente segundo o indicador)	27
Tabela 8 - Resultado das análise de viabilidade econômica para índice de sítio 30 (valores em vermelho indicam projetos inviáveis economicamente segundo o indicador)	27

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais parâmetros do SBCE estabelecidos pela Lei nº 15.042/2024.
.....6

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Macrorregiões do estado do Espírito Santo.....	18
---	----

1. INTRODUÇÃO

O cenário global é marcado pela urgência da crise climática consequente da ação antrópica, que impulsiona o aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, decorrente da queima de combustíveis fósseis e da degradação ambiental (Chomsky et al., 2020; Mendes e Spécie, 2024). Em resposta a esse contexto, a comunidade internacional tem se mobilizado em sucessivos esforços diplomáticos para promover a criação de políticas climáticas, pauta das Conferências das Partes (COPs) e formalização de acordos vinculantes (Duarte et al., 2020). O Protocolo de Kyoto (1997), um dos acordos mais relevantes, estabeleceu as primeiras metas de redução de emissões para países desenvolvidos, introduzindo os mecanismos de flexibilização, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), permitindo a valoração econômica da mitigação climática (Poppe, 2008). Posteriormente, o Acordo de Paris (2015) ampliou a responsabilidade para todos os países, por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), reforçando a necessidade de soluções eficientes e palpáveis para alcançar a neutralidade de carbono (Souza, 2017).

Diante disso, os mecanismos de mercado de carbono surgiram como instrumentos econômicos fundamentais para a descarbonização global, transformando a tonelada de CO₂ evitada ou sequestrada, em um ativo financeiro transacionável (Silveira et al., 2021), de forma que as empresas que excedam os limites de emissões de GEE financiem projetos de compensação de carbono (Zanetti, 2019). Esses mecanismos são divididos em Mercado Regulado, onde os créditos são negociados visando compensar as emissões que superem os limites de emissões assumidas no Protocolo de Kyoto, e o Mercado Voluntário de Carbono (VCM), no qual a aquisição de créditos de carbono é motivada por metas corporativas ou pessoais de sustentabilidade e responsabilidade social (Vieira et al., 2025).

No Brasil, o setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra (AFOLU) possui papel estratégico considerando o seu potencial florestal e ambiental, promovendo serviços ecossistêmicos para além do sequestro de carbono. O estado

do Espírito Santo, por sua vez, apresenta condições promissoras para o desenvolvimento de projetos florestais com fins de geração de créditos de carbono, considerando a área destinada a silvicultura no estado, além das metas estabelecidas pelo Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE do estado (Dadalto et al., 2024). De acordo com esse plano, o setor AFOLU, que em 2021 removeu 6,04 MtCO₂e, tem potencial para remover 18,42 MtCO₂e de GEE por ano em 2050, possibilitando a compensação de emissões de setores de difícil descarbonização, como a Siderurgia, e até a venda de créditos de carbono (Espírito Santo, 2023).

Apesar do reconhecimento do potencial do setor florestal brasileiro e capixaba para a mitigação climática, a efetivação de projetos de sequestro de carbono no VCM enfrenta desafios significativos, principalmente os altos custos de implementação, monitoramento e certificação, os quais podem comprometer a rentabilidade dos projetos, especialmente para produtores de menor escala (St-Laurent et al., 2017). Diante disso, torna-se imprescindível avaliar a viabilidade econômica desses empreendimentos, considerando a receita adicional proveniente do VCM, para subsidiar a tomada de decisão de pequenos produtores e o desenvolvimento de políticas públicas regionais.

Nesse contexto, emerge o problema central deste trabalho: em que medida a inclusão da comercialização de créditos de carbono influencia a viabilidade econômica de projetos de plantio de espécies florestais como o eucalipto, quando comparada à produção tradicional voltada exclusivamente à madeira. Com isso, entende-se a necessidade de aprofundar a análise econômica de sistemas florestais que incorporam ativos ambientais, fornecendo subsídios técnicos para a tomada de decisão de produtores, investidores e formuladores de políticas públicas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade econômica de projetos florestais no Espírito Santo, por meio da introdução do mercado voluntário de carbono.

1.1.2 Objetivos específicos

- i) Analisar o impacto econômico que a comercialização de créditos de carbono exerce sobre projetos florestais;
- ii) Avaliar o efeito da capacidade produtiva do local na análise econômica de plantios de eucalipto considerando ou não a comercialização de créditos de carbono;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mudanças Climáticas e Mercado de Carbono

O aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, intensificado pela queima de combustíveis fósseis e pela conversão de uso do solo, tem impulsionado ações internacionais voltadas à mitigação da crise climática (Blanton et al., 2024). Diante das evidências do aquecimento global, desde a década de 1980, a mudança do clima foi pauta de diversas reuniões internacionais com o objetivo de discutir e propor soluções para evitar ou reduzir as emissões de GEE (Scarpinella, 2002). Dentre elas, surgiu em 1992 a Conferência das Partes (COP) com a proposta de criação de instrumentos e mecanismos que promovam e gerenciem a gestão sustentável. A COP, que ocorre anualmente desde 1995, é uma instância voltada para o fomento da negociação das regulamentações, implementação e revisão periódica de acordos (Borja et al., 2007).

Na COP 3, realizada em dezembro de 1997 em Kyoto, Japão, foi lançado o Protocolo de Kyoto, que formaliza o controle das emissões de GEE por parte dos países desenvolvidos (responsáveis por 55% das emissões totais de CO₂ em 1990). No Anexo I deste Protocolo, constava o compromisso de reduzir, entre 2008 a 2012, 5,2% de emissões antrópicas, em relação aos níveis emitidos em 1990 (Nishi et al., 2005). Neste Protocolo foram propostos três mecanismos de flexibilização das emissões: Comércio de Emissões, Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Senado Federal, 2004). Entre eles, apenas o

MDL é aplicável no Brasil, permitindo que países do Anexo I invistam em projetos sustentáveis em países em desenvolvimento, viabilizando investimentos estrangeiros em iniciativas que comprovadamente reduzam emissões de GEE (Prolo et al., 2021). Contudo, para que haja a certificação dos projetos, conforme o Artigo 12 do Protocolo de Kyoto, é necessário que as reduções de GEE alcançadas sejam adicionais àquelas que ocorreriam independente das atividades do projeto certificado, ou seja, comprovar que na ausência da implantação do projeto, estas emissão seriam superiores (Teixeira, 2006). Surgiu, então, a ideia de créditos de carbono transacionáveis, utilizando os créditos gerados (*Certified Emission Reductions* - CERs) para cumprimento das metas dos países signatários, estabelecendo a base conceitual para valoração econômica da mitigação climática, transformando a tonelada de CO₂ evitada ou sequestrada em um ativo financeiro.

Apesar dos esforços, os resultados referentes a redução dos GEE não foram satisfatórios, fomentando o debate sobre a elaboração de um novo acordo climático, resultando no Acordo de Paris, na COP 21 em 2015 (Grandini et al., 2025). O Acordo foi assinado por 196 países, desenvolvidos e em desenvolvimento, que deveriam apresentar suas metas de mitigação por meio da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), com revisão periódica a cada 5 anos, a fim de aumentarem as metas sucessivamente (Oliveira et al., 2024). Nesse novo contexto de responsabilidade compartilhada, o Acordo de Paris reconheceu a importância contínua dos mecanismos de mercado para alcançar as metas globais de forma eficiente. Para isso, o Artigo 6 desse acordo estabeleceu as bases para a cooperação internacional na mitigação e a criação de novos mecanismos de mercado para a transferência de resultados de mitigação entre países. Com isso, sinalizou a validação e a evolução da ideia de créditos de carbono transacionáveis, garantindo que o setor de uso da terra e florestas, fundamental para o Brasil, permaneça como um componente estratégico para o cumprimento das NDCs e para a atração de investimentos em projetos de sequestro de carbono (Minas, 2022).

A operacionalização da valoração do carbono, iniciada com o Protocolo de Kyoto, deu origem a dois ecossistemas de mercado distintos: o Mercado Regulado

(ou de *Compliance*) e o Mercado Voluntário de Carbono (VCM). O Mercado Regulado é estabelecido por legislação governamental e impõe limites obrigatórios de emissão para grandes poluidores, por meio de sistemas de *Cap-and-Trade* (Motta, 2018). Nesses sistemas, as empresas recebem ou compram permissões de emissão (cotas) e são obrigadas a compensar qualquer excesso de emissão adquirindo cotas de outras empresas que reduziram suas emissões abaixo do limite estabelecido. Exemplos desse tipo de sistema são o *European Union Emissions Trading System* (EUETS) (Martin et al., 2016) e o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042 de 2024 (BRASIL, Lei nº 15.042, de 2024).

Por outro lado, o VCM opera em uma base não obrigatória, onde empresas, organizações e indivíduos adquirem créditos de carbono para cumprir metas corporativas de sustentabilidade, neutralidade de carbono ou responsabilidade social de forma opcional (Athias, 2022). O VCM é caracterizado pela necessidade de padrões de certificação rigorosos, como o Verified Carbon Standard (VCS) que já liberou mais créditos (*Verified Carbon Units* – VCUs) do que o MDL (Santikarn et al., 2020).

2.1.1 Mercado Regulado de Carbono no Brasil

A consolidação do mercado regulado de carbono no Brasil se deu com a promulgação da Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024, que instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Esse marco legal representa um avanço significativo na política climática nacional, estabelecendo as bases institucionais para a implementação de *Cap-and-Trade* (BRASIL, Lei nº 15.042, de 2024). O SBCE fortalece o ambiente de investimentos em projetos de redução e remoção de emissões, definindo limites máximos de emissão (*Cap*) para setores regulados, assim como a possibilidade de negociação de permissões e créditos de carbono (*Trade*), criando um mercado institucionalizado de direitos de emissão. Nesse modelo, agentes que emitirem acima de seus limites deverão adquirir certificados de redução ou remoção

verificada de emissões (CRVE), enquanto agentes que reduzirem ou removerem emissões além de suas metas poderão ofertar esses ativos no mercado (Leonhardt et al., 2024).

Os principais parâmetros operacionais definidos pela Lei nº 15.042/2024 estão sistematizados na Tabela 1. Esses elementos normativos contribuem para delimitar o escopo do mercado regulado, os critérios metodológicos aceitos e os mecanismos de governança voltados à integridade ambiental do sistema.

Quadro 1 - Principais parâmetros do SBCE estabelecidos pela Lei nº 15.042/2024.

Parâmetro	Descrição na Lei nº 15.042/2024	Relevância para este estudo
Limites de regulação	Empresas que emitam acima de 25.000 tCO ₂ e/ano passam a integrar o mercado regulado.	Define o perfil dos agentes demandantes por créditos de carbono nos cenários analisados.
Metodologias	Exigência de metodologias reconhecidas e credenciadas pelo órgão gestor do SBCE.	Reforça a adoção de padrões consolidados, como o Verified Carbon Standard (VCS).
Registro centralizado	Instituição de um registro único nacional para ativos de carbono.	Assegura rastreabilidade, evita dupla contagem e aumenta a integridade ambiental dos créditos.
Implementação faseada	Cronograma de até cinco anos para plena operacionalização do sistema.	Justifica o uso de projeções de preços e cenários futuros na avaliação econômica dos projetos.

Fonte: BRASIL (2024).

Vieira et al. (2025) destacam que a criação do SBCE representa um avanço relevante no marco regulatório ambiental brasileiro, ao conferir maior previsibilidade institucional, segurança jurídica e alinhamento às metas internacionais assumidas pelo país no âmbito do Acordo de Paris. Contudo, os autores apontam que a efetividade do sistema ainda depende de sua regulamentação infralegal e da definição clara de seus critérios operacionais,

setoriais e metodológicos, principalmente no que se refere à mensuração, reporte e verificação (MRV) das emissões.

Um aspecto crítico a Lei nº 15.042/2024 é a exclusão do setor agropecuário do escopo obrigatório do mercado regulado, justificada por dificuldades metodológicas na mensuração das emissões e por preocupações com a segurança alimentar (Vieira et al., 2025). Essa escolha pode ser apontada como uma fragilidade do SBCE, tendo em vista que, somado ao setor de mudanças no uso da terra, a agropecuária totalizou 71,4% das emissões de GEE em 2024 (SEEG, 2025). Nesse sentido, evidencia-se a necessidade de adaptação do mercado regulado à realidade do país.

Entretanto, em relação ao setor florestal, o SBCE possui implicações estratégicas relevantes. Apesar de não estar diretamente incluído como setor regulado, o setor florestal se apresenta como um importante vetor de remoção de carbono e geração de créditos no mercado voluntário, podendo interagir com o mercado regulado por meio de mecanismos de registro e reconhecimento institucional (Vargas et al., 2022). Desse modo, o arcabouço legal criado pela Lei nº 15.042/2024 pode fortalecer a demanda por ativos ambientais de alta integridade, favorecendo projetos florestais bem estruturados, promovendo maior valorização e aumento da receita gerada por créditos de carbono com maior previsibilidade e rastreabilidade (Poppe, 2008).

Vale ressaltar que um ativo de alta integridade, seja ele um crédito de carbono ou outro pagamento por serviço ambiental (PSA), pressupõe a garantia de uma melhoria ambiental real, mensurável e adicional, fundamentada em medidas sociais e processos de verificação rigorosos que assegurem que o benefício prometido foi efetivamente entregue e que a remoção do carbono é permanente (Camargo Neto et al., 2025).

2.1.2. Plano de descarbonização e neutralização das emissões de GEE do Espírito santo

O Plano de Neutralização de Emissões de GEE do Estado do Espírito Santo fundamenta-se na adesão em sua adesão às campanhas internacionais *Race to Zero* e *Race to Resilience*, objetivando a eutralização de emissões de GEE até 2050 e a resiliência climática, sendo estruturado em quatro áreas temáticas principais, que concentram o diagnóstico e as propostas de intervenção: Energia e Indústria, Transportes, Resíduos e AFOLU.

O setor AFOLU é apontado como principal agente de remoção de GEE no estado. Embora tenha sido responsável por emissões brutas em 2021 de 12,23 MtCO₂e/ano, que correspondem a 30% das emissões brutas do Estado, as projeções indicam que ele se tornará carbono negativo em 2030. Para que isso se concretize, as estratégias de mitigação no setor se concentram em quatro diretrizes:

- a) Descarbonização pelo uso da terra.
- b) Promoção de melhor aproveitamento do uso da terra.
- c) Estímulo a medidas de compensação de emissões de GEE.
- d) Remoção de GEE da atmosfera.

A quarta diretriz tem como estratégia o estímulo a certificação de créditos de carbono no setor, por meio do Mercado Voluntário de Carbono. No contexto do potencial de mitigação das estratégias propostas para cada diretriz do setor de AFOLU, a implantação de florestas comerciais (diretriz 4) se mostra como a principal fonte de remoção de GEE do setor.

O Plano também considera os elevados custos de certificação para pequenos e médios produtores no Mercado de Carbono e apresenta como estratégia o delineamento de ações que viabilizem a participação de produtores do Estado, propondo a elaboração do Programa Estadual de Carbono, a fim de fornecer apoio técnico no processo de certificação e comercialização de créditos, bem como a criação de uma câmara de compensação de créditos do Espírito Santo (Espírito Santo, 2023).

2.2 Quantificação de biomassa e carbono

A quantificação do estoque de carbono em projetos florestais é a base técnica para a geração de créditos transacionáveis. A partir da mensuração da biomassa florestal quantifica-se quatro reservatórios de carbono: biomassa acima do solo, abaixo do solo (raízes), serrapilheira e necromassa (Birdsey, 2006). Além disso, o carbono do solo é um reservatório que também pode ser ligado à biomassa florestal, a depender da metodologia utilizada (Higa, 2014).

O processo de quantificação do estoque de carbono inicia-se com a implantação das parcelas de inventário florestal na área do projeto, objetivando a maior acurácia com os menores custos possíveis (Brown, 1997). As parcelas podem ser distribuídas por amostragem aleatória, sorteando a localização geográfica das parcelas ou indivíduos, e de forma sistemática, selecionando aleatoriamente a posição inicial seguida de esquemas regulares preestabelecidos (Soares et al., 2011). Em florestas plantadas, amostragem sistemática é a mais recomendada, possibilitando uma representação uniforme de toda a área (Higa, 2014; Loetsch et al., 1973).

Na sequência, realiza-se a medição das árvores individuais dentro das parcelas, coletando-se variáveis dendrométricas de fácil obtenção em campo, principalmente o diâmetro à altura do peito (D), a altura total (H) e, quando possível, informações sobre a espécie e a densidade básica da madeira (Higa, 2014). O volume (v) é uma variável dendrométrica crucial para estimar a biomassa, podendo ser estimado diretamente (de forma destrutiva) ou indiretamente (de forma não destrutiva) (Sanquetta e Balbinot, 2004). No método direto é aplicado o princípio do xilômetro, que consiste em mergulhar as toras em um recipiente com água e o volume de água deslocado, que corresponde ao volume das toras, é medido com régua graduada (Soares et al., 2011). De forma indireta, a medição do volume ocorre a partir de variáveis medidas diretamente com a árvore em pé, como o diâmetro medido em diferentes seções do fuste e o volume destas seções é obtido por fórmulas como as de Smalian, Huber e Newton. O volume é

obtido pelo somatório do volume das seções até um ponto específico. Por meio do volume da árvore e de informações do D e H das árvores, são ajustadas equações de regressão, que podem ser obtidas também na literatura para a espécie, idade, regime de manejo, etc. A densidade da madeira, por sua vez, tem papel fundamental na estimação do carbono, pois permite a conversão do volume da árvore (m^3) em biomassa (toneladas) (Ferreira et al., 2024).

A amostragem pode ser realizada por meio de métodos destrutivos ou não destrutivos. O primeiro método, pressupõe a medida real, que pode ser efetuada a partir da soma da pesagem individual dos componentes, sendo eles:

- a) Copa: separada em galhos finos ($< 2,5$ cm de diâmetro), galhos grossos, folhas, frutos e flores (se for o caso).
- b) Tronco.
- c) Raízes acima de 2mm de diâmetro: divididas em raízes finas (menor que 5 mm de diâmetro) e grossas (maior igual a 5 mm de diâmetro) (Higa, 2014; Braga et al., 2017).

De outro modo, o método não destrutivo, que utiliza equações alométricas, possibilita inferir a biomassa por meio de variáveis como D, H e a densidade da madeira (Higa, 2014).

Adicionalmente, como as equações alométricas disponíveis estimam apenas a biomassa do fuste ou da parte aérea, podem ser utilizados os Fatores de Expansão da Biomassa (FEB) e da Razão de Raízes (R) para incorporar os componentes não comerciais (Sanquetta et al. 2011). O FEB corresponde à razão entre a biomassa aérea total e a biomassa do tronco, permitindo a inclusão de galhos, folhas e casca na estimativa. A biomassa abaixo do solo, por sua vez, pode ser estimada a partir da aplicação de uma razão raiz/parte aérea, obtida da literatura ou de estudos específicos por espécie e idade. Esses coeficientes permitem a obtenção da biomassa total a partir de variáveis de fácil mensuração em campo, mantendo a consistência metodológica e reduzindo os custos operacionais do inventário (Brown, 1997; Sanquetta et al., 2014).

A biomassa é o componente físico que armazena o carbono fixado pela fotossíntese (Brown, 1997; Roquette, 2018). Como citado anteriormente, em inventários florestais, esse material orgânico é distribuído em diferentes reservatórios que, quando somados, caracterizam o estoque total de biomassa da floresta (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2019). Os estudos de quantificação de biomassa florestal podem utilizar métodos diretos (destrutivos), que consistem no corte e pesagem dos componentes da árvore, e indiretos (não destrutivos), com estimativas produzidas a partir de inventários florestais e sensoriamento remoto (Silveira et al., 1982).

Por meio do produto da biomassa florestal e da concentração de carbono, obtém-se a estimativa do estoque de carbono (Higuchi et al., 2004). Porém, é importante ressaltar que a madeira é composta por um agregado de componentes orgânico e inorgânicos distintos, variando entre região, espécie, indivíduo e até mesmo, componente celular (Frizzo et al., 1998). De maneira geral, o carbono compõe 50% da madeira, tanto de folhosas como de coníferas (Watzlawick et al., 2004).

A literatura científica, incluindo as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), fornece fatores de conversão padronizados para estimar a fração de carbono contida na biomassa em diferentes cenários. O IPCC também descreve que, em média, o carbono estocado nos compartimentos da biomassa representa 47% do total da biomassa seca (Eggleston et al., 2006). Entretanto, autores como Higuchi et al. (2004), Amaro (2010), Silva (2020) encontravam na prática resultados divergentes, sendo assim, a aplicação de um valor padrão pode levar a sub ou superestimação dos estoques de carbono.

E soma, a partir da tonelada de CO₂, quantificada, verificada e certificada, obtém-se o ativo transacionável no mercado de carbono, do qual é fundamental avaliar se os custos desse processo são compensados pelas receitas esperadas.

2.2.1 Padrões de certificação no mercado voluntário

Dada a heterogeneidade dos projetos desenvolvidos no âmbito do mercado voluntário de carbono e a necessidade de assegurar a integridade ambiental dos créditos gerados, foram estabelecidos padrões internacionais de certificação voltados à padronização de metodologias, à garantia de adicionalidade e à credibilidade dos ativos ambientais (Oliveira, 2021). Esses padrões desempenham papel central na governança do mercado voluntário, ao reduzir discrepâncias de informação, aumentar a transparência e fortalecer a confiança de compradores e investidores. Padrões internacionais como o *Verified Carbon Standard* (VCS), *Climate Action Reserve* (CAR), *Plan Vivo* e o *American Carbon Registry* (ACR) apresentam relevância consolidada no mercado voluntário (Hamrick e Gallant, 2017; Poppe, 2008).

Entre esses padrões, destaca-se o VCS, desenvolvido pela organização Verra, que se consolidou como o principal sistema de certificação de créditos de carbono no mercado voluntário em escala global (Stanley-Peters & Yin, 2013). O VCS estabelece requisitos técnicos e procedimentais para o desenvolvimento de projetos de mitigação, incluindo a definição de linhas de base, a demonstração de adicionalidade, os critérios de permanência, os procedimentos de mensuração, reporte e verificação (MRV) e os mecanismos de registro e rastreabilidade dos créditos (Poppe, 2008). Criada em 2007 buscando garantir maior qualidade no VCM, a Verra se estabeleceu como o programa de créditos de carbono mais utilizado no mundo (Verra, 2022). Segundo Vargas et al. (2022), 92% dos créditos gerados no Brasil foram certificadas pela Verra.

O CAR possui origem fortemente ligada ao contexto regulatório da Califórnia, sendo reconhecido por sua alta integridade e por ter servido de base para o mercado regulado daquele estado (Kerchner; Keeton, 2015). Já o *Plan Vivo*, criado no México destaca-se por seu foco social, apesar de não possuir restrições geográficas, ele é projetado especificamente para certificar projetos realizados por comunidades de pequenos agriculturas em países de baixa ou média renda (Poppe, 2008). Além da mitigação climática, ele busca promover a redução da pobreza e

meios de subsistência sustentáveis, através de projetos como agroflorestas, restauração de manguezais e manejo de terras (Toksoy; Öztekin; Bayramoğlu, 2020). O ACR também não apresenta restrição geográfica, destacando-se por sua metodologia flexível, mas consistente, contemplando projetos AFOLU (Kollmus et al., 2020). A maioria de seus créditos provém de projetos de Melhoria do Manejo Florestal (IFM) ou plantio de árvores, destacando-se por seus projetos localizados predominantemente nos Estados Unidos, o que geralmente resulta em preços superiores à média de mercado (Toksoy; Öztekin; Bayramoğlu, 2020).

No contexto de projetos florestais, o VCS apresenta metodologias específicas para atividades de reflorestamento, restauração e manejo florestal, permitindo a quantificação padronizada das remoções de carbono e a conversão dessas remoções em créditos certificados. Essas metodologias buscam assegurar que apenas reduções e remoções reais, mensuráveis, verificáveis e adicionais sejam convertidas em ativos transacionáveis, reduzindo o risco de superestimação e de dupla contagem (Sharma et al., 2012).

Assim, a adoção do VCS confere maior robustez técnica e institucional aos projetos florestais inseridos no mercado voluntário, ampliando sua aceitabilidade junto a compradores internacionais e aumentando seu potencial de viabilidade econômica.

2.3 Análise da viabilidade econômica de projetos florestais

A análise da viabilidade de empreendimentos florestais é tradicionalmente realizada por meio de indicadores que consideram o valor do capital no tempo, permitindo uma avaliação robusta da atratividade dos investimentos e orientando a tomada de decisão de produtores e investidores (Kerchner; Keeton, 2015). Para tal, o método amplamente empregado é o do Fluxo de Caixa Descontado (FCD), que utiliza a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), representando o custo de oportunidade do capital, para trazer os valores futuros a valor presente.

Segundo Silva e Fontes (2005), os principais indicadores de viabilidade utilizados na literatura de economia florestal são:

a) Valor Presente Líquido (VPL): O VPL representa o valor líquido atualizado das entradas de caixa e o valor presente das saídas de caixa ao longo do horizonte de planejamento do projeto (Silva et al., 2005).

b) Taxa Interna de Retorno (TIR): A TIR é definida como a taxa de desconto que iguala o valor presente das entradas ao valor presente das saídas, resultando em um VPL igual a zero. Ela expressa a rentabilidade intrínseca do projeto em termos percentuais (Silva et al., 2005), no qual o projeto será viável quando a TIR for superior à TMA.

c) Relação Benefício-Custo (B/C): É um indicador que avalia o retorno sobre o capital investido. Seu cálculo é feito por meio da divisão entre o VP das receitas projetadas, pelo denominador VP dos custos projetados somados aos investimentos projetados. Se o resultado dessa divisão, que é o B/C, for maior que 1,00 significa que o investidor está tendo retorno sobre o capital investido; se B/C for menor que 1,00 o investidor não está tendo retorno (Damodaran, 2003; Rezende e Oliveira, 2008).

d) Custo Médio de Produção (CMP_r): Segundo Rezende e Oliveira (2008), o CMP_r visa determinar o custo médio mínimo de produção por unidade produzida ao longo de todo o ciclo de um projeto. Na prática, o CMP_r indica o preço mínimo pelo qual o produto deve ser comercializado para que o projeto cubra seus custos.

e) Valor Anual Equivalente (VAE): O VAE transforma o VPL de um projeto em em uma série de fluxos de caixa anuais, iguais e constantes, que se estendem por toda a sua vida útil. O que permite que projetos com durações distintas sejam comparados de forma justa, expressando o custo ou benefício anual uniforme equivalente do investimento (Silva e Fontes, 2005).

e) Payback: O Payback estima o tempo necessário para que o fluxo de caixa acumulado do projeto recupere o investimento inicial, porém não considera o valor

do dinheiro no tempo. Por outro lado, o *payback* decontado considera o valor do dinheiro no tempo (Bruni et al., 1998).

A aplicação conjunta desses indicadores permite uma avaliação holística da atratividade dos projetos florestais. A viabilidade econômica de empreendimentos florestais, especialmente em áreas de pequenos e médios produtores, depende da análise criteriosa de seus custos, retornos e fontes complementares de receita.

Nesse sentido, a geração de créditos de carbono pode aumentar a rentabilidade de projetos florestais, sobretudo quando integrada a sistemas produtivos já consolidados, como plantações comerciais ou modelos agroflorestais (Prolo et al., 2021). Entretanto, os custos associados à implementação, monitoramento, verificação e certificação ainda representam uma barreira para produtores de menor escala. Padrões como VCS, gerido pela Verra, apresentam custos de validação e verificação para projetos de manejo florestal sustentável de USD \$70.000 em média na América Latina (Fajardo e Júnior, 2015), exigindo o desenvolvimento de arranjos institucionais e financeiros que reduzam o custo de transação por unidade de carbono gerado.

Segundo Pearson et al. (2014), os custos de transação podem variar de 0,3 a 270% da receita prevista, a depender do preço do carbono e do tamanho do projeto. Desse modo, avaliar a relação entre investimento inicial, receitas provenientes dos créditos de carbono e possíveis benefícios, como ganhos em produtividade e valorização ambiental da propriedade, torna-se fundamental para garantir a sustentabilidade financeira e a adoção em larga escala dos projetos florestais no mercado de carbono.

Nesse contexto, estudos indicam que projetos baseados exclusivamente na produção madeireira podem apresentar retorno limitado em pequenas propriedades, especialmente em regiões com custos logísticos elevados (Ruslandi et al. 2017). Por outro lado, a inclusão dos créditos de carbono tem se mostrado capaz de ampliar a rentabilidade e mitigar riscos financeiros, ao diversificar as fontes de receita dos produtores (Wiskerke et al., 2010). Autores em diferentes contextos como Nishi et al. (2005), com borracha, celulose e resina, e Paixão et al.

(2006), com carvão e serraria, demonstraram que a venda de créditos de carbono aumenta consideravelmente a viabilidade dos projetos florestais, tornando-os mais atrativos.

Essa complementaridade entre mercados já vem sendo apontada na literatura como uma estratégia promissora para propriedades rurais de menor escala, especialmente naquelas localizadas em áreas com menor infraestrutura para o escoamento da produção florestal (Kerchner et al., 2015; Ruslandi et al., 2017). Ao monetizar parte do estoque florestal via carbono e comercializar parte da madeira, os produtores diversificam sua fonte de receita, ao mesmo tempo em que contribuem para a manutenção de estoques de carbono, em linha com estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas.

3. METODOLOGIA

3.1 Local de Estudo

O estudo foi conduzido no estado do Espírito Santo, com foco na Macrorregião Sul (Figura 1), abrangendo os municípios de Alegre, Alfredo Chaves, Anchieta, Apiacá, Atílio Vivácqua, Bom Jesus do Norte, Cachoeiro de Itapemirim, Castelo, Divino de São Lourenço, Dolores do Rio Preto, Guaçuí, Ibatiba, Ibitirama, Iconha, Irupi, Itapemirim, Iúna, Jerônimo Monteiro, Marataízes, Mimoso do Sul, Muniz Freire, Muqui, Piúma, Presidente Kennedy, Rio Novo do Sul, São José do Calçado, Vargem Alta. A escolha dessa região se deu pela proximidade com a área, facilitando o acesso a pesquisa, e pelo fato da região abrigar a maioria dos produtores independentes do estado, aqueles sem vínculo direto com empresas, de acordo com dados do Plano De Desenvolvimento Florestal do Estado do Espírito Santo (2024) do Centro de Desenvolvimento do Agronegócio (CEDAGRO – ES) (Dadalto et al, 2024).

O estado está situado no bioma Mata Atlântica (IBGE, 2008). A Macrorregião Sul é marcada por uma topografia montanhosa, com influência marcante sobre o clima (Siqueira et al., 2004; Castro et al., 2010). De acordo com o sistema de classificação de Köppen, a área de estudo compreende as zonas climáticas A e C, caracterizadas como climas úmidos, além dos subtipos climáticos Aw, Cfa, Cfb, Cwb (Siqueira et al., 2004).

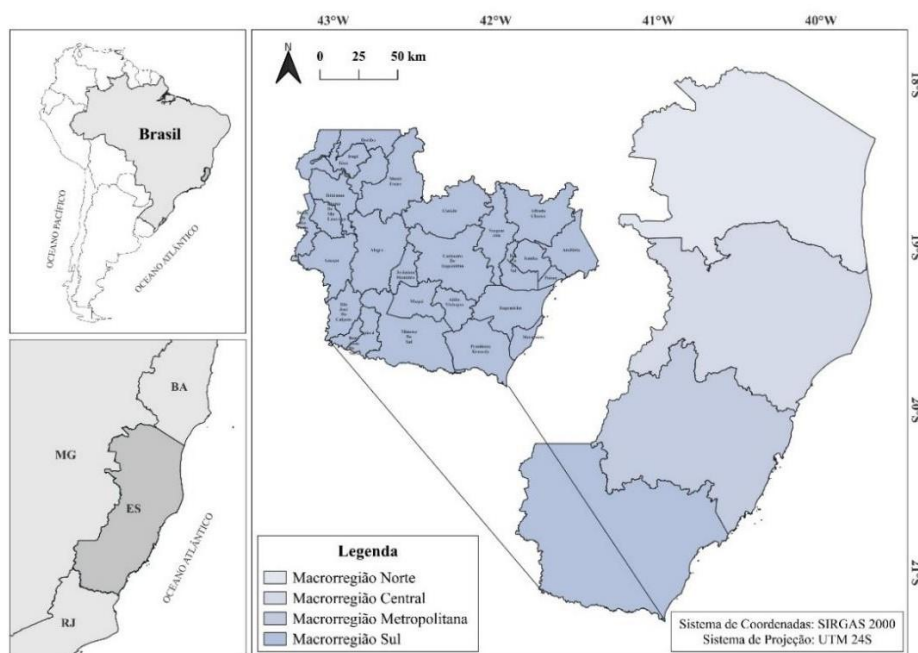


Figura 1 - Macrorregiões do estado do Espírito Santo.

Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 Coleta de Dados

A fim de levantar informações técnicas e financeiras sobre as produções florestais do estado, setembro de 2024 a fevereiro de 2025, foram realizadas entrevistas, online e presenciais, com produtores e empresas de consultorias especializadas em projetos de carbono, aplicando o questionário semiestruturado formulado pelo Grupo de Pesquisa em Economia Florestal – UFES (Apêndice 1). Além do levantamento de informações sobre os custos dos projetos (insumos, operações e despesas identificadas), investimentos, receitas (ganhos e preços praticados), impostos, também foram tabeladas informações sobre preços praticados no mercado voluntário de carbono.

Os dados foram sistematizados em planilhas eletrônicas, organizadas em modelos de planejamento financeiro de longo prazo, e incorporados a ferramentas de análise econômico, financeira, servindo de base para a simulação dos fluxos de caixa de diferentes cenários.

3.3 Cenários Avaliados

Foram simulados três cenários distintos de projetos florestais com *Eucalyptus spp.*, diferenciados pelas estratégias de monetização adotadas sendo elas: comercialização da madeira em pé para celulose, comercialização de créditos de carbono e a integração da comercialização de madeira e de créditos de carbono:

- a) Cenário 1 – Madeira: projeto de plantio de eucalipto tradicional considerando duas rotações para venda da madeira em pé, nos anos 7 e 14, sem a venda de créditos de carbono.
- b) Cenário 2 – Carbono: objetiva somente a geração e comercialização de créditos de carbono nos anos 3, 5, 7, 10 e 14 no projeto de plantio de eucalipto tradicional, com uma única rotação de 14 anos.
- c) Cenário 3.1 – Integrado: combinação da venda da madeira proveniente de um desbaste de 30% no ano 7, e venda de 100% da madeira em pé aos 14 anos, além da venda de créditos de carbono no ano 10.
- d) Cenário 3.2 – Integrado: combinação da venda da madeira proveniente de um desbaste de 30% no ano 7, e venda de 30% da madeira em pé aos 14 anos, além da venda de créditos de carbono nos anos 10 e 14.
- e) Cenário 3.3 - Integrado: combinação da venda da madeira proveniente de um desbaste de 60% no ano 7, e venda de 100% da madeira em pé aos 14 anos, além da venda de créditos de carbono no ano 10.
- f) Cenário 3.4 – Integrado: combinação da venda da madeira proveniente de um desbaste de 60% no ano 7, e venda de 60% da madeira em pé aos 14 anos, além da venda de créditos de carbono nos anos 10 e 14.

Com base na metodologia VCS, considerando a implantação do projeto em uma área de pastagem degradada, o projeto está inserido na categoria AFOLU, sob atividade de Florestamento, Reflorestamento e Revegetação (ARR). Vale ressaltar que o VCS exige que o volume de créditos emitidos seja baseado na média de longo prazo dos estoques de carbono, ou seja, que o projeto não receba créditos por carbono que será removido e liberado durante o corte comercial da madeira

(West, 2011). Nesse sentido, a venda de carbono em diferentes intervalos é possível devido à natureza do ciclo de verificação e monitoramento dos projetos de sequestro de carbono. Diferente da venda da madeira, que geralmente ocorre apenas no final do ciclo de corte, os créditos podem ser comercializados à medida que a biomassa cresce e o carbono é efetivamente fixado (Ferreira et al., 2024; Poppe, 2008).

3.4 Estimativa de Biomassa e Carbono

A estimativa do estoque de carbono foi realizada a partir da simulação do volume de madeira por hectare para um povoamento de eucalipto, considerando a diferentes sítios florestais. Esse volume simulado foi utilizado como variável de entrada para a quantificação da biomassa total e do carbono equivalente (CO₂e).

O volume por hectare foi projetado três classes de sítio considerando as respectivas alturas dominantes 20m, 25m e 30m, representando condições distintas de crescimento, produtividade e acúmulo de biomassa ao longo das rotações. Essa abordagem possibilita que a análise econômica reflita diferentes níveis de potencial produtivo, capturando a influência da qualidade do sítio sobre a produção volumétrica e, conseqüentemente, sobre os fluxos de caixa associados aos cenários avaliados. Foi utilizado o modelo de Clutter (equações 1 e 2) e uma equação para estimar a área basal inicial para os diferentes sítios analisados (equação 3).

$$\ln V = 1,4916 - 22,7615 \left(\frac{1}{t_2} \right) + 0,02914S + 1,13245 \ln G \quad (1)$$

$$\ln G_2 = \ln G_1 \left(\frac{t_1}{t_2} \right) + 3,24133 \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) + 0,0173 \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) S \quad (2)$$

$$G_i = -11,21003 + 1,12133S - 0,00967S^2 \quad (3)$$

Em que: V = volume (m³/ha); t = idade (meses); G = área basal (m²/ha); S = índice de sítio (m).

Para obter a biomassa por hectare, foi necessário obter informações de densidade básica média da madeira. Para isso, considerou-se informações do híbrido *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, que apresenta boa adaptação na área de estudo (Sperandio et al., 2010). Na conversão do volume total do fuste em carbono na biomassa viva, aplicou-se o fator de expansão de biomassa (FEB) e a razão de raízes (R) para a espécie de *Eucalyptus grandis* plantados no sul do país, a fim de garantir a inclusão dos componentes não comerciais (copa e sistema radicular). Na Tabela 1 consta os valores de estimativas de diferentes variáveis utilizadas para estimar a biomassa dos povoamentos de eucalipto analisados.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados no cálculo do fator de conversão de madeira para carbono.

Variáveis	Valor	Fonte
Densidade básica média da madeira	0,510 t/m ³	González et al. (2014)
Fator de expansão da biomassa	1,05	Dalla Corte et al. (2015)
Razão de Raízes	0,08	Dalla Corte et al. (2015)
Fração de carbono na biomassa	0,47	IPCC (2006)
Fator molecular de C para CO ₂	3,67	IPCC (2006)

Fonte: Produção do próprio autor.

Para conversão da biomassa em carbono, com base no volume do povoamento da árvore, foi aplicada a equação 4 com base na metodologia de IPCC (2003):

$$C = (V \cdot D \cdot FEB) \cdot (1 + R) \cdot FC \quad (4)$$

Em que: C = carbono na biomassa viva (Mg massa seca/ha); D = densidade básica da madeira, (t/m³); FC = fração de carbono da matéria seca, (Mg massa seca)⁻¹; FEB = fator de expansão de biomassa (relação entre biomassa seca das árvores e biomassa seca do volume comercial), adimensional; R = razão de raízes, adimensional; V = volume (m³/ha).

Os resultados dessas simulações serviram como base para a composição do fluxo de caixa. A receita bruta potencial com créditos de carbono foi estimada multiplicando-se o volume convertido em tCO₂e pelo preço da tonelada no mercado voluntário. Em seguida, aplicou-se um desconto de 30%, referente a custos com gestão técnica, certificação, monitoramento, validação e verificação, de acordo com dados coletados no questionário aplicado em empresas da área. A Tabela 2 sintetiza os parâmetros considerados na estimativa da receita de carbono para os cenários 2 e 3.

Tabela 2 - Parâmetros considerados na estimativa da receita de carbono.

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Preço da tCO ₂ e (mercado voluntário)	5,00	USD/tCO ₂ e	O autor
Taxa de câmbio utilizada (Jan. 2026)	5,36	R\$/USD	Brasil (2026)
Preço da tCO ₂ e (convertido)	26,80	R\$/tCO ₂ e	O autor
Desconto de gestão e certificação	30	% sobre receita	O autor

3.4 Avaliação econômica do plantio de eucalipto em diferentes cenários

A modelagem dos cenários foi baseada em dados reais de custos operacionais de plantios de eucalipto no Espírito Santo. Considerou-se uma área de um hectare, espaçamento de 3 x 3 metros (1.111 árvores por hectare), com horizonte de planejamento de 14 anos, dividido em duas rotações e colheitas previstas nos anos 7 e 14 (cenários 1 e 3).

Os valores utilizados refletem preços médios praticados em 2024 e englobam custos de implantação, manutenção, administração e imposto de renda sobre o lucro. A análise foi realizada com base em uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 10% ao ano, em termos reais, considerando que as taxas de desconto convencionalmente aplicadas em projetos florestais variam entre 6 e 12% ao ano (Lima et al.,1997).

Na Tabelas 3 e 4 são apresentados as principais premissas adotadas na análise econômica.

Tabela 3 - Informações gerais dos plantios.

Categoria	Descrição	Valor	Unidade
Custos de implantação	Plantio (1ª rotação)	R\$ 8.381,00	R\$/ha
	Reforma (2ª rotação)	R\$ 8.381,00	R\$/ha
Custos de manutenção	Ano 1	R\$ 830,00	R\$/ha
	Ano 2	R\$ 440,00	R\$/ha
	Manutenção e gestão	R\$ 110,00	R\$/ha/ano
Despesas administrativas	Preço de venda da madeira em pé	R\$ 90,00	R\$/m³
Tributos e encargos	Imposto de Renda sobre o lucro	15	%
	Taxa mínima de atratividade (TMA)	10,00	% a.a. (real)

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 4 - Custos fase de manutenção florestal.

Tipo de Custo	Valor	Unidade
Insumos	R\$ 3.161,00	R\$/ha
Fertilizantes (NPK + Super Fosfato Simples + MAP)	R\$ 1.440,00	R\$/ha
Calcário	R\$ 260,00	R\$/ha
Mudas	R\$ 1.111,00	R\$/ha
Iscas formicidas	R\$ 150,00	R\$/ha
Cupinícida	R\$ 200,00	R\$/ha
Serviços	R\$ 5.220,00	R\$/ha
Operações de implantação	R\$ 5.220,00	R\$/ha
Total	R\$ 8.381,00	R\$/ha

Fonte: Produção do próprio autor.

A análise econômica dos cenários simulados foram realizadas com base na metodologia de Fluxo de Caixa Descontado (FCD), modelo de avaliação mais utilizado pelo mercado de capitais segundo (Grejanin e Martins, 2020).

a) Valor Presente Líquido (VPL): representa o valor líquido atualizado dos fluxos de caixa ao longo do horizonte de planejamento, de acordo com a equação (5)

(Silva et al., 2005) É importante ressaltar que no presente estudo o VPL não considerou o Imposto de Renda sobre o Lucro.

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{R_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+i)^j} \quad (5)$$

Em que: VPL = valor presente líquido; R_j = receita no final do ano j ; C_j = custo no final do ano j ; i = taxa de juros e j = período de ocorrência do custo ou receita.

b) Taxa Interna de Retorno (TIR): corresponde à taxa que iguala o valor presente das entradas e das saídas do projeto, de acordo com a relação demonstrada na equação (6) (Silva et al., 2005).

$$TIR = \sum_{j=0}^n R_j (1 + TIR)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1 + TIR)^{-j} \quad (6)$$

Em que: R_j = Receitas do período de tempo j considerado; C_j = Custos do período de tempo j considerado; n = Duração do projeto em anos ou em número de períodos de tempo.

c) Relação Benefício-Custo (B/C): obtida pela razão entre o valor presente das receitas e o valor presente dos custos. Este indicador mede a eficiência do uso do capital, indicando o retorno gerado para cada unidade monetária investida (Rezende e Oliveira, 2008).

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j}}{\sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j}} \quad (7)$$

Em que: i = taxa de juros; R_j = Receitas do período de tempo j considerado; C_j = Custos do período de tempo j considerado; n = Duração do projeto em anos ou em número de períodos de tempo.

d) Valor Anual Equivalente (VAE): este critério transforma o valor atual do projeto em fluxos de receitas ou custos periódicos contínuos, equivalentes ao valor atual, durante a vida útil do projeto (Silva e Fontes, 2005).

$$VAE = \frac{VPL \cdot i}{[1 - (1 + i)^{-n}]} \quad (8)$$

Em que: VAE = valor anual equivalente (R\$/ha); VPL = valor presente líquido ; i = taxa de desconto; e n = duração do projeto, em anos.

e) *Payback*: utilizado para calcular quanto tempo um investimento demora a ser ressarcido. Seu cálculo é feito acumulando as entradas e saídas, até se obter o período em que houve a transição de um valor negativo para positivo, ou seja, o momento em que tudo o que foi investido é recuperado (Bruni et al., 1998).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 5 é apresentada a média de sequestro de CO₂e/ha/ano para os cenários analisados nos três sítios.

Tabela 5 - Média de sequestro de carbono (Mg CO₂e/ha/ano).

Sítio (m) —	<u>Cenário</u>			
	1	2	3.1 e 3.2	3.3 e 3.4
20	63,89	47,33	70,63	61,71
25	89,73	63,36	68,79	57,70
30	120,39	82,90	91,47	76,89

Fonte: Produção do próprio autor.

Nas Tabelas 6, 7 e 8 constam os resultados da análise de viabilidade econômica para os diferentes cenários adotados em diferentes sítios.

Tabela 6 - Resultado das análise de viabilidade econômica para índice de sítio 20 (valores em vermelho indicam projetos inviáveis economicamente segundo o indicador).

Indicador	<u>Cenário</u>					
	1	2	3.1	3.2	3.3	3.4
VPL (R\$/ha)	-458,11	-6.315,56	1.743,30	-2.489,14	2.359,77	598,04
TIR (%)	8,67	-12,57	10,18	5,12	9,74	7,55
B/C	0,97	0,47	1,15	0,79	1,21	1,05
VAE (R\$/anos)	-62,19	-857,31	236,65	-337,89	320,33	81,18
Payback (anos)	0,00	0,00	14,00	0,00	14,00	14,00

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7 - Resultado das análise de viabilidade econômica para índice de sítio 25 (valores em vermelho indicam projetos inviáveis economicamente segundo o indicador).

Indicador	Cenário					
	1	2	3.1	3.2	3.3	3.4
VPL (R\$/ha)	5.497,62	-4.527,11	1.928,14	-2.542,44	1.777,68	-83,18
TIR (%)	11,66	-5,22	10,39	5,21	9,87	7,67
B/C	1,36	0,65	1,17	0,78	1,16	0,99
VAE (R\$/anos)	746,28	-614,54	261,74	-345,13	241,31	-11,29
Payback (anos)	14,00	0,00	14,00	0,00	14,00	0,00

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 8 - Resultado das análise de viabilidade econômica para índice de sítio 30 (valores em vermelho indicam projetos inviáveis economicamente segundo o indicador).

Indicador	Cenário					
	1	2	3.1	3.2	3.3	3.4
VPL (R\$/ha)	12.562,88	-2.406,11	5.926,04	52,42	5.815,75	3.370,89
TIR (%)	14,37	0,80	12,74	7,32	11,78	9,36
B/C	1,83	0,82	1,49	1,00	1,51	1,30
VAE (R\$/anos)	1.705,36	-326,62	804,44	14,00	789,47	457,59
Payback (anos)	7,00	0,00	14,00	8,40	14,00	14,00

Fonte: Produção do próprio autor.

Os resultados apresentados evidenciam que o desempenho dos projetos florestais avaliados é fortemente condicionado pela qualidade do sítio, independentemente do cenário produtivo considerado. O cenário 1, que avalia somente a comercialização da madeira, não se mostrou viável no sítio de menor produtividade (20), por outro lado, apresentou viabilidade para os índices 25 e 30, apresentando o melhor resultado no Sítio 30, com uma TIR que se aproxima da taxa Selic, atualmente em 14,90% (TAXA DE JUROS BÁSICA, 2026).

O cenário 2 não apresentou viabilidade em nenhum dos índices de sítio analisados. O que reforça que a receita proveniente do mercado voluntário de carbono possui caráter complementar, promovendo entradas no fluxo de caixa para além do ano da colheita (Nishi et al., 2005; Paixão et al., 2006; Silva et al., 2008), não sendo capaz de justificar a implantação de um projeto florestal para esse fim. Porém, segundo Paixão et al. (2006), em cenários otimistas e considerando a alta do preço da tonelada de carbono, esse contexto poderia mudar, promovendo a viabilidade do plantio de eucalipto com a finalidade de comercialização de créditos de carbono.

O cenário 3 não apresentou uniformidade em seus subcenários, expressando que, além da capacidade produtiva da área, a porcentagem de desbaste e a venda ou não dos créditos de carbono no ano 14 impactam diretamente na viabilidade dos projetos.

Nesse contexto, o cenário 3.1 foi viável em todos os sítios, diferente o cenário 1 que não foi viável para o menor nível de produtividade (sítio de 20m). Indicando que o cenário 3.1 pode ser uma opção interessante para produtores em áreas de baixa produtividade.

Por outro lado, o cenário 3.2 não apresentou viabilidade econômica nos sítios de baixa e média produtividade, sendo viável economicamente no índice de sítio 30m, com valores que não são atrativos quando comparado aos demais cenários viáveis. Esse resultado se deve a impossibilidade de venda de carbono no ano 14, dado o incremento de biomassa insuficiente, provocando a geração limitada de receita, uma vez que somente parte da madeira foi comercializada e não houve receita gerada pela comercialização dos créditos de carbono. A TIR de 7,32% no sítio de 30m demonstra que um ciclo produtivo de 14 anos, com venda de carbono em dois períodos é insustentável, mas que os resultados poderiam ser mais otimistas em um ciclo de produção maior.

O cenário 3.3 foi considerado viável em todos os sítios, com resultados semelhantes ao cenário 3.1, apesar de se mostrar mais atrativo para o sítio de baixa produtividade (S20m). Assim, apresenta-se como uma opção para quem busca

diversificar a renda e promover entradas de receita adicionais à venda da madeira, principalmente em áreas de baixa produtividade. É importante ressaltar que este cenário não é mais atrativo que o cenário 1 no sítio de 30m, devido a rotação promover a comercialização dos créditos de carbono apenas no ano 10, limitando a entrada de receitas intermediárias nesse contexto.

O cenário 3.4 apresenta indicadores melhores que o cenário 3.2, sendo considerado inviável apenas no sítio de 25m. Porém, por apresentar TIR abaixo de 10% nas áreas de menor e maior produtividade esse cenário não se mostra atrativo quando comparado à outros projetos mais rentáveis. Isso ressalta que os resultados poderiam ser melhores caso houvesse incremento de biomassa suficiente para venda dos créditos de carbono no ano 14. O que demonstra que a rotação de 14 anos possa ter sido insuficiente para proporcionar a entrada com receita proveniente do carbono em diferentes anos, como no cenário 3.3, como foi a ideia proposta neste trabalho.

A interpretação da Taxa Interna de Retorno (TIR) apresenta limitações relevantes quando aplicada a projetos com fluxos de caixa não convencionais, caracterizados por duas ou mais inversões de sinal ao longo do período de análise. Nesses casos, a TIR pode gerar múltiplas taxas de retorno, uma vez que seu cálculo decorre da resolução de uma equação polinomial, cujo número máximo de soluções reais positivas é igual ao número de mudanças de sinal do fluxo de caixa, comprometendo sua confiabilidade como critério de decisão (Barbieri et al., 2007). Diante dessa limitação, a utilização da Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR) mostra-se mais adequada, pois considera taxas explícitas de financiamento e reinvestimento alinhadas às condições de mercado, fornecendo uma estimativa de retorno mais realista para projetos florestais de longo prazo (Barbieri et al., 2007; Bonfim et al., 2017; Souza et al., 2016).

Vale ressaltar por ser um investimento de longo prazo os resultados estão suscetíveis à variações de mercado, considerando que é utilizado o regime de pagamento após a geração da compensação, essa instabilidade nos preços gera incertezas sobre o retorno do investimento (Pan et al., 2022). Os custos de

transação de projetos florestais, seja no mercado voluntário ou regulado, também se apresentam como um grande desafio, podendo chegar a 270% da receita prevista (Pearson et al., 2014). Contexto que se agrava em projetos de pequena escala, onde esses custos fixos de transação podem ser muito altos para gerarem lucro (Van Kooten e Johnston 2016, Pan et al., 2022).

Nessa conjuntura, uma alternativa seria avaliar qual a área mínima necessária para que esses custos representem menos de 30% da receita de carbono, como é tratado no presente trabalho, passando a ser tratados como custos fixos, aumentando a atratividade dos cenários integrados. Em um contexto global, Pearson et al. (2014) apontam que a maioria das estimativas dos custos marginais do sequestro de carbono também são estimadas em até 30%, porém isso acontece porque os custos de transação não estão incluídos, o que consequentemente subestima o real valor dos custos marginais.

Ao longo do estudo, foram encontradas limitações, das quais destacam-se a dependência de premissas de preços, custos e produtividades médias, bem como a não consideração de riscos de mercado e variáveis institucionais futuras. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a incorporação na análises de sensibilidade de variáveis como: taxas aplicadas para registro e certificação do carbono em diferentes padrões de certificação e a venda da madeira para mercados mais rentáveis, de modo a ampliar a robustez e aplicabilidade dos resultados obtidos.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitiram estruturar e aplicar uma base técnico-financeira consistente para a avaliação econômica de projetos de plantio de eucalipto, integrando informações de produtividade por índice de sítio, custos operacionais, preços da madeira e valores praticados no mercado voluntário de carbono.

A capacidade produtiva do local mostrou-se determinante para os resultados econômicos, com tendência de aumento da viabilidade à medida que o índice de sítio se eleva. Em sítios de maior produtividade, os melhores desempenhos foram observados nos cenários voltados à produção de madeira, enquanto em sítios de menor produtividade os cenários integrados apresentaram ganhos relativos mais expressivos.

A análise econômica evidenciou que a comercialização de créditos de carbono exerce impacto positivo apenas quando incorporada de forma complementar aos projetos florestais. Os cenários baseados exclusivamente na venda de créditos apresentaram desempenho econômico insatisfatório em todos os índices de sítio, enquanto os cenários integrados demonstraram melhoria nos indicadores financeiros em relação ao plantio tradicional, ainda que sem superar, de forma consistente, os resultados obtidos com a produção exclusiva de madeira em áreas de maior produtividade. Dessa forma, os resultados confirmam que a atratividade econômica de projetos florestais está condicionada principalmente ao potencial produtivo da área, onde a comercialização de créditos de carbono possui papel adicional, não principal, nas receitas geradas. Por outro lado, os resultados indicam que, nas condições avaliadas, o carbono contribui para a otimização econômica do projeto, principalmente em sítios menos produtivos.

6. REFERÊNCIAS

AMARO, M. A. **Quantificação do estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual no município de Viçosa-MG**. 2010. 168 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

ATHIAS, J.; SÁ, J. D. Políticas ambientais e instrumentos econômicos: uma análise do mercado de créditos de carbono. **Atuação: Revista Jurídica do Ministério Público Catarinense**, v. 17, n. 36, p. 65-80, 2022.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Taxas de juros básicas – Histórico. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 27 jan. 2026.

BARBIERI, J. C.; ÁLVARES, A. C. T.; MACHLINE, C. Internal Rate of Return: controversies and interpretations. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, [S. l.], n. 4, p. Pag. 131, 2007.

BASSO, R.L.; BERTAGNOLLI, D. D. O.; DOS SANTOS, L. A. Análise econômico-financeira mediante geração e comercialização de créditos de carbono. **Revista Ambiente Contábil**, v. 9, n. 2, p. 296-314, 2017

BIRDSEY, R. A. Carbon accounting rules and guidelines for the United States Forest Sector. **Journal of Environmental Quality**, 35, p.1518-1524, 2006.

BLANTON, A. et al. The status of forest carbon markets in Latin America. **Journal of Environmental Management**, v. 352, p. 119921, 2024.

BOMFIM, S. L. D.; D'AVIGNON, A. L. D. A.; SOUZA, A. N. D.; FONTES, P. J. P. D., JOAQUIM, M. S. O potencial da concessão de florestas públicas para o desenvolvimento socioeconômico e geração de emprego na Amazônia Legal. **Revista do Serviço Público**, v. 67, n. 4, p. 649, 2017.

BORJA, A. G. B.; RIBEIRO, F. L. Crédito de carbono: da estruturação do protocolo de Kyoto à implementação das atividades de projeto MDL. **Revista de Economia da UEG**, v. 3, n. 1, p. 67-86, 2007.

BRAGA, E. O. et al. Biomassa e sazonalidade das raízes finas em savanas da Amazônia Oriental. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 475-483, 2017.

BRASIL. **Banco Central do Brasil. Fechamento diário do dólar**. Brasília, DF: Banco Central do Brasil, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/fechamentodolar>>. Acesso em: 7 fev. 2026.

BRASIL. **Brasil registra em 2025 o menor índice de inflação desde 2018 e o quinto menor dos últimos 31 anos.** GOV.BR – Portal do Planalto, Brasília, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2026/01/brasil-registra-em-2025-o-menor-indice-de-inflacao-desde-2018-e-o-quinto-menor-dos-ultimos-31-anos>. Acesso em: 27 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024.** Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e altera as Leis nºs 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-, 2026/2024/lei/L15042.htm. Acesso em: 8 dez. 2025.

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change in tropical forests. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1997. **Forestry Paper**, n. 134.

BRUNI, A. L.; FAMÁ, R; SIQUEIRA, J. O. Análise do risco na avaliação de projetos de investimento: uma aplicação do método de Monte Carlo. **Caderno de pesquisas em Administração**, v. 1, n. 6, p. 62-74, 1998.

CAMARGO NETO, L. D. et al. Análise da Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais à Luz das Boas Práticas Internacionais. **Ambiente & Sociedade**, v. 28, p. e00011, 2025.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5.ed. Viçosa: UFV, 2017. 636p.

CASTRO, F. S. et al. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero Pinus no estado do Espírito Santo. **Floresta**, v. 40, n. 1, p. 235-250, 2010.

CHOMSKY, N.; POLLIN, R.; POLYCHRONIOU, C. J. **Crise climática e o Green New Deal global: a economia política para salvar o planeta**. Editora Roça Nova, 2020.

DADALTO, G. G. et al **Dimensionamento do setor de base florestal no estado do Espírito Santo: madeira – ES**. Relatório técnico, Centro de Desenvolvimento do Agronegócio – CEDAGRO, 2022

DADALTO, G. G. et al. **Plano de desenvolvimento florestal do estado do Espírito Santo**. Relatório técnico, Centro de Desenvolvimento do Agronegócio – CEDAGRO, 2024

DALLA CORTE, A. P. et al. Fator de expansão de biomassa, razão de raízes-parte aérea e modelos para carbono para Eucalyptus grandis plantados no sul do Brasil. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 107-119, 2015.

DAMODARAN, A. **Investment philosophies: successful strategies and the investors who made them work**. John Wiley & Sons, 2003.

DIAZ-BALTEIRO, L.; RODRIGUEZ, L. C. E. Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration—a comparison of results in Brazil and Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 229, n. 1-3, p. 247-258, 2006.

DUARTE, B. B.; TUPIASSU, L.; NOBRE, S. O mercado de carbono na política de mitigação das mudanças climáticas. **Revista de Direito Ambiental e Socioambientalismo**, v. 6, n. 2, p. 93-108, 2020.

EGGLESTON, S. et al. (Ed.). **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**, volume 4: agriculture, forestry, and other land use. Japan: IGES, Japan. 2006.

ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEAMA). **Plano de descarbonização e neutralização das emissões de GEE do Espírito Santo - Versão I**. Espírito Santo, 2023. Disponível em: <https://arsp.es.gov.br/Media/arsi/Energia/PlanoDescarbonizacao/PDNE-GEE-2050.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2026.

FAJARDO, A. M. P.; JUNIOR, R. T. Avaliação financeira do sequestro de carbono na Serra de Baturité, Brasil, 2012. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 391-399, 2015.

FERREIRA, J. C. S.; SILVA, J. A. D.; FERREIRA, R. L. Economic viability of a silvopastoral system with and without the inclusion of carbon credits. **Revista Caatinga**, v. 37, p. e11721, 2024.

FONTINELE, N. M., 2016. Comparação Entre a Produtividade e Análise Econômica de Clones de Eucalyptus Spp. em Sistemas de Alto Fuste e Talhadia no Polo Gesseiro do Araripe – Pe. 2016. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural do Pernambuco- UFRPE, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Recife, PE, p. 62.

FRIZZO, S. M. B.; SILVA, M. G. Composição química da madeira. In: apontamentos de química da madeira. Santa Maria: UFSM/Departamento de Química, 1998. p. 3-17.

GONÇALEZ, J. C. et al. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de Eucalyptus urograndis. **Scientia forestalis**, v. 42, n. 101, p. 81-89, 2014.

GRANDINI, G. A. C. et al. Desafios e Estratégias para o Reflorestamento no Brasil: capacidade Produtiva e Mercado de Créditos de Carbono Pós-, Acordo de Paris. **Revista de Gestão e Secretariado**, [S. l.], v. 16, n. 5, p. e4906, 2025. DOI: 10.7769/gesec.v16i5.4906. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4906>. Acesso em: 27 nov. 2025.

GREJANIN, V. U.; MARTINS, V. A.. Avaliação de empresas pelo método de fluxo de caixa descontado: o caso de uma indústria de madeiras faqueadas de capital fechado. **Revista de Gestão, Finanças e Contabilidade**, v. 10, n. 3, p. 83-107, 2020.

HAMRICK, K.; GALLANT, M. Fertile ground: State of forest carbon finance 2017. **Forest Trends' Ecosystem Marketplace, Washington, DC**, v. 20036, 2017.

HIGA, R. C. V. et al. Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. **Colombo: Embrapa Florestas**, v. 1, 2014.

HIGUCHI, N. et al. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 295-304, 2004.

IBGE. **Mapa da área de aplicação da lei n. 11.428 de 2006**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008. Escala 1:5.000.000

INDRAJAYA, Y. et al. Paying for forest carbon: Cost-effectiveness of the Verified Carbon Standard (VCS) remuneration scheme. **Natural Resource Modeling**, v. 37, n. 1, p. e12387, 2024.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC, 2003. 632 p.

KERCHNER, Charles D.; KEETON, William S. California's regulatory forest carbon market: Viability for northeast landowners. **Forest Policy and Economics**, v. 50, p. 70-81, 2015.

KOLLMUSS, A. et al. **Handbook of carbon offset programs: trading systems, funds, protocols and standards**. Routledge, 2010.

KOSSOY, A. **State and trends of carbon pricing 2015**. World Bank Publications, 2015.

LAWICK, L. F. et al. Teores de carbono em espécies da Floresta Ombrófila Mista. **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: UFPR, p. 95-109, 2004.

LEONHARDT, R.D.; SCOPEL, C.A.S.R.; SPINELLI, H.X.M. **SBCE: o novo marco legal do comércio de emissões no Brasil**. Ebook: Machado Meyer Advogados, Dez.2024.

LIMA JÚNIOR, V. B.; REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. Determinação da taxa de desconto a ser usada na análise econômica de projetos florestais. **Revista Cerne**, v. 3, n. 1, p. 45-66, 1997.

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. Reinbek: Federal Research Organization for Forestry and Forest Products, Forest Inventory Section, 1973. 469p. v. 2.

MARTIN, R.; MUÛLS, M.; WAGNER, U. J. The impact of the European Union Emissions Trading Scheme on regulated firms: what is the evidence after ten years? **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 10, n. 1, p. 129-148, 2016.

MENDES, J. S. R.; SPÉCIE, P. Migrações climáticas na amazônia brasileira: a emergência em curso e os desafios das organizações internacionais na região. **Cadernos do CEAS: Revista crítica de humanidades**, [S. l.], v. 49, n. 261, p. 109 -131, 2024. DOI: 10.25247/2447-861X.2024.n261.p109-131. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.ucsal.br/index.php/cadernosdoceas/article/view/1270>. Acesso em: 29 jan. 2026.

MINAS, S. Market making for the planet: the Paris Agreement Article 6 decisions and transnational carbon markets. **Transnational Legal Theory**, v. 13, n. 2-, 3, p. 287-320, 2022.

MIRANDA, D. L. C.; JUNIOR, V. B.; GOUVEIA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Plena**, v.11, n. 03, 2015.

MOTTA, R. S. D. Precificação do carbono: do Protocolo de Quioto ao Acordo de Paris. 2018.

NISHI, M. H. et al. Influência dos créditos de carbono na viabilidade financeira de três projetos florestais. **Revista Árvore**, v. 29, p. 263-270, 2005.

OLIVEIRA, T. B.; JÚNIOR, P. B. M. Stakoviak. O MERCADO DE CARBONO NO CONTEXTO DO ACORDO DE PARIS. **Singular. Sociais e Humanidades**, v. 1, n. 6, p. 154-168, 2024.

OLIVEIRA, Y. P. L. D. Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n. 1, 2021.

PAIXÃO, F. A. et al. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, p. 411-420, 2006.

PAN, Chunyu et al. Key challenges and approaches to addressing barriers in forest carbon offset projects. **Journal of Forestry Research**, v. 33, n. 4, p. 1109-1122, 2022.

PEARSON, T. R. et al. Transaction costs for carbon sequestration projects in the tropical forest sector. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 19, n. 8, p. 1209-1222, 2014.

POPPE, M. K. **Manual de capacitação: mudanças do clima e projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL)**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

PROLO, C. D. et al. **Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris**. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade, 2021.

RATUCHNE, L. C. et al. Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 450-462, 2016.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. 386 p.

ROQUETTE, J. G. Distribuição da biomassa no cerrado ea sua importância na armazenagem do carbono. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 03, p. 1350-1363, 2018.

RUSLANDI; ROMERO, C.; PUTZ, F. E. Financial viability and carbon payment potential of large-scale silvicultural intensification in logged dipterocarp forests in Indonesia. **Forest Policy and Economics**, v. 85, p. 95-102, 2017.

SANQUETTA, C. R. et al. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, p. 01-08, 2014.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; SILVA, F. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. **Carbon Balance and Management**, London, v. 6, n. 6, p. 1-8, 2011.

SANTIKARN, M. et al. 2020. State and trends of carbon pricing 2020. World Bank Group. Internal Carbon Action Partnership, Washington DC.

SANTOS, F. G. et al. **Efeitos do sítio e de cenários de custos e preços na análise de regimes de manejo com e sem desbaste em *Pinus taeda* L.** Cerne, Lavras, v. 8, n. 1, p. 13-31, 2002.

SCARPINELLA, G. A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Quioto**. 2002. 182f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima, acessado em 21 jan. 2026 – seeg.eco.br

Senado Federal (2004). Protocolo de Quioto e legislação correlata. **Brasília: Senado Federal**. 88 p. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/70328/693406.pdf?sequenc e=2>. Acesso em: 26/11/2025.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Inventário Florestal Nacional: principais resultados: Espírito Santo. Brasília, DF: MAPA, 2019. 80p. (Série Relatórios Técnicos - IFN). Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 8 jan. 2026.

SHARMA, S. K. et al. A pragmatic method for estimating greenhouse gas emissions from leakage for Improved Forest Management projects under the Verified Carbon Standard. **Greenhouse Gas Measurement and Management**, v. 2, n. 1, p. 22-32, 2012.

SILVA, L. D. C. D. **Mudança em volume, biomassa e carbono do fuste em uma floresta estacional semidecidual da Mata Atlântica, ES**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2020.

SILVA, M. L.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE) e Valor Esperado da Terra (VET). **Revista Árvore**, v.29, n.6, p.931-936, 2005.

SILVA, M. L.; JACOVINE L. A. G., VALVERDE, S. R. **Economia florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV; 2005

SILVA, R. F. D. et al. Projeção do estoque de carbono e análise da geração de créditos em povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 32, p. 979-992, 2008.

SILVEIRA, C. S. da; OLIVEIRA, L. de. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos cadernos NAEA**. v.24, n.3, p. 11-31, 2021.

SILVEIRA, P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Chronicle**, v. 5, n. 3, p. 220-224, 1982.

SIQUEIRA, J. D. P. et al. Estudo ambiental para os programas de fomento florestal da Aracruz Celulose S. A. e extensão florestal do governo do estado do Espírito Santo. **Floresta**, v. 34, n. 2, p. 3-67, 2004.

SOARES, C. P. B.; DE PAULA NETO, F.; DE SOUZA, A. L. **Livro Dendrometria e Inventário Florestal**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2011.

SOUZA M. C. O.; CORAZZA, R. I. Do Protocolo Kyoto ao Acordo deParis: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa. **Desenvolvimento e meio ambiente**, v. 42, p. 52-80, 2017.

SOUZA, P.; SCHNORRENBERGER, D.; LUNKES, R. J. Práticas de orçamento de capital predominantes na literatura internacional. *Revista Innovar Bogotá*, v. 26, n. 60, 103-116 p. 2016.

SOUZA, M. A. D.; PIRES, C. B.; SILVEIRA, F. C. Análise de custos de prestação de serviços de colheita florestal mecanizada. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 13, n. 2, p. 270-289, 2011.

SPERANDIO, H. V. et al. Zoneamento agroecológico para espécies de eucalipto no estado do Espírito Santo. **Caminhos de Geografia**, v. 11, n. 34, p. 203-216, 2010.

STANLEY-PETERS M.; YIN D. **Maneuvering the mosaic: state of the voluntary carbon markets 2013**. Washington, DC: Ecosystem Marketplace; 2013.

ST-LAURENT, G. P.; HAGERMAN, S.; HOBERG, G. Emergence and influence of a new policy regime: the case of forest carbon offsets in British Columbia, Canada. **Land Use Policy**, Vancouver, v. 60, p. 169-180, 2017.

TAXAS DE JUROS BÁSICAS - Histórico. Banco Central do Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 30 jan. 2026.

TEIXEIRA, M. Mecanismos de desenuolumento limpo, critério de adicionalidade e suas repercussões. **Revista Portuguesa e Brasileira de Gestão**, v. 5, n. 2, p. 36-46, 2006.

TOKSOY, D.; ÖZTEKIN, C.; BAYRAMOĞLU, M. M. Situation Of Forest Carbon Projects In Carbon Markets. **Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences**, v. 5, n. 5, p. 872-881, 2020.

VALDETARO, E. B. et al. Contribuição dos créditos de carbono na viabilidade econômica dos contratos de fomento florestal no sul da Bahia. **Revista Árvore**, v. 35, p. 1307-1317, 2011.

VAN KOOTEN, G. C.; JOHNSTON, C. MT. The economics of forest carbon offsets. **Annual Review of Resource Economics**, v. 8, n. 1, p. 227-246, 2016.

VARGAS, D. B.; DELAZERI, L. M. M.; FERRERA, V. H. P. O avanço do mercado voluntário de carbono no Brasil: desafios estruturais, técnicos e científicos. **Fundação Getúlio Vargas, Observatório de Bioeconomia**, 2022.

VERRA. Who we are. 2022. Disponível em: <https://verra.org/about/overview/>. Acesso em: 08 fev. 2026.

VIEIRA, A. C. P. et al. O mercado regulado de carbono no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 39, n. 114, p. e39114141, 2025.

WEST, T. A. P. **Metodologia para projetos florestais de crédito de carbono envolvendo a conversão da exploração madeireira convencional para o manejo florestal com exploração de impacto reduzido**. 2012.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” –ESALQ –USP, Piracicaba, 2012

WISKERKE, W. T. et al. Cost/benefit analysis of biomass energy supply options for rural smallholders in the semi-arid eastern part of Shinyanga Region in Tanzania. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 148-165, 2010.

ZANETTI, E. A. Mudanças climáticas globais, florestas e mercado de carbono. **Dia de Campo**, Curitiba, 2013. Disponível em: http://www.diadecampo.com.br/arquivos/materias/%7B233257306-, 104D%7D_Mudancas_Climaticas_Globais_Florestas_Madeira_e_Carbono.pdf Acesso em: 03 dez. 2025.

APÊNDICE

Apêndice 1 - Questionário realizado com produtores da região.

1) Informações gerais:

- Nome ou apelido.
- Localização de sua área produtiva (cidade).
- Tamanho total de sua área produtiva (ha).
- Qual ou quais as espécies florestais que você produz?
- Quantos hectares o seu principal cultivo florestal ocupa?

2) Informações do plantio:

- Qual a idade do seu plantio florestal?
- Qual a idade de corte que você utiliza para o seu plantio?
- Costuma fazer quantos ciclos? Caso use talhadia, quantas rotações?
- Costuma fazer inventário florestal?
- Se faz inventário florestal, quanto gasta, em média (resposta em R\$ ou R\$/hectare)?
- Qual o volume de madeira, em média, do seu plantio por hectare? (Exemplo: 200 m³/hectare).
- Qual a produtividade média do seu plantio?

3) Custos:

- Quais os adubos e fertilizantes que você utiliza para a implantação da floresta?
- Quanto você costuma gastar com adubos/fertilizantes (em R\$ ou R\$/hectare)?
- Quanto você costuma gastar com calcário (em R\$ ou R\$/hectare)?
- Quanto você costuma gastar com mudas (em R\$ ou R\$/hectare)? 42

- Quanto você costuma gastar com iscas formicidas ou outros produtos para combate a formiga (em R\$ ou R\$/hectare)?
- Quanto você costuma gastar com herbicida (em R\$ ou R\$/hectare)?
- Quais operações você realiza para implantar a floresta?

4) Comercialização:

- Qual o valor que você tem vendido a madeira (gentileza nos informar a unidade de venda, como por exemplo R\$/metro estéreo, R\$/m³, etc.)?
- Quais os principais compradores de sua madeira? (Exemplo: serraria, empresa de celulose, empresa de carvão vegetal, etc.)
- A entrega da madeira ao comprador fica por sua conta ou o frete é por conta do comprador?

Qual o valor médio praticado de frete, a distância média e o volume carregado?