

O Uso da Blockchain no Brasil à luz da Lei 15.042/2024

André L. de S. Freitas¹, Antonio A. de A. Rocha¹

¹Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense (UFF)
Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº – 24.210-346 – Niterói – RJ – Brasil

andre_freitas@id.uff.br, arocha@ic.uff.br,

Abstract. *This article analyzes the implementation of blockchain technology in Brazil as a verifiable point of the integrity of carbon credit projects, focusing on Law 15.042/2024, which aims to regulate the carbon credit market at the national level, establishing the Brazilian Greenhouse Gas Emissions Trading System (SBCE). The research examines the potential of technologies such as blockchain, satellite and drone imagery, the Internet of Things, and artificial intelligence to improve traceability and verifiability, through a framework in carbon credit trading initiatives, in accordance with art. 25 of the Law, highlighting existing methodologies, such as VERRA and MSCI Carbon Markets. Adequate regulation can drive innovation and transparency in digital and environmental transactions.*

Resumo. *Este artigo analisa a implementação da tecnologia blockchain no Brasil como ponto de verificabilidade da integridade dos projetos de crédito de carbono, com foco na Lei 15.042/2024, que visa regulamentar o mercado de crédito de carbono no âmbito nacional, instituindo o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissão de Gases de Efeito Estufa (SBCE). A pesquisa examina o potencial de tecnologias como blockchain, imagens de satélites e drones, internet das coisas e inteligência artificial para melhorar a rastreabilidade e a verificabilidade, através de um framework em iniciativas do comércio de créditos de carbono, no tocante do art. 25 da Lei, destacando as metodologias existentes, como VERRA e MSCI Carbon Markets. A regulamentação adequada pode impulsionar a inovação e a transparência nas transações digitais e ambientais.*

1. Introdução

O desmatamento e as queimadas, impulsionados sobretudo pela expansão agrícola e exploração madeireira, são vetores críticos da degradação ambiental e do aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A perda de cobertura florestal compromete o sequestro de carbono, prejudicando os esforços globais na mitigação das mudanças climáticas ([den Besten et al. 2014]; [Aryal et al. 2024]). No Brasil, embora o debate sobre a regulamentação do mercado de carbono tenha se estendido por mais de três décadas, sua estruturação formal ocorreu apenas recentemente, com a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Gases de Efeito Estufa (SBCE) pela Lei 15.042/2024, no âmbito da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) ([PNMC 2009]; [(FGV) 2022]). Essa iniciativa visa estabelecer um mercado regulado, com regras claras para certificação, comercialização e auditoria de créditos de carbono, além de mecanismos de garantia de integridade ambiental ([Delacote et al. 2024]).

Apesar do potencial do mercado de carbono para impulsionar a transição rumo a uma economia de baixas emissões, barreiras estruturais dificultam sua adesão, especialmente na promoção de práticas sustentáveis. O processo de certificação e verificação ainda é burocrático, oneroso e pouco acessível a pequenos e médios produtores ([FGV] 2022)]. Ademais, a transparência e rastreabilidade das transações são cruciais para evitar fraudes, dupla contagem e greenwashing, exigindo auditorias mais robustas e o uso de tecnologias emergentes, como monitoramento remoto e inteligência artificial ([Verra 2025]; [Olawade et al. 2024]).

Neste contexto, o objetivo central deste artigo é propor um framework tecnológico para apoiar a elaboração de projetos de crédito de carbono na Amazônia, visando à redução das emissões de gases de efeito estufa. Especificamente, o trabalho: (i) analisa o potencial de tecnologias como blockchain, IoT, sensoriamento remoto e inteligência artificial (IA) no comércio de créditos de carbono; (ii) identifica as fases de atuação do framework conforme a regulamentação do SBCE; (iii) compara as principais metodologias de certificação; e (iv) discute como a solução pode organizar e automatizar a elaboração do Project Design Document (PDD).

O framework proposto concentra-se nas fases iniciais dos projetos, como análise do uso da terra, desenvolvimento do PDD e validação. Para isso, integra tecnologias como a blockchain Cartesi (Layer 2 sobre Ethereum), IA, satélites, drones e IoT, promovendo a automação de processos, a redução de custos operacionais e o aumento da precisão do monitoramento ambiental.

2. Conceitos e Definições

2.1. Política Nacional sobre Mudança do Clima e o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa - SBCE

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) são instrumentos centrais na estratégia brasileira de redução das mudanças climática. A PNMC, instituída pela Lei nº 12.187/2009, define metas nacionais de redução de GEE, integrando sustentabilidade ao planejamento estratégico ([PNMC 2009]). O SBCE, por sua vez, regulamenta o mercado de carbono, viabilizando a comercialização de créditos como incentivo à adoção de práticas sustentáveis e tecnologias limpas ([Macreadie et al. 2022]; [Aryal et al. 2024]).

Sua criação alinha o Brasil a tratados como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, consolidando um marco regulatório robusto para a redução e compensação de emissões. O SBCE permite ampla participação de setores públicos e privados, fomentando a transição para uma economia de baixo carbono e atraindo investimentos para tecnologias sustentáveis e conservação ambiental ([Delacote et al. 2024]; [FGV] 2022)].

O SBCE e a PNMC atuam de forma complementar: enquanto a primeira define diretrizes e metas (como a redução de 37% das emissões até 2025 e 43% até 2030), o segundo operacionaliza mecanismos financeiros e regulatórios, promovendo também a inclusão de comunidades tradicionais em políticas de adaptação e financiamento sustentável ([Verra 2025]).

A transparência e rastreabilidade dos créditos no SBCE são reforçadas pela adoção de tecnologias como a blockchain Cartesi (Layer 2 sobre Ethereum), que me-

hora a eficiência, segurança e automação na certificação e monitoramento das reduções de emissões, atenuando riscos como fraudes e dupla contagem ([Howson et al. 2019]; [Feng 2022]). Com isso, o SBCE fortalece a governança climática nacional e posiciona o Brasil como ator estratégico no mercado global de carbono.

2.2. Conceitos de Blockchain e Rastreabilidade

A rastreabilidade em projetos de carbono é essencial para garantir a transparência, e a veracidade dos créditos gerados, assegurando que as reduções de emissões sejam reais e auditáveis ([Adigun et al. 2024]; [Kotsialou et al. 2022]). No contexto do mercado de carbono, a blockchain surge como uma tecnologia promissora para registro imutável e descentralizado, eliminando intermediários e mitigando riscos de fraudes e dupla contagem ([Howson et al. 2019]). Entretanto, desafios como altos custos operacionais e limitações de escalabilidade restringem sua ampla adoção, especialmente para pequenos e médios projetos.

Para superar essas barreiras, soluções Layer 2, como a Cartesi¹, aprimoram a eficiência da blockchain ao operar sobre a Ethereum, permitindo maior escalabilidade e redução de custos transacionais. A Cartesi possibilita o processamento off-chain de operações complexas, através de implementações flexíveis, agnóstica de linguagem, o que facilita a implementação.

As transações em blockchain envolvem custos inerentes à sua imutabilidade e ao processamento descentralizado, exigindo elevado consumo computacional para garantir segurança. Além disso, blockchains tradicionais enfrentam limitações de escalabilidade, com baixa taxa de transações por segundo (TPS) — cerca de 7 para o Bitcoin e 15 a 30 para a Ethereum, contra até 24.000 TPS de redes tradicionais de pagamento. Tais restrições inviabilizam seu uso direto em aplicações que exigem alta dinâmica, como o mercado financeiro e a certificação de créditos de carbono.

Neste cenário, a Cartesi se destaca como uma solução Layer 2 sobre Ethereum, oferecendo maior escalabilidade sem comprometer a segurança. Seu diferencial está no processamento off-chain de operações complexas, o que reduz significativamente os custos e amplia o TPS. A Cartesi também suporta linguagens tradicionais de programação, facilitando a integração com sistemas convencionais e ampliando sua adoção.

Assim, sua aplicação no framework proposto garante transparência, verificabilidade e eficiência operacional, além de democratizar o acesso à certificação, ao torná-la mais acessível a pequenos projetos, como evidenciado na Tabela 1.

Blockchain	Custo da Transação Média (USD) 2
Bitcoin	\$2 - \$5
Ethereum	\$1 - \$20
Cartesi	\$0.01 - \$0.10

Tabela 1. Comparativo de custos de transação de blockchain.

A implementação da Cartesi no Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) promove maior interoperabilidade entre diferentes plataformas, garantindo um

¹Cartesi, "Cartesi Rollups Documentation", disponível em: <https://docs.cartesi.io/cartesi-rollups/1.5/>

mercado mais transparente e confiável. Além disso, a execução de contratos inteligentes facilita auditorias automatizadas, reduzindo tempo e custos na certificação de créditos. Ao integrar essa tecnologia ao monitoramento via IoT e inteligência artificial, o mercado de carbono se torna mais seguro, rastreável e alinhado às diretrizes da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Assim, a combinação de blockchain Layer 2 e ferramentas digitais aprimora a governança climática, consolidando o Brasil como um ator relevante na transição para uma economia de baixo carbono.

3. Metodologia de Verificação

A certificação de créditos de carbono é essencial para garantir a credibilidade do mercado de emissões. A VERRA, por meio do Verified Carbon Standard (VCS), define critérios para mensuração, monitoramento e verificação de reduções de emissões ([Verra 2025]). Seu processo inclui auditorias independentes que avaliam adicionalidade, permanência e mensurabilidade. Projetos como o Juma Sustainable Development Reserve exemplificam sua aplicação em iniciativas de conservação e geração de renda para comunidades locais.

Apesar de seu reconhecimento, a VERRA enfrenta críticas devido à complexidade e altos custos da certificação, que podem representar até 30% do investimento de pequenos projetos ([More et al. 2019]). Além disso, falhas na verificação e na conformidade com critérios ambientais levantam questionamentos sobre a integridade de algumas certificações. Tecnologias como blockchain têm sido sugeridas como alternativa para aumentar a transparência e reduzir custos.

A MSCI Carbon Markets, voltada para análise de riscos climáticos e viabilidade de projetos, considera fatores como regulamentação e sustentabilidade ([MSCI 2024]). Sua abordagem permite avaliar riscos e impactos financeiros, sendo aplicada em projetos de energia renovável. No entanto, sua metodologia recebe críticas por falhas na verificação técnica das emissões, concentrando-se mais na análise de riscos do que na validação detalhada ([Popescu et al. 2021]). Em 2023, projetos analisados pela MSCI no Brasil foram questionados devido à falta de clareza na mensuração da mitigação climática. Na tabela 2 é apresentado um comparativo entre as duas metodologias.

Critério	VERRA	MSCI
Abordagem	Baseada em dados históricos e Projeções	Avaliação quantitativa e qualitativa
Aceitação no Mercado Internacional	Amplamente reconhecida	Ganha espaço, especialmente entre investidores focados em ESG(COSTA, 2021)
Auditorias	Exige auditorias anuais	Avalia riscos de projetos continuamente
Complexidade	Alta, com regras rigorosas	Flexível, mas menos padronizada
Custos Associados	Custos de auditoria mais altos	Relatórios geralmente mais acessíveis
Verificabilidade	Desafios em campo	Consistência nas avaliações
Transparência	Alta, mas pode ser difícil de implementar	Variável, dependendo da análise
Tempo de Verificação	Ciclo de verificação mais longo	Análise em tempo real

Tabela 2. Comparativo entre VERRAS e MSCI

As metodologias enfretam desafios. A VERRA lida com altos custos e complexidade de certificação, dificultando o acesso de pequenos projetos. A MSCI é criticada pela falta de rigor na verificação, gerando dúvidas sobre a validade dos créditos analisados, mas são hoje os padrões de certificação mais conhecidos no mercado. VERRA e MSCI são importantes e complementares, atendendo a diferentes necessidades de investidores e partes interessadas.

3.1. Construção do Framework Tecnológico

O framework proposto foi concebido para atuar nas três primeiras fases dos projetos de crédito de carbono: identificação, elaboração do Project Design Document (PDD) e validação. A construção metodológica seguiu uma abordagem de engenharia de software orientada a arquitetura, com foco na interoperabilidade entre tecnologias emergentes.

Etapas de desenvolvimento:

- Levantamento de requisitos funcionais a partir da análise normativa da Lei 15.042/2024 e metodologias VERRA e MSCI;
- Modelagem conceitual baseada em BPMN para mapear fluxos operacionais do ciclo de certificação;
- Definição da arquitetura modular com três componentes principais: (i) Módulo de sensoriamento remoto (satélite/drones), (ii) Módulo de análise com IA, (iii) Módulo de registro e auditoria em blockchain Cartesi.

Tecnologias utilizadas:

- IA: Modelos LLaMA e Gemini III com suporte TensorFlow e OpenCV;
- Blockchain Layer 2: Cartesi Rollups operando sobre Ethereum;
- Sensores IoT: sensores ambientais embarcados para coleta de dados atmosféricos e de solo;
- Imagens: Sentinel-2 (Copernicus) e drones com sensor LiDAR.

Todas as integrações foram pensadas para ambientes com conectividade intermitente, usando armazenamento local e sincronização posterior via hash registrado na blockchain.

4. Desafios e Oportunidades no Mercado de Crédito de Carbono

O mercado de créditos de carbono enfrenta desafios significativos relacionados à integridade das metodologias de certificação, transparência e rastreabilidade. Possíveis inconsistências na verificação e auditoria frequentemente podem resultar na prática de greenwashing, onde projetos são rotulados como sustentáveis sem garantias concretas de redução de emissões ([Dalsgaard 2022, Medina et al. 2022]). No Brasil, iniciativas de reflorestamento e conservação certificadas por entidades renomadas têm sido criticadas pela ineficácia no cumprimento de metas de restauração, minando a confiança dos investidores e a credibilidade do setor ([den Besten et al. 2014, Singh et al. 2024]).

Apesar das auditorias rigorosas e padrões bem definidos de alguns modelos de verificação a eficácia dos créditos de carbono podem ser comprometidos, levando à subestimação de riscos e decisões baseadas em informações imprecisas ([Raina et al. 2024]). Além disso, o alto custo das certificações torna o processo inacessível para pequenos produtores, limitando sua participação no mercado. Mitigar esses problemas é essencial revisar e adaptar as metodologias às realidades locais, especialmente em regiões como a Amazônia, onde fatores socioambientais exigem abordagens específicas ([Medina et al. 2022]).

A adoção de tecnologias emergentes, como blockchain, surge como alternativa para aprimorar a rastreabilidade e reduzir possíveis inconformidades no setor. Contratos

inteligentes e sistemas descentralizados podem aumentar a transparência e garantir a rastreabilidade dos créditos de carbono, promovendo maior confiança e governança no mercado ([Howson et al. 2019, Swinkels 2024]). No entanto, desafios como escalabilidade, governança digital e inclusão tecnológica ainda precisam ser superados para garantir que essas soluções sejam eficazes e acessíveis ([Filippi et al. 2020, Tavares et al. 2021]).

Organizações como a VERRA, MSCI e o Gold Standard vêm aprimorando seus processos de certificação, enquanto normas internacionais, como as da ISO e da Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets (TSVCM), buscam estabelecer padrões mais robustos de auditoria e governança ([Verra 2025, ISO 2019, on Scaling Voluntary Carbon Markets 2021]). A integração dessas regulamentações com novas tecnologias pode fortalecer a credibilidade do mercado, garantindo que os créditos de carbono reflitam reduções reais, mensuráveis e permanentes, alinhando-se tanto aos objetivos climáticos globais quanto aos benefícios socioambientais locais ([Prawitasari et al. 2024]).

5. Arquitetura do Framework para Certificação de Crédito de Carbono

O mercado de créditos de carbono pode integrar novas tecnologias, como blockchain, sensores IoT, imagens de satélite e drones e inteligência artificial (IA), para aumentar a confiabilidade nos créditos de carbono emitidos e reduzir os custos finais do projeto. Essas ferramentas, integradas em um framework, oferecem soluções de problemas como: transparência, rastreabilidade e eficiência, desde a identificação até a validação e comercialização de créditos de carbono, figura 1.

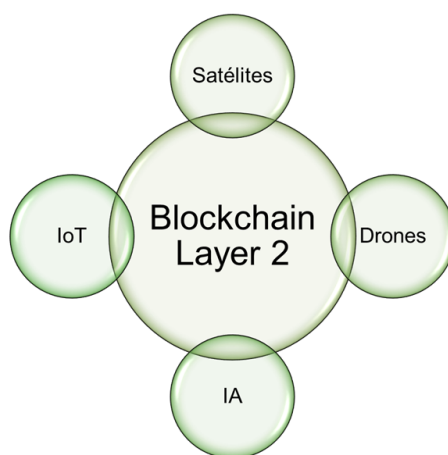


Figura 1. Tecnologias da Arquitetura

Tais tecnologias, podem orientar as atividades de sustentabilidade na Amazônia, primeiramente realizando uma análise da propriedade e através das imagens coletadas, propor alternativas de projetos que podem ser enquadrados na propriedade. Na tabela 3 são apresentados os tipos de projetos que podem ser enquadrados, tendo como base a PNMC.

A adoção da blockchain Cartesi (Layer 2) no registro e certificação de créditos de carbono representa um avanço significativo, ao garantir descentralização, imutabilidade e transparência. Essa abordagem proporciona escalabilidade e redução de custos, tornando

Id	Tipo do Projeto	Descrição	Foco
1	Florestamento	Consiste no plantio de florestas em áreas que não possuíam cobertura florestal original, incrementando a captura de carbono.	Áreas com pastagens abandonadas, terras degradadas ou baixa produtividade agrícola.
2	Reflorestamento	Através de iniciativas diversas objetivando a restauração de ecossistemas degradados na Amazônia, com abordagens inovadoras e integradas.	Áreas com degradação de solo, pressão por desmatamento e importância ecológica.
3	REDD+	Através de incentivos financeiros para a manutenção da floresta em pé, promovendo práticas de uso sustentável da terra.	Áreas em risco de desmatamento e degradação florestal, devido à proximidade a fronteiras agrícolas, assentamentos de terra e terras dos povos originais.
4	Energia renovável	Visa a redução da dependência por combustíveis fósseis na produção de energia e calor, minimizando o impacto do uso e promovendo a inclusão energética de comunidades isoladas.	Alterar o uso da produção de energia obtida por queima de combustíveis fósseis, por fontes renováveis, dependendo dos recursos naturais disponíveis.
5	Gestão de resíduos	Através da implementação de projetos de gestão eficiente dos resíduos, minimizando a poluição e fomentando a economia circular.	Levantar os tipos de resíduos e a quantidade produzida para criação de projetos de gestão, cooperativas de catadores, biogestores, etc.
6	Mudança no uso do solo	Transição de modelos predatórios de exploração de terras para práticas sustentáveis, como agroflorestas, sistemas integrados de produção e conservação ambiental.	Análise das áreas desmatadas, da degradação do solo e do potencial de recuperação de ecossistemas.
7	Agricultura sustentável	Transição de modelos tradicionais para práticas sustentáveis, minimizando a degradação do solo, conservando recursos hídricos, reduzindo as emissões de carbono e provendo a resiliência do ecossistema.	Áreas com uso de práticas agrícolas tradicionais, com monocultura intensiva e uso excessivo de agroquímicos.
8	Substituição de combustíveis fósseis	Visa a substituição do uso de derivados de petróleo, como gasolina, diesel e querosene.	Etapas da produção que usam combustíveis fósseis como transporte, indústria e processos agregados.

Tabela 3. Tipos de Projetos de Sustentabilidade

a certificação mais acessível a projetos de diferentes portes. A blockchain armazena dados provenientes de sensoriamento remoto — via IoT, drones e satélites — assegurando rastreabilidade. Além disso, contratos inteligentes automatizam auditorias e verificações, aumentando a confiabilidade dos créditos e abrandando as inconformidades.

A Internet das Coisas (IoT) é crucial para a coleta em tempo real de dados ambientais, como concentração de GEE, biomassa e umidade do solo. Sensores são embarcados em drones, veículos e usinas, permitindo análises detalhadas e adaptativas nas metodologias de certificação. Já satélites de alta resolução (ex.: Copernicus) e drones viabilizam o monitoramento da vegetação e uso do solo, inclusive em áreas remotas, alimentando modelos preditivos que auxiliam na prevenção de desmatamentos e incêndios.

A inteligência artificial complementa esse ecossistema ao processar imagens aéreas com aprendizado de máquina, classificando espécies vegetais, estimando biomassa e detectando mudanças ambientais. Técnicas como fotogrametria e LiDAR ampliam a precisão ao medir altura e densidade da vegetação [Huang et al. 2022]. A integração dessas tecnologias permite um monitoramento dinâmico e preciso, otimizando a certificação e validação dos créditos de carbono.

Fase	Descrição	Tecnologias
Identificação do Projeto	Identificado como a propriedade pode se enquadrar na captura de carbono.	Sensoriamento via satélite, análise da IA e registro na blockchain L2.
Desenvolvimento do projeto	Elaboração do PDD (MDL/Protocolo de Kyoto), com foco nas três fases iniciais.	Sensoriamento remoto, análise da IA e registro na blockchain L2.
Validação e Registro	Validação via PDD e registro no mercado de carbono.	Sensoriamento remoto, análise da IA e registro na blockchain L2.

Tabela 4. Fases de atuação do Framework

O framework proposto atua em todas as fases da certificação, garantindo a integração das tecnologias envolvidas no processo, conforme ilustrado na Figura 2. Sua aplicação se dá da seguinte forma:

1. O processo inicia com a identificação do projeto por meio do Cadastro Ambiental Rural (CAR), que delimita as propriedades e registra os dados na Cartesi;
2. Em seguida, imagens de satélites do ONR-RI e europeus multiespectrais permitem diferenciar vegetação nativa, áreas degradadas e uso do solo. As coordenadas geoespaciais geram a poligonal da propriedade, que será usada para parametrizar o plano de voo dos drones e registro posterior na Cartesi;
3. Com base nas análises, é definida a categoria do projeto (ex.: AFOLU, REDD+, energia renovável, etc.), e registrada na Cartesi;
4. Drones sobrevoam a área e produzem um mosaico de alta resolução. Equipados com sensores IoT, captam dados como espectros térmicos, umidade e gases. Devido ao tamanho do mosaico, um hash é gerado e armazenado na Cartesi;
5. As imagens são analisadas por IA (modelo LLaMA) para elaborar o inventário florestal, com classificação de espécies, padrões de biomassa e estimativas de sequestro de carbono. Os resultados são registrados na Cartesi;
6. Simultaneamente, sensores IoT realizam medições em tempo real (biomassa, GEE, umidade, etc.), sendo os dados armazenados na Cartesi ou transmitidos via wireless quando possível.

Com os dados coletados e processados, inicia-se a fase de desenvolvimento do projeto, estruturada no Project Design Document (PDD). Esse documento contém informações essenciais, como objetivos do projeto, localização geográfica, metodologia de coleta e análise de dados, além da quantidade estimada de carbono a ser sequestrado e os impactos socioambientais esperados. O PDD formaliza as informações obtidas pelos sistemas IoT, satélites e drones, garantindo que as premissas do projeto sejam embasadas em dados verificáveis, promovendo maior confiabilidade e transparência na certificação dos créditos de carbono.

A fase de validação e registro garante a integridade dos dados coletados, que são cruzados com registros oficiais, como o Cadastro Ambiental Rural (CAR) e o Operador Nacional de Imóveis. Todos os registros são armazenados em blockchain para assegurar imutabilidade e rastreabilidade. O monitoramento e a verificação das áreas certificadas ocorrem continuamente por meio de sensores IoT, drones e satélites, enquanto algoritmos de inteligência artificial analisam padrões e detectam possíveis mudanças na cobertura

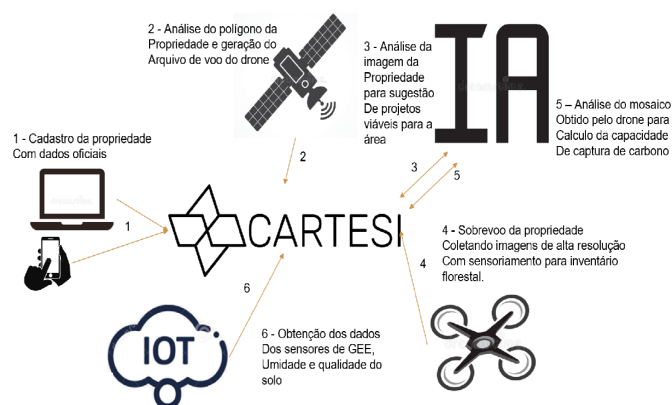


Figura 2. Diagrama

florestal ou no nível de emissões. Após essa etapa, os créditos de carbono são emitidos e registrados na blockchain, garantindo a rastreabilidade e a conformidade com padrões internacionais. A comercialização desses créditos pode ser facilitada por tokens digitais, registrados em plataformas de mercado e integrados a mercados globais.

A arquitetura proposta integra tecnologias emergentes para aprimorar a transparência, segurança e eficiência na certificação de créditos de carbono. A incorporação da blockchain, IoT, satélites, drones e inteligência artificial fortalece a rastreabilidade do mercado e reduz custos operacionais, promovendo maior inclusão de pequenos e médios produtores. Além de contribuir para a credibilidade do mercado de carbono, a aplicação dessas tecnologias apoia as metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris. A combinação dessas ferramentas possibilita um mercado mais eficiente, confiável e acessível, promovendo impactos ambientais e socioeconômicos positivos.

5.1. Validação e Testes Futuros

A validação prática do framework será conduzida em ambiente controlado, por meio de dois estudos de caso simulados:

- **Estudo de Caso 1:** Propriedade rural com CAR ativo na Amazônia Legal. Serão utilizados dados simulados de satélite e sensores IoT, integrados à IA para gerar um PDD automatizado.
- **Estudo de Caso 2:** Simulação de um ciclo completo de certificação em ambiente blockchain com tokens de carbono gerados por contratos inteligentes na Cartesi.

Os testes buscarão medir: (i) tempo de execução das fases, (ii) custo computacional e de transações, (iii) eficácia na detecção de biomassa e classificação de uso do solo. Essa abordagem visa avaliar a viabilidade operacional e o potencial de escalabilidade do sistema.

5.2. Comparativo com Abordagens Existentes

O framework proposto foi comparado com três abordagens tecnológicas similares:

A principal inovação da presente proposta está na convergência de múltiplas tecnologias para automatizar o PDD, reduzir custos operacionais e democratizar o acesso à certificação, especialmente para pequenos produtores na Amazônia.

Tabela 5. Comparativo com soluções existentes

Critério	Toucan Protocol	Regen Network	Proposta deste artigo
Tecnologia Blockchain	Polygon (Layer 2)	Cosmos SDK	Cartesi (Layer 2, off-chain computing)
IA e Sensoriamento Remoto	Não aplicável	Parcial (sensores manuais)	Sim (IA + satélite + drones)
Foco geográfico	Global (sem foco específico)	EUA, América Latina	Amazônia Legal (Brasil)
Abordagem de certificação	Parceria com Verra	Sistema próprio	Multi-método: Verra + MSCI

5.3. Limitações e Desafios do Framework

Apesar do potencial do framework, algumas limitações devem ser reconhecidas:

- **Custo inicial de hardware:** aquisição de drones com LiDAR, sensores IoT e infraestrutura blockchain pode ser onerosa para projetos pilotos;
- **Conectividade limitada:** muitas regiões da Amazônia não possuem internet estável, o que pode comprometer a transmissão de dados em tempo real;
- **Aceitação institucional:** ainda há barreiras normativas e técnicas para o uso de tecnologias como blockchain no processo de certificação;
- **Validação contínua:** a eficácia do framework depende da calibração constante dos modelos de IA com dados atualizados e representativos.

6. Conclusão

O avanço do mercado de créditos de carbono no Brasil, impulsionado pela Lei 15.042/2024, abre espaço para integrar tecnologias como blockchain, IoT, imagens de satélite, drones e IA em sistemas confiáveis de monitoramento e validação. A criação de um framework tecnológico enfrenta desafios como aceitabilidade, credibilidade e aderência ao mercado, sendo a integridade dos créditos um requisito central, com ênfase em rastreabilidade, transparência e eficiência.

O framework proposto estrutura a interoperabilidade tecnológica ao longo das três primeiras fases do ciclo de um projeto de carbono: identificação, elaboração e validação/registro. A blockchain Cartesi (Layer 2), pela escalabilidade e baixo custo, funciona como espinha dorsal, garantindo imutabilidade e confiabilidade aos registros. Sensores IoT capturam dados ambientais em tempo real (como GEE e biomassa), enquanto satélites e drones viabilizam a análise detalhada da vegetação, permitindo verificação remota e contínua. Modelos de IA analisam esses dados, classificando padrões e identificando inconsistências.

Essa integração reduz custos e tempo de certificação, democratizando o acesso ao mercado, especialmente para pequenos e médios produtores. O sistema descentralizado também aumenta a confiança de investidores e certificadoras, ao minimizar riscos e garantir conformidade regulatória. Dessa forma, o framework fortalece os processos

de monitoramento e validação, contribuindo para o avanço do mercado de carbono e a sustentabilidade ambiental.

A evolução do framework requer o aprimoramento contínuo das metodologias de monitoramento e verificação, assegurando que os créditos representem reduções efetivas e verificáveis. A Cartesi permite auditorias automatizadas e transações escaláveis, enquanto IA e IoT ampliam a capacidade preditiva e o monitoramento contínuo das áreas certificadas. A tokenização dos créditos na blockchain facilita um comércio seguro e acessível, incentivando a participação de produtores e investidores.

A regulamentação do SBCE é vital para consolidar o Brasil no mercado internacional, alinhando-o a padrões como o GHG Protocol. O avanço em pesquisa e desenvolvimento permitirá adaptar o framework a mudanças regulatórias e operacionais, mantendo sua relevância ao longo do tempo. A integração entre blockchain, IA, IoT e sensoriamento remoto fortalece a credibilidade do mercado de carbono e impulsiona o país rumo à economia de baixo carbono.

7. Referencias

Referências

- Adigun, O. A., Falola, B. O., Esebre, S. D., Wada, I., Adewuyi, A. T., Olajide, T. D., and Oladokun, P. (2024). Enhancing carbon markets with fintech innovations: The role of artificial intelligence and blockchain. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 23(2):579–586.
- Aryal, K., Maraseni, T., Subedi, B. P., Laudari, H. K., Ghimire, P. L., Khanal, S. C., Zhang, H., and Timilsina, R. (2024). Redd+ at risk: Emerging ten questions that redd+ must answer. *Environmental Science Policy*, 156:103744.
- Dalsgaard, S. (2022). Tales of carbon offsets: between experiments and indulgences? *Journal of Cultural Economy*, 15(1):52–66.
- Delacote, P., L'Horty, T., Kontoleon, A., West, T., Creti, A., Filewod, B., Levelly, G., Guizar-Coutiño, A., Groom, B., and Elias, M. (2024). Strong transparency required for carbon credit mechanisms. *Nature Sustainability*, 7(6):706–713.
- den Besten, J. W., Arts, B., and Verkooijen, P. (2014). The evolution of redd+: An analysis of discursive-institutional dynamics. *Environmental Science Policy*, 35:40–48.
- Feng, Z. (2022). *Key Determinants of Achieving Trust in Applying Blockchain to Emission Trading in Finland*. Tilburg University e Turun Yliopisto.
- (FGV), F. G. V. (2022). O avanço do mercado voluntário de carbono no brasil: desafios e oportunidades. Technical report, Fundação Getulio Vargas (FGV).
- Filippi, P. D., Mannan, M., and Reijers, W. (2020). Blockchain as a confidence machine: The problem of trust challenges of governance. *Technology in Society*, 62:101284.
- Howson, P., Oakes, S., Baynham-Herd, Z., and Swords, J. (2019). Cryptocarbon: The promises and pitfalls of forest protection on a blockchain. *Geoforum*, 100:1–9.
- Huang, R., Yao, W., Xu, Z., Cao, L., and Shen, X. (2022). Information fusion approach for biomass estimation in a plateau mountainous forest using a synergistic system comprising uas-based digital camera and lidar. *arXiv preprint*, page 41.

- ISO, I. O. f. S. (2019). Iso 14090:2019 - adaptation to climate change — principles, requirements and guidelines.
- Kotsialou, G., Kuralbayeva, K., and Laing, T. (2022). Blockchain's potential in forest offsets, the voluntary carbon markets and redd+. *Environmental Conservation*, 49(3):137–145.
- Macreadie, P., Robertson, A., Spinks, B., Adams, M., Atchison, J., Bell-James, J., Bryan, B., Chu, L., Filbee-Dexter, K., Drake, L., Duarte, C., Friess, D., Gonzalez, F., Grafton, R., Helmstedt, K., Kaebernick, M., Kelleway, J., Kendrick, G., Kennedy, H., and Rogers, K. (2022). Operationalizing marketable blue carbon. *One Earth*, 5:485–492.
- Medina, G., Pereira, C., Ferreira, J., Berenguer, E., and Barlow, J. (2022). Searching for novel sustainability initiatives in amazonia. *Sustainability*, 14(16):10299.
- More, C., Swaby, G., and Wangdi, S. (2019). Por uma distribuição mais equitativa dos custos das alterações climáticas.
- MSCI, I. (2024). State of integrity in the global carbon-credit market.
- Olawade, D. B., Wada, O. Z., Ige, A. O., Egbewole, B. I., Olojo, A., and Oladapo, B. I. (2024). Artificial intelligence in environmental monitoring: Advancements, challenges, and future directions. *Hygiene and Environmental Health Advances*, 12:100114.
- on Scaling Voluntary Carbon Markets, T. (2021). Taskforce on scaling voluntary carbon markets: Final report. Technical report, Taskforce on Scaling Voluntary Carbon Markets.
- PNMC, G. d. B. (2009). Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. institui a política nacional sobre mudança do clima – pnmc e dá outras providências. Diário Oficial da União.
- Popescu, I.-S., Hitaj, C., and Benetto, E. (2021). Measuring the sustainability of investment funds: A critical review of methods and frameworks in sustainable finance. *Journal of Cleaner Production*, 314:128016.
- Prawitasari, P. P., Nurmalasari, M. R., and Kumalasari, P. D. (2024). Blockchain technology in the carbon market: Enhancing transparency and trust in emissions trading. *Jurnal Revenue: Jurnal Ilmiah Akuntansi*, 5(2):1495–1521.
- Raina, N., Zavalloni, M., and Viaggi, D. (2024). Incentive mechanisms of carbon farming contracts: A systematic mapping study. *Journal of Environmental Management*, 352:120126.
- Singh, S., Kiran, B. R., and Mohan, S. V. (2024). Carbon farming: a circular framework to augment co2 sinks and to combat climate change. *Environmental Science Advances*, 3:522–542.
- Swinkels, L. (2024). Trading carbon credit tokens on the blockchain. *International Review of Economics & Finance*, 91:720–733.
- Tavares, E. C., de Souza Meirelles, F., Tavares, E. C., Cunha, M. A., and Schunk, L. M. (2021). Blockchain in the amazon: creating public value and promoting sustainability. *Information Technology for Development*, 27:579–598.
- Verra (2025). Validation and verification.