

Smart Contracts para Rastreamento da Agricultura Familiar

Fábio R. Silva¹ Bruno B. Neves², Henrique Fan¹, Roben C. Lunardi³,
Diego Kreutz¹, Rodrigo B. Mansilha¹

¹Universidade Federal do Pampa em Alegrete (UNIPAMPA)

²Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)

³Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS)

{fabiosilva.aluno,henriquefan.aluno}@unipampa.edu.br

neves.bruno@edu.pucrs.br

roben.lunardi@restinga.ifrs.edu.br

{diegokreutz,rodrigomansilha}@unipampa.edu.br

Abstract. *Traceability in the fresh vegetables supply chain has gained increasing relevance, particularly in Brazil, where Joint Normative Instruction (INC) 02/2018 mandates the tracking of these food products, also influencing policies such as the allocation of 30% of school meal funds to family farming. Additionally, market research indicates a growing consumer preference for local and sustainable products. In this context, this study proposes a smart contracts-based solution for the traceability of fresh vegetable supply chain produced in family farming. The research includes an analysis of INC 02/2018 and presents a technological solution, assessing its economic feasibility across different blockchain networks (public and private) and different geographic levels.*

Resumo. *A rastreabilidade na cadeia produtiva de vegetais frescos tem ganhado relevância, especialmente no Brasil, onde a Instrução Normativa Conjunta (INC) 02/2018 estabelece a obrigatoriedade de rastreamento desses alimentos, influenciando também políticas como a destinação de 30% dos recursos da alimentação escolar para a agricultura familiar. Além disso, pesquisas de mercado indicam uma crescente preferência dos consumidores por produtos locais e sustentáveis. Neste contexto, este trabalho propõe uma solução baseada em smart contracts para rastrear a cadeia produtiva de vegetais frescos provenientes da agricultura familiar. O estudo inclui uma análise da INC 02/2018 e apresenta uma solução tecnológica, avaliando sua viabilidade econômica em diferentes redes de blockchains (públicas e privadas) para atender populações de múltiplas regiões geográficas.*

1. Introdução

Atualmente existem mais de 608 milhões de propriedades rurais, sendo cerca de 84% delas pequenas fazendas familiares [LOWDER et al. 2021]. No Brasil, a agricultura

familiar corresponde a 77% dos estabelecimentos rurais e impulsiona a economia de 90% dos municípios com até 20 mil habitantes [IBGE 2017].

A Instrução Normativa Conjunta nº 02/2018 (INC 02/2018) [BRASIL 2018] estabelece diretrizes para o rastreamento de vegetais frescos ao longo da cadeia produtiva no Brasil, impactando leis como a 11.947 [BRASIL 2009], que determina que ao menos 30% da verba pública para merenda escolar seja destinada à agricultura familiar. Em 2023, o governo federal repassou R\$ 5,5 bilhões para alimentação escolar, dos quais R\$ 1,65 bilhão deveriam beneficiar a agricultura familiar [BRASIL 2023].

Os dados de rastreabilidade da produção agrícola familiar devem ser acessíveis por múltiplas entidades, garantindo a integridade, imutabilidade e disponibilidade das informações. Neste contexto, propomos a utilização de *blockchain* [CHERVINSKI et al. 2019, Al-Jaroodi and Mohamed 2019] para permitir o compartilhamento distribuído das informações, promovendo a imutabilidade, transparência, auditabilidade, resultando em maior segurança e resiliência dos dados [DEDEOGLU et al. 2020]. A adoção de uma blockchain ajuda a fomentar a confiança - e, consequentemente, o valor - da cadeia produtiva da agricultura familiar brasileira. Adicionalmente, a aplicação de blockchains auxilia no processo de execução de políticas públicas, devido às características de transparência, não repúdio e autenticidade das transações contidas no livro razão [LUNARDI et al. 2024].

No entanto, barreiras como custos dificultam a implementação da rastreabilidade na agricultura familiar brasileira [REFFATTI et al. 2023]. Nesse contexto, realizamos um estudo comparativo de custos em três blockchains públicas, bem como comparamos o custo com uma solução de blockchain privada.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 discutimos os principais trabalhos relacionados. Nas Seções 3 e 4, apresentamos e avaliamos nossa proposta. Por fim, na Seção 5 tecemos as considerações finais.

2. Trabalhos Relacionados

A Tabela 1 sintetiza os principais trabalhos relacionados. Para cada um, apresentamos um resumo do objetivo, tecnologias, aplicações e características. Observa-se que, em linha com os trabalhos de [TIAN 2016], [DARAGHMI et al. 2024], [CARO et al. 2018] e [BABU and DEVARAJAN 2023], também propomos uma solução para uma cadeia produtiva, com a diferença que o nosso foco é cadeia de produção vegetal. Em âmbito nacional, os estudos de [TEJOS et al. 2022] e [SILVA and FREIRE 2024] exploram soluções específicas para as cadeias produtivas de cacau e cana-de-açúcar, respectivamente. Por outro lado, a abordagem proposta neste trabalho possui um escopo mais amplo, sendo aplicável a qualquer cultura produzida por agricultores familiares. Similarmente ao trabalho de [TIAN 2016] apresentamos uma análise de custo, porém o artigo citado avalia somente o custo com RFID. Este trabalho se diferencia dos demais, pois aborda a rastreabilidade por meio de *smart contracts* na cadeia produtiva de vegetais brasileira, para atender à INC 02/2018, e também realiza uma análise de custos ao utilizar diversas redes públicas e privada para sustentar transações estimadas para agricultura familiar.

Tabela 1. Trabalhos relacionados.

Trabalho	Objetivo principal	Tecnologia	Aplicação	Características
[TIAN 2016]	Sugere um sistema de rastreabilidade para a cadeia agroalimentar chinesa visando garantir segurança e qualidade alimentar.	Integração de Radio-Frequency Identification com blockchain.	Frutas, vegetais frescos e carnes (suína, avícola e bovina).	Coleta e gerenciamento de dados em todas as transações da cadeia produtiva; monitoramento em tempo real; análise dos benefícios e desafios em comparação com soluções centralizadas.
[DARAGHMI et al. 2024]	Propõe o AgroChain, um sistema baseado em Blockchain, projetado para gerenciar o processo da Cadeia de Suprimentos Agrícolas.	Blockchain, Metamask, Ethereum.	Cadeia de Suprimentos Agrícolas.	Foram projetadas três arquiteturas para evitar a automanipulação: centralizada, distribuída e multi-blockchain centralizada.
[CARO et al. 2018]	Apresenta o AgriBlockIoT, uma solução integrada para rastreabilidade na cadeia agroalimentar combinando IoT e blockchain.	Ethereum e Hyperledger Sawtooth.	Agricultura em geral.	Sistema totalmente distribuído que integra dispositivos IoT para coleta e disseminação de dados; avaliação experimental demonstrou que Ethereum superou Sawtooth em latência, uso de CPU e consumo de rede.
[TEJOS et al. 2022]	Investiga o uso da blockchain na cadeia do cacau amazônico para garantir transparência e integridade das informações.	Hyperledger Fabric.	Produção de cacau na Amazônia.	A arquitetura proposta possui dois subsistemas: Planta Local, responsável pelo processamento do cacau, e Sistema em Nuvem, que armazena a blockchain da produção de chocolate.
[BABU and DEVARAJAN 2023]	Propõe uma solução para rastrear produtos agrícolas não perecíveis, minimizando inconsistências e fraudes.	Blockchain e IPFS para dados centralizados.	Produtos agrícolas não perecíveis.	Modelo híbrido com blockchain para dados públicos e IPFS para dados privados criptografados; contratos inteligentes para automação.
[da SILVA 2024]	Explora a aplicação da tecnologia blockchain no agronegócio, focando na certificação e rastreamento na produção de cana-de-açúcar.	Não especificado.	Produção de cana-de-açúcar.	Desenvolvimento de um sistema em parceria com a Coplacana, Usina Graneli e Embrapa Informática Agropecuária para rastrear e disponibilizar informações ao longo da cadeia produtiva da cana-de-açúcar.
Este trabalho	Propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de rastreabilidade da produção agrícola utilizando blockchain e <i>smart contracts</i> .	Blockchain, <i>smart contracts</i>	Produtos vegetais frescos, atendendo a INC 02/2018.	Apresenta os requisitos necessários, fornece um protótipo de contrato a ser utilizado, avalia o possível alcance da ferramenta e estima os custos com redes públicas e privada.

3. Smart Agro RAF

A Figura 1 apresenta uma visão geral do sistema considerando requisitos (Subseção 3.1) e funcionalidade do aplicativo distribuído (Subseção 3.2). As setas pretas representam o fluxo dos produtos na cadeia produtiva, indicando o percurso que um produto pode seguir ao transitar por diversas entidades. Os três pontos indicam que essa cadeia não se limita ao fluxo demonstrado na figura, podendo incluir cadeias mais complexas ou casos de venda direta ao consumidor final, como a comercialização de um lote inteiro diretamente do produtor para uma escola. As demais setas indicam a interação do usuário com a blockchain, representada na figura por um contrato. O RF1 representa a primeira etapa do processo, na qual ocorre a inserção de *tokens* dos ativos gerados pelo produtor. Nesse estágio, o produtor acessa o sistema e cadastra as informações de sua produção, criando um lote para o produto. Em seguida, é gerado um contrato cujo proprietário é o próprio produ-

tor. RF2 ilustra a revogação de *tokens*, quando o responsável pelo contrato acessa o sistema e altera sua situação, indicando que transações não podem ser realizadas neste registro. RF3 demonstra a transferência de *tokens*, que ocorre quando há movimentação na cadeia do produto. O atual proprietário do bem acessa o sistema e define o destino. RF4 representa a rastreabilidade da cadeia produtiva, permitindo que qualquer usuário consulte o contrato e obtenha informações sobre todas as movimentações de um produto.

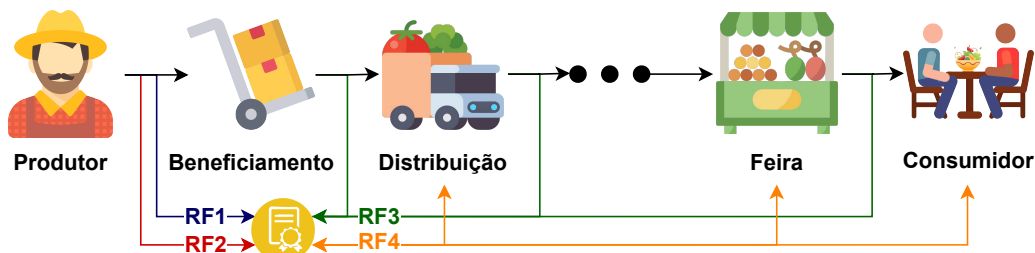


Figura 1. Visão geral da cadeia produtiva.

3.1. Análise de Requisitos

A INC 02/2018 estabelece um conjunto de informações que precisam ser persistidas durante a venda e a compra de produtos vegetais, como mostra a Tabela 2. Observe-se que os campos são basicamente os mesmos para entrada e saída, alterando apenas os termos sublinhados dependendo do ponto de vista da pessoa que registra (comprador ou fornecedor).

Tabela 2. Dados necessários conforme INC 02/2018 [BRASIL 2018].

1 - Informações do Produto Vegetal	1 - Informações do Produto Vegetal
1.1 - Nome do produto vegetal	1.1 - Nome do produto vegetal
1.2 - Variedade ou cultivar	1.2 - Variedade ou cultivar
1.3 - Quantidade do produto <u>recebido</u>	1.3 - Quantidade do produto <u>expedido</u>
1.4 - Identificação do lote	1.4 - Identificação do lote
1.5 - Data do <u>recebimento</u> do produto vendido	1.5 - Data da <u>expedição</u> do produto vendido
2 - Informações do <u>Fornecedor</u>	2 - Informações do <u>Comprador</u>
2.1 - Nome ou Razão Social	2.1 - Nome ou Razão Social
2.2 - CPF, I.E ou CNPJ ou CGC/MAPA	2.2 - CPF, I.E ou CNPJ ou CGC/MAPA
2.3 - Endereço completo, ou quando localizado em zona rural, coordenada geográfica ou CCIR	2.3 - Endereço completo, ou quando localizado em zona rural, coordenada geográfica ou CCIR

Para realizar rastreamento da cadeia produtiva da agricultura familiar em conformidade com a INC 02/2018 usando *smart contracts* consideramos os seguintes requisitos funcionais.

- RF1: Inserção de *tokens* dos ativos gerados pelo produtor.** Antes que um produto seja movimentado (por exemplo, para venda), ele deve ser agrupado em um lote de produção e receber um conjunto de informações junto a um *token* único. *Tokens* derivados podem então ser gerados a partir do *token*/lote original para identificar itens específicos dentro do lote.
- RF2: Revogação de *tokens*.** Em caso de erro ou quando um produto/lote deixa de existir, deve haver uma funcionalidade para revogar o *token* correspondente.

RF3: Transferência de *tokens*. Lotes podem ser movimentados entre entidades gerando uma cadeia de rastreabilidade. Para isso, é necessário que as informações de transação sejam registradas para rastreamento.

RF4: Consulta de movimentação de *tokens*. Lotes e produtos podem ser identificados e rastreados baseados no *token* e registros de transferência de *tokens*. As informações dos produtos, lotes e movimentações devem ser públicas.

Além disso, consideramos os seguintes requisitos não funcionais.

RNF1: Padronização. Os ativos tokenizados devem seguir padrões que atendam às regulamentações vigentes, incluindo os campos definidos pela INC 02/2018, conforme ilustrado na Tabela 2. Ainda, os *tokens* devem seguir o padrão ERC-20, bem como avaliar outros padrões (por exemplo, ERC 1400) para garantir a segura implementação dos *smart contracts*, visto a forte vinculação com ativos do mundo físico.

RNF2: Custo. Os custos referem-se às taxas de transação em redes públicas para a execução de *smart contracts*, cuja variação depende da demanda da rede e da complexidade computacional das operações, impactando a viabilidade econômica da rede (veja a estimativa de custos na Seção 4.2). Em contrapartida, em blockchains privadas não existem custos associados a taxas de transação, o que resulta em uma redução significativa de custo em comparação com as redes públicas.

RNF3: Desempenho. O desempenho é impactado pela escalabilidade. Em redes públicas, a adição de novos nós pode resultar em um aumento na latência das transações, devido à sobrecarga adicional na comunicação e no processamento. Enquanto isso, em redes privadas, onde o número de participantes é conhecido, o desempenho tende a ser mais previsível, permitindo uma estimativa mais precisa dos tempos de respostas e da eficiência do sistema.

3.2. *dApp*

A seguir, apresentamos um contrato inteligente para rastreio da cadeia produtiva da agricultura familiar que atenda os requisitos funcionais e não funcionais apresentados na seção anterior [SMART AGRO RAF 2025].

O contrato foi desenvolvido em Solidity [The Solidity Authors 2025, Bauer 2022, Dannen 2017], uma linguagem de programação especificamente para o desenvolvimento de contratos inteligentes e executável na Ethereum Virtual Machine (EVM). Solidity é suportado pela plataforma Hyperledger Besu, garantindo compatibilidade com infraestruturas permissionadas e públicas baseadas em EVM. A escolha da Solidity se justifica por sua ampla adoção, sua robustez em termos de manutenibilidade e suporte de longo prazo, além de um ecossistema consolidado de bibliotecas, ferramentas e uma comunidade ativa. Esses fatores garantem a sustentabilidade do código e facilitam sua evolução. A seguir, são apresentados os principais trechos do código.

A Listagem 1 apresenta o trecho inicial do contrato, contendo a definição de suas variáveis principais e do construtor. Quando o contrato é criado, a função **constructor** é executada, configurando parâmetros como o nome do produto e a ativação inicial do contrato (atendendo RF1). O *deploy* se refere à ação de implantar

o contrato na blockchain. Esse é o processo inicial em que o código do contrato é publicado e se torna acessível para interagir com outros contratos e endereços na rede. A variável `owner_address` armazena o endereço da carteira que realizou o *deploy*, estabelecendo o proprietário do contrato. O nome do produto é registrado na variável `product_name`, enquanto `batch_id` identifica o lote. A variável booleana `is_active` permite o controle do funcionamento do contrato, possibilitando que ele seja pausado ou retomado conforme necessário (satisfazendo RF2). Esse mecanismo é útil para situações em que a interação com o contrato deve ser temporariamente suspensa, garantindo maior controle sobre sua operação.

Listagem 1. Estrutura inicial do contrato.

```
1 contract SupplyChain {
2     address owner_address;
3     string product_name;
4     uint product_quantity;
5     string product_expedition_date;
6     string product_type;
7     string batch_id;
8     bool is_bought;
9     bool is_active;
10
11     constructor(string memory product_name_param, string memory
12         batch_id_param) {
13         product_name = product_name_param;
14         batch_id = batch_id_param;
15         is_bought = false;
16         owner_address = msg.sender;
17         is_active = true;
18     }
19 }
```

A Listagem 2 apresenta a função para registro de movimentações, que se refere à atualização das transações na cadeia produtiva. A operação permite que o proprietário do contrato adicione uma nova atualização, como o registro de informações sobre a produção, transporte, armazenamento ou compra de um produto. Ela inclui dados como a localização atual do produto e a identidade do comprador, cumprindo RF3.

Listagem 2. Registro de movimentações.

```
1 function addState(string memory message, string memory
2     buyer_name, string memory buyer_identification, string
3     memory current_location, uint type_param) public onlyOwner
4     onlyIfActive {
5     supply_chain.push(StatusUpdate({
6         who: msg.sender,
7         message: message,
8         updated_type: type_param,
9         buyer_name: buyer_name,
10        buyer_identification: buyer_identification,
11        current_location: current_location
12    }));
13 }
```

```

10         emit StatusUpdated("Preparation", msg.sender, message);
11     }

```

A Listagem 3 apresenta a função responsável por consultar o contrato e rastrear toda a movimentação do produto, atendendo o RF4.

Listagem 3. Consulta movimentações.

```

1     function getAllInSupplyChain() public view onlyIfActive returns
2         (address[] memory, string[] memory, uint[] memory) {
3         uint length = supply_chain.length;
4         address[] memory addresses = new address[](length);
5         string[] memory messages = new string[](length);
6         uint[] memory updated_types = new uint[](length);
7
8         for (uint i = 0; i < length; i++) {
9             addresses[i] = supply_chain[i].who;
10            messages[i] = supply_chain[i].message;
11            updated_types[i] = supply_chain[i].updated_type;
12        }
13        return (addresses, messages, updated_types);

```

4. Avaliação

Esta seção apresenta análises relacionadas à viabilidade da ferramenta. A Subseção 4.1 traz um levantamento dos dados da produção agrícola familiar, que embasará a análise realizada na Subseção 4.2, onde se avaliou os possíveis custos da ferramenta (RNF2).

4.1. Levantamento de Dados da Produção Agrícola

Para estimar o potencial de alcance de uma ferramenta de rastreamento da produção agrícola familiar, foi realizado um levantamento com base nos dados do Censo Agropecuário do IBGE¹ mais recente, extraídos por meio do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)². A partir desses dados, foram examinados dois aspectos: as safras estimadas e a comercialização dos produtos agrícolas, com ênfase nos itens regulamentados pela Instrução Normativa Conjunta (INC) 02/2018.

A Tabela 4 apresenta dados sobre estabelecimentos e safras, organizados por região geográfica, iniciando pela totalidade do Brasil, seguida pela Região Sul, depois pelo estado do Rio Grande do Sul e, por fim, pelo município de Alegrete, onde o software de rastreamento está sendo desenvolvido. Essa organização permite observar, de forma progressiva, a distribuição e a estimativa de safras por diferentes escalas. Para cada localidade, há uma série de indicadores, cujo detalhamento está resumido na Tabela 3.

¹<https://www.ibge.gov.br/>

²<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados-definitivos>

³O número de safras de cada produto foi estimado com base em consulta a especialistas. Dados disponíveis no repositório [SMART AGRO RAF 2025].

Tabela 3. Indicadores.

Estabelecimentos	Quantidade de estabelecimentos agropecuários registrados. Esses números consideram apenas os produtores formalmente cadastrados e pertencentes a grupos de atividade econômica responsáveis pelo cultivo de produtos vegetais, abrangendo lavouras temporárias, horticultura e floricultura, e lavouras permanentes – desconsiderando, aquicultura e pecuária, por exemplo.
Estabelecimentos por Produto	Quantidade total de estabelecimentos que cultivam os produtos, considerando que um mesmo produtor pode cultivar mais de um produto. Corresponde ao somatório dos estabelecimentos com registro de cultivo para determinados produtos.
Safras Estimadas	Total de ciclos produtivos anuais, calculado com base no total de estabelecimentos por produto multiplicado pelo número médio de safras anuais estimada por produto ³ .
Estabelecimentos por Produto INC	Número total de estabelecimentos que cultivam os produtos, correspondentes exclusivamente aos produtos regulamentados pela INC 02/2018.
Safras Estimadas INC	Número de ciclos produtivos anuais referentes apenas aos produtos regulamentados pela INC 02/2018.

Tabela 4. Registros de produção - agricultura familiar.

Localização Geográfica	Estabelecimentos	Estabelecimentos por Produto	Safras Estimadas	Estabelecimentos por Produto INC	Safras Estimadas INC
Brasil	1.888.457	11.925.527	19.555.602	6.911.625	9.256.469
Sul	379.998	3.084.718	4.694.317	1.963.019	2.500.016
RS	184.380	1.792.817	2.519.122	1.217.442	1.399.099
Alegrete	132	855	1.781	664	1.390

A Tabela 4 mostra que, no Brasil, existem aproximadamente 6,91 milhões de registros de produção relacionados aos produtos da INC 02/2018, o que representa cerca de 58% do total de produções agrícolas familiares. Esse percentual evidencia a relevância da rastreabilidade dentro desse segmento. Em termos de safras estimadas, os produtos regulamentados pela INC 02/2018 somam aproximadamente 9,25 milhões de ciclos produtivos anuais, destacando a necessidade de um sistema eficaz para rastreamento e conformidade regulatória. A Região Sul concentra aproximadamente 1,96 milhão de produções INC, com um volume estimado de 2,5 milhões de safras anuais dentro da norma. O estado do Rio Grande do Sul representa uma grande parte desse total, com mais de 1,2 milhão de registros INC. No município de Alegrete, os produtos regulamentados pela INC 02/2018 somam 664 registros de produção, com 1.390 ciclos produtivos estimados.

A Tabela 5 resume os volumes produzidos e comercializados. Os dados são organizados tanto de forma total quanto especificamente para os produtos regulamentados pela INC 02/2018. A organização dos dados segue a divisão por região geográfica, seguindo o mesmo padrão da tabela anterior. Os indicadores incluem o volume total de vendas (em toneladas), o valor correspondente dessas vendas (em R\$), além do volume e do valor das vendas exclusivamente dos produtos regulamentados pela INC 02/2018. Essa estrutura permite uma análise detalhada da participação desses produtos no mercado e sua relevância econômica em diferentes escalas territoriais.

Tabela 5. Vendas de produção - agricultura familiar.

Localização Geográfica	Volume de Vendas (toneladas)	Valor das Vendas (R\$)	Volume de Vendas INC (toneladas)	Valor das Vendas INC (R\$)
Brasil	43.045.679	37.712.360.000	12.196.830	12.784.782.000
Sul	17.770.057	18.309.768.000	3.739.796	3.480.625.000
RS	7.557.517	8.595.332.000	1.523.425	1.690.637.000
Alegrete	16.241	12.629.000	719	1.375.000

4.2. Estimativa de Custos

Para estimar os custos de uso da blockchain, foram analisadas redes públicas e uma infraestrutura de rede privada. No caso das redes públicas, a metodologia adotada envolveu a medição da quantidade de *gas* necessária para cada operação — *gas* sendo a taxa exigida para a execução de transações na blockchain. Essa medição foi realizada por meio da ferramenta Remix⁴, e os valores obtidos foram multiplicados pela taxa de *gas* vigente, conforme disponibilizado nos sites oficiais de cada rede.

A Tabela 6 apresenta o custo estimado para diferentes operações realizadas nas diferentes redes e moedas, considerando as cotações de 14 de março de 2025. As três redes analisadas utilizam a Máquina Virtual Ethereum (EVM) [METAMASK SUPPORT 2024], usando o Gwei como subunidade da criptomoeda, correspondendo a 1×10^{-9} da moeda, sendo que o *gas* é precificado em Gwei [ETHERSCAN 2024]. As páginas das redes fornecem a métrica do custo de 1 unidade de *gas* em tempo real, permitindo estimar os gastos com operações na rede. Observe-se que o custo do *deploy* é relativamente alto porque envolve a criação de um novo contrato na blockchain, incluindo a gravação de dados fundamentais, como o nome do produto e a chave pública do proprietário. Já as demais operações possuem um custo mais baixo, pois não envolve a criação de um novo contrato ou a inserção de grandes volumes de dados.

Tabela 6. Custo por operação.

Operação	Gas estimado	Total em Gwei	Total em Criptomoeda	Total em Dólar	Total em Reais
Ethereum					
Deploy	1.658.648	1.030.020,41	0,001030020408	1,9889	11,4162
Movimentação	220.413	136.876,47	0,000136876473	0,2643	1,5171
Finalização da cadeia	34.502	21.425,74	0,000021425742	0,0414	0,2375
Binance					
Deploy	1.658.648	1.658.648	0,001658648	0,9659	5,5442
Movimentação	220.413	220.413	0,000220413	0,1284	0,7368
Finalização da cadeia	34.502	34.502	0,000034502	0,0201	0,1153
Polygon					
Deploy	1.658.648	88.837.186,88	0,08883718688	0,0192	0,1104
Movimentação	220.413	11.805.320,28	0,01180532028	0,0026	0,0147
Finalização da cadeia	34.502	1.847.927,12	0,00184792712	0,0004	0,0023

Cotações⁵: Dólar R\$ 5,74, Gwei: 0,000000001 Criptomoeda, Ether: \$ 1.930,91, Ethereum Gas Tracker: 0,621 Gwei, Binance: \$ 582,34, BNB Gas Tracker: 1,000 Gwei, Polygon \$ 0,22, Polygon Gas Tracker: 53,560 Gwei.

A Tabela 7 apresenta o custo total previsto, organizado por região geográfica

⁴<https://remix.ethereum.org/>

e redes públicas consideradas. O cálculo foi baseado nas safras estimadas dos produtos especificados pela INC 02/2018, conforme os dados da Tabela 4. Para fins de análise, procuramos estimar o limiar inferior de custo do uso da aplicação. Assim, consideramos um cenário onde o produtor cadastra toda a sua colheita como um único lote e a vende diretamente ao consumidor final. Um exemplo seria a venda de toda a produção diretamente para uma escola. Nesse sentido, consideramos na estimativa: a) a adesão total dos produtores desses itens ao uso da ferramenta, b) cada safra gera um único contrato, e c) demanda apenas uma movimentação na blockchain.

Observa-se na Tabela 7 que a escolha da blockchain impacta fortemente nos custos totais. A rede Ethereum apresenta os custos mais elevados, com um impacto percentual de até 1,33% em relação ao valor transacionado, devido às suas altas taxas de transação. A Binance Smart Chain surge como uma alternativa intermediária, com custos menores que os da Ethereum, mas superiores aos da Polygon, alcançando um impacto de até 0,65%. No outro extremo, a Polygon se destaca como a opção mais econômica, com custos totais reduzidos e impacto inferior a 0,01%.

Tabela 7. Custo total previsto (para venda direta ao consumidor final).

Localização Geográfica	Safras Estimadas INC	Custo Deploy (R\$)	Custo Movimentações (R\$)	Custo Finalização da cadeia (R\$)	Custo total (R\$)	Impacto da Blockchain nos Custos
Ethereum						
Brasil	9.256.469	105.673.260	14.042.618	2.198.139	121.914.017	0,9536%
Sul	2.500.016	28.540.563	3.792.674	593.680	32.926.918	0,9460%
RS	1.399.099	15.972.327	2.122.517	332.245	18.427.089	1,0899%
Alegrete	1.390	15.868	2.109	330	18.307	1,3314%
Binance						
Brasil	9.256.469	51.320.171	6.819.791	1.067.525	59.207.487	0,4631%
Sul	2.500.016	13.860.712	1.841.910	288.321	15.990.943	0,4594%
RS	1.399.099	7.756.954	1.030.799	161.355	8.949.108	0,5293%
Alegrete	1.390	7.707	1.024	160	8.891	0,6466%
Polygon						
Brasil	9.256.469	1.021.606	135.758	21.251	1.178.615	0,0092%
Sul	2.500.016	275.919	36.666	5.739	318.324	0,0091%
RS	1.399.099	154.414	20.520	3.212	178.146	0,0105%
Alegrete	1.390	153	20	3	177	0,0129%

Observe-se na Tabela 7 que os custos proporcionais mantêm um padrão semelhante entre as diferentes escalas de abrangência geográfica, desde o nível municipal até o nacional. Respeitadas as proporções e desconsiderando aspectos de escalabilidade, um estudo em uma escala local pode fornecer subsídios relevantes para a compreensão do impacto em níveis mais amplos.

A Figura 2 apresenta projeções do impacto do número de movimentações por safra (e.g., distribuidor, venda no atacado) nos custos das diferentes redes consideradas. Cada subfigura representa um nível de abrangência geográfica. Observe-se que

⁵Fonte em 14 mar. 2025, 14h54 (UTC-3): <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/fechamentodolar>, <https://etherscan.io/gastracker>, <https://bscscan.com/gastracker>, <https://polygonscan.com/gastracker>.

o custo total cresce linearmente ao número de movimentações, refletindo a influência direta das transações adicionais no custo de rastreamento da produção agrícola. Esse comportamento é especialmente evidente na Ethereum, onde os custos apresentam um grau de crescimento maior que as demais redes. A Binance Smart Chain (BSC) apresenta um comportamento intermediário, com custos que crescem a uma taxa menor que os da Ethereum, mas ainda superiores aos da Polygon. A rede Polygon, por sua vez, apresenta os menores custos operacionais, com um crescimento quase nulo e significativamente inferior às demais opções. Novamente, os custos proporcionais mantêm um padrão semelhante entre as diferentes escalas de abrangência geográfica, desde o nível municipal até o nacional, para diferentes números de movimentações.

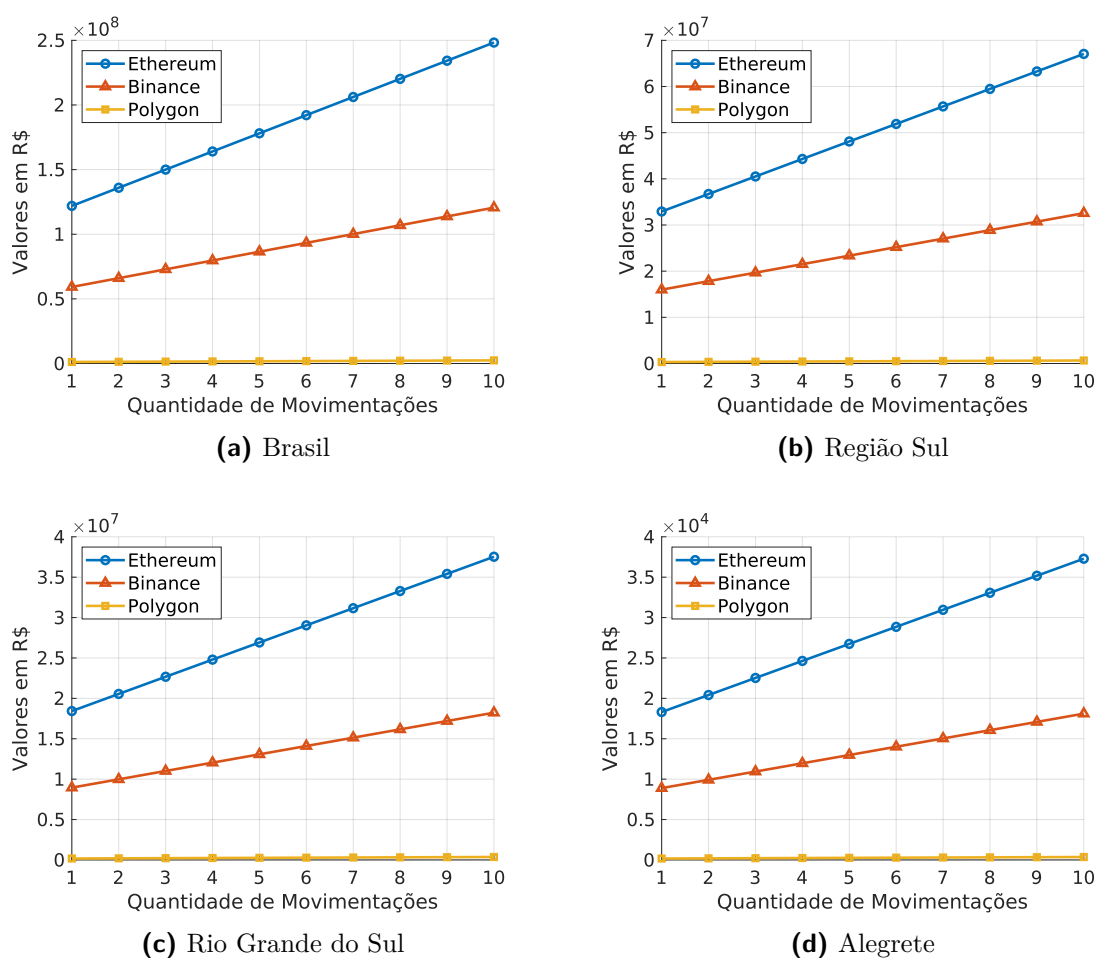


Figura 2. Comparação da evolução dos custos entre diferentes regiões.

Por fim, consideramos a implantação do Smart Agro RAF usando como substrato uma rede privada. Inspirado no trabalho de [SILVA et al. 2021], adotamos, para fins de estimativa de custo, a solução em nuvem da Amazon Web Services (AWS)⁶. Escolhemos como referência oito instâncias Amazon EC2, localizadas na região Oeste dos EUA (Oregon), cada uma com 4 vCPUs, 8 GB de memória RAM e 128 GB de armazenamento. Considerando as mesmas cotações anteriores, o custo

⁶<https://aws.amazon.com/>

anual estimado para essa configuração é de R\$ 32.030,58. Percentualmente, esse custo representa os seguintes impactos: Brasil - 0,0003%, Sul 0,0009%, RS 0,0019% e Alegrete 2,33%.

Observe-se que o custo de uma rede privada não varia conforme o número de transações realizadas, e, portanto é igual para todas as regiões geográficas consideradas. Considerando apenas o custo, para implantação do Smart Agro RAF na cidade de Alegrete, é preferível adotar uma rede pública. Para as abrangências maiores consideradas no estudo, a rede privada é mais vantajosa.

5. Considerações Finais

A utilização de contratos inteligentes para rastrear a cadeia produtiva da agricultura familiar brasileira, conforme a INC 02/2018, tem o potencial de agregar valor aos produtores e proporcionar mais segurança aos consumidores. Neste trabalho, apresentamos uma análise de requisitos e uma implementação. A análise de custos, considerando múltiplas redes públicas, diferentes abrangências geográficas e diversas quantidades de movimentações, evidencia os desafios econômicos a serem superados para a implantação em redes públicas. Além disso, também foi analisada a viabilidade de uma infraestrutura privada, avaliando seus custos fixos e o impacto financeiro em diferentes escalas, desde a cidade de Alegrete até o cenário nacional. Os resultados obtidos indicam que a utilização de redes privadas é tecnicamente viável e economicamente mais vantajosa, sendo uma alternativa mais adequada para uma implementação em larga escala, especialmente em níveis regional e nacional.

Como trabalhos em andamento, planejamos avaliar o desempenho do sistema em redes privadas, a fim de identificar a configuração mais eficiente para viabilizar a solução. Pretendemos integrá-la às iniciativas voltadas para a rastreabilidade da agricultura familiar, como o Programa de Extensão Rastreabilidade da Agricultura Familiar⁷. Por fim, esperamos avaliar a adaptação da solução para ecossistemas relacionados que enfrentam imposições legais similares, como o rastreamento da produção de arroz.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), por meio dos editais 02/2022, 08/2023, 09/2023 e dos termos de outorga 22/2551-0000841-0, 24/2551-0001368-7 e 24/2551-0000726-1, da CAPES (Código de Financiamento 001) e da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa no âmbito do projeto Iliada. Ainda, Roben recebeu apoio do IFRS e do EDITAL FAPERGS 14/2022.

Referências

- Al-Jaroodi, J. and Mohamed, N. (2019). Blockchain in industries: A survey. IEEE access, 7:36500–36515.
- BABU, S. and DEVARAJAN, H. (2023). Agro-food supply chain traceability using blockchain and ipfs. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 14(1).

⁷<https://proraf.com.br>

- Bauer, D. P. (2022). Solidity. In Getting Started with Ethereum: A Step-by-Step Guide to Becoming a Blockchain Developer, pages 13–16. Springer.
- BRASIL (2009). Lei nº 11.947, de 16 de junho de 2009. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l11947.htm. Acesso: 13 nov. 2024.
- BRASIL (2018). Instrução normativa conjunta - inc nº 2, de 7 de fevereiro de 2018. https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/2915263/do1-2018-02-08-instrucao-normativa-conjunta-inc-n-2-de-7-de-fevereiro-de-2018-2915259. Acesso em: 10 out. 2024.
- BRASIL (2023). Governo repassa r\$ 2,5 bilhões em seis meses para alimentação escolar. <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2023/07/governo-repassa-r-2-5-bilhoes-em-seis-meses-para-alimentacao-escolar>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- CARO, M. P., ALI, M. S., VECCHIO, M., and GIAFFREDA, R. (2018). Blockchain-based traceability in agri-food supply chain management: A practical implementation. In 2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture-Tuscany (IOT Tuscany), pages 1–4. IEEE.
- CHERVINSKI, J. O., MELCHIOR, F., FERNANDES, R., SÁ, G., ANTUNES, L., KREUTZ, D., and MANSILHA, R. (2019). Introdução aos blockchains: Teoria e prática. In Minicursos da XVII Escola Regional de Redes de Computadores, pages 1–21. Sociedade Brasileira de Computação - SBC, 1 edition.
- da SILVA, F. (2024). Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes.
- Dannen, C. (2017). Solidity programming. In Introducing Ethereum and Solidity: Foundations of Cryptocurrency and Blockchain Programming for Beginners, pages 69–88. Springer.
- DARAGHMI, E.-Y., JAYOUSI, S., DARAGHMI, Y.-A., DARAGHMA, R. S. M., and FOUCAL, H. (2024). Smart contracts for managing the agricultural supply chain: A practical case study. IEEE Access, 12:125462–125479.
- DEDEOGLU, V., DORRI, A., JURDAK, R., MICHELIN, R. A., LUNARDI, R. C., KANHERE, S. S., and ZORZO, A. F. (2020). A journey in applying blockchain for cyberphysical systems. In 2020 International Conference on COMMunication Systems & NETworkS (COMSNETS), pages 383–390.
- ETHERSCAN (2024). What is gas fee? <https://info.etherscan.com/what-is-gas-fee/>. Acesso em: 06 mar. 2025.
- IBGE (2017). Censo agropecuário 2017. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuario.html>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- LOWDER, S. K., SANCHEZ, M. V., and BERTINI, R. (2021). Which farms feed the world and has farmland become more concentrated? World Development, 142:105455.

- LUNARDI, R. C. et al. (2024). When blockchain meets smart cities: Opportunities, security and future research. In Ruj, S., Kanhere, S. S., and Conti, M., editors, Blockchains, volume 105 of Advances in Information Security. Springer.
- METAMASK SUPPORT (2024). User guide: Gas. <https://support.metamask.io/more-web3/learn/user-guide-gas/>. Acesso em: 12 mar. 2025.
- REFFATTI, L., BRIETZKE, J., and BARBOSA, J. L. (2023). Agricultural traceability via namob application: The first evaluation cycle under design science research. iSys - Brazilian Journal of Information Systems, 16(1):9:1–9:31.
- SILVA, F. C. d. and FREIRE, F. J. (2024). Inovação e desenvolvimento em cana-de-açúcar: manejo, nutrição, bioinsumos, recomendação de corretivos e fertilizantes. Embrapa; Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasília, DF.
- SILVA, I., GONZALEZ, P., and MENDONÇA, D. (2021). Estimating transaction cost for cloud-based private ethereum blockchains. In Anais do IV Workshop em Blockchain: Teoria, Tecnologias e Aplicações, pages 27–39. SBC.
- SMART AGRO RAF (2025). Repositório do projeto no GitHub. <https://github.com/Smart-AgroRAF/wblockchain2025>. Acesso em: 28 mar. 2025.
- TEJOS, R. A. G., DE BRITO CARVALHO, T. C. M., JÚNIOR, M. A. S., SANTOS, B. J., and NOBRE, I. (2022). Blockchain aplicado à rastreabilidade da cadeia produtiva do cacau da amazônia. In Simpósio Brasileiro de Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais (SBSeg), pages 43–56. SBC.
- The Solidity Authors (2025). Solidity documentation. <https://docs.soliditylang.org/en/v0.8.29/>. Acesso em: 18 mar. 2025.
- TIAN, F. (2016). An agri-food supply chain traceability system for china based on rfid & blockchain technology. In 2016 13th international conference on service systems and service management (ICSSSM), pages 1–6. IEEE.