

A aplicabilidade da tecnologia Blockchain na cadeia produtiva do ouro

Khiara Aiane Pinheiro de J. Ferreira¹, Mateus Henrique G. dos Santos¹, Vinicius Oliveira Souza¹

¹Instituto Federal de Mato Grosso - Pontes e Lacerda
Caixa Postal 99 – 78.250-000 – Pontes e Lacerda – MT – Brasil

{khiaraaiane,mateushgds75@gmail.com, vinicius.oliveira@ifmt.edu.br}

Abstract. Gold mining has grown exponentially in Brazil; however, due to criminal practices, gold production has resulted in various types of damage. This article explores blockchain technology, a decentralized and immutable digital ledger that stores transactions in chained blocks, as a promising tool for redefining gold mining activities, promoting transparency and identifying the metal's origin—improving traceability in the gold production chain.

Resumo. A mineração de ouro tem crescido exponencialmente no Brasil, contudo, em razão de práticas delituosas, a produção aurífera tem resultado em danos de diversas ordens. Este artigo busca explorar a tecnologia blockchain, enquanto registro digital descentralizado e imutável, que armazena transações em blocos encadeados, como uma ferramenta promissora para redefinir a atividade minerária do ouro, de modo a promover a transparência e a identificação da origem do metal, isto é, aprimorar a rastreabilidade na cadeia produtiva do ouro.

1. Introdução

A atividade minerária em Mato Grosso vem apresentando crescimento expressivo nas últimas décadas, destacando-se tanto pela atuação de cooperativas de garimpo quanto pela presença marcante da mineração ilegal. Esse aumento contribui para que o Estado aufera mais recursos financeiros, especialmente com a arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM). Em 2017, essa arrecadação chegou a mais de 19 milhões de reais, e no ano seguinte, quase dobrou, atingindo cerca de 38,9 milhões, com cidades como Nobres, Poconé e Peixoto de Azevedo entre as mais beneficiadas.

Contudo, em municípios como Pontes e Lacerda, onde a expectativa de desenvolvimento econômico impulsionado pelo garimpo é alta, a realidade é marcada por desafios complexos. A falta de fiscalização adequada e a prevalência da mineração irregular dificultam a arrecadação completa dos tributos devidos, causando perdas financeiras significativas e, mais gravemente, provocando danos ambientais muitas vezes irreversíveis. Tal cenário demonstra que a mineração no estado, especialmente na região da Fronteira Oeste, enfrenta obstáculos críticos relacionados à formalização e ao controle

da atividade.

A falta de rastreabilidade do ouro, frequentemente extraído em áreas remotas e sem a devida autorização legal, impede que consumidores e empresas verifiquem a origem do metal precioso. Essa opacidade não apenas afeta a reputação do setor, mas também dificulta o acesso a mercados internacionais cada vez mais exigentes quanto à sustentabilidade e à ética na cadeia produtiva (GOMES; SOUSA, 2020). A proposta deste artigo alinha-se diretamente ao tema da XIV Escola Regional de Informática de Mato Grosso (ERI-MT), "Tecnologia Transformando Realidades: Inovação para os Desafios Socioeconômicos e Ambientais de Mato Grosso e da Fronteira Oeste", ao abordar os eixos de Sustentabilidade e Segurança por meio de uma solução tecnológica inovadora. A relevância da pesquisa é amplificada pelo fato de o evento ser sediado no IFMT Campus Pontes e Lacerda, epicentro dos desafios aqui discutidos, tornando este trabalho não um estudo genérico, mas uma proposta de solução diretamente aplicável à realidade local.

Neste contexto, a tecnologia blockchain surge como uma ferramenta com potencial transformador para facilitar a rastreabilidade e a transparência no processo produtivo do ouro. Com registros digitalizados, criptografados e imutáveis, é possível acompanhar cada etapa da cadeia aurífera, desde a extração até a comercialização, identificando e segregando os metais de procedência ilegal. Diante disso, este artigo busca explorar como a implementação de soluções baseadas em blockchain pode contribuir para o aprimoramento da atividade de mineração no Estado de Mato Grosso, promovendo a sustentabilidade ambiental, a justiça social e o fortalecimento da economia local.

2. O Problema da Rastreabilidade do Ouro no Brasil: Uma Falha Sistêmica

Atualmente, o Brasil figura entre os maiores produtores e exportadores de ouro do mundo, retomando um protagonismo que remonta ao Século XVIII, durante o chamado Ciclo do Ouro (FAUSTO, 2013). Naquele período, a exploração aurífera foi um vetor de desenvolvimento de cidades, expansão territorial e dinamismo econômico. Hoje, o processo de comercialização do ouro inicia-se no garimpo e passa, obrigatoriamente, pelas Distribuidoras de Títulos e Valores Mobiliários (DTVMs), instituições financeiras autorizadas pelo Banco Central do Brasil (BACEN) que realizam a primeira aquisição do metal. Legalmente, o ouro é classificado como ativo financeiro ou instrumento cambial, conforme a Lei nº 7.766/1989, servindo como um refúgio contra riscos financeiros e inflacionários, dada sua capacidade de manter valor durante crises econômicas (BRASIL, 1989). O Informe de Recursos Minerais do Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2023) corrobora essa característica ao demonstrar que, durante a crise dos *subprimes* em 2008, enquanto outros *commodities* minerais desvalorizaram cerca de 40%, o valor do ouro aumentou 6%.

Essa resiliência econômica impulsiona uma busca incessante por maior produção, mas a hiper comercialização aurífera gera externalidades negativas profundas. A problemática se agrava pela intensa conexão entre a cadeia do ouro e atividades

criminosas. Um estudo do Instituto Escolhas, publicado em 2024, revelou um dado alarmante: 94% do ouro brasileiro exportado para a União Europeia está exposto a um alto risco de ilegalidade, seja pela extração ilícita, seja pela dificuldade em comprovar sua origem (INSTITUTO ESCOLHAS, 2024). O cerne dessa questão reside na fragilidade do processo de rastreabilidade, que é sistematicamente explorada pela prática do "esquentamento" ou lavagem de ouro — a mistura de ouro ilegal, extraído sem permissão de lavra ou em áreas protegidas, com ouro de origem lícita (CUNHA; PINHEIRO, 2022).

A raiz legal que permitia essa prática foi, por muito tempo, o parágrafo 4º do artigo 39 da Lei 12.844/2013, que estabelecia uma "presunção de legalidade do ouro" adquirido pelas DTVMs e a "boa-fé" da pessoa jurídica adquirente. Essa brecha legislativa efetivamente isentava as DTVMs da responsabilidade de verificar a origem do metal, bastando a declaração do vendedor. Essa falha sistêmica criou um incentivo econômico direto para o garimpo ilegal, cujas consequências socioambientais são devastadoras. De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2023), "entre os desafios significativos, a invasão de terras indígenas por garimpeiros ilegais é o mais destacado", resultando em desmatamento, contaminação de rios por mercúrio e violência.

Reconhecendo essa cadeia causal, o Supremo Tribunal Federal (STF), no julgamento das Ações Diretas de Inconstitucionalidade (ADIs) nº 7273 e 7345, declarou a inconstitucionalidade do referido dispositivo legal. Na decisão, o relator, Ministro Gilmar Mendes, argumentou que a norma era incompatível com o dever constitucional de proteção ao meio ambiente, pois, na prática, não apenas facilitava, mas também incentivava o comércio de ouro obtido por garimpo ilegal (STF, 2023). Em seu voto, o ministro destacou:

Não é difícil verificar que a simplificação do processo de compra de ouro permitiu a expansão do comércio ilegal e fortaleceu as atividades de garimpo ilegal, o desmatamento, a contaminação de rios, a violência nas regiões de garimpo, chegando a atingir os povos indígenas das áreas afetadas (STF, 2023).

A decisão do STF foi um marco, pois desmantelou o pilar legal que sustentava o "esquentamento". Contudo, ao determinar que os órgãos competentes (ANM, BACEN, etc.) implementassem novas medidas de fiscalização, a Corte expôs um vácuo regulatório e tecnológico. O problema deixou de ser apenas uma lei falha e passou a ser a ausência de um sistema eficaz para garantir a legalidade da origem do ouro. É precisamente neste vácuo que a tecnologia blockchain se apresenta como uma solução estruturante.

3. Fundamentos da Tecnologia Blockchain: Um Referencial Teórico

A tecnologia blockchain, embora popularizada por sua associação com criptomoedas, é

fundamentalmente uma inovação no campo de registro e verificação de dados. Sua concepção teórica remonta a 2008, com a publicação do artigo "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System" por um autor sob o pseudônimo Satoshi Nakamoto. O objetivo era criar um sistema de dinheiro eletrônico que resolvesse o problema do gasto duplo sem a necessidade de uma autoridade central confiável (NAKAMOTO, 2008). A partir dessa base, a tecnologia evoluiu para se tornar uma plataforma de aplicação geral para o registro seguro de transações.

Academicamente, a blockchain pode ser definida como um tipo de Tecnologia de Registro Distribuído (do inglês, *Distributed Ledger Technology* - DLT). Trata-se de um livro-razão digital, replicado e compartilhado entre os membros de uma rede *peer-to-peer*, no qual as transações são agrupadas em blocos e encadeadas cronologicamente por meio de criptografia (NARAYANAN et al., 2016). A robustez e a confiabilidade de um sistema blockchain derivam de três pilares tecnológicos interdependentes: descentralização, imutabilidade criptográfica e transparência.

3.1 Descentralização e Consenso

Diferentemente de bancos de dados tradicionais, que são centralizados e controlados por uma única entidade, a blockchain distribui a responsabilidade de manutenção e validação dos dados entre todos os participantes da rede, chamados de nós. Essa arquitetura descentralizada elimina o ponto único de falha e de controle, tornando o sistema mais resiliente a ataques e à censura. Para que um novo bloco de transações seja adicionado à cadeia, os nós da rede devem chegar a um acordo sobre sua validade por meio de um algoritmo de consenso. Esse mecanismo garante que todos os participantes compartilhem uma única versão da verdade, sem a necessidade de um intermediário central (NAKAMOTO, 2008).

3.2 Imutabilidade e Criptografia

A imutabilidade é talvez a característica mais crucial da blockchain. Cada bloco na cadeia contém não apenas os dados da transação, mas também um identificador criptográfico único, chamado de *hash*, e o *hash* do bloco anterior (NAKAMOTO, 2008). Conforme explicam Narayanan et al. (2016), o *hash* funciona como uma "impressão digital" digital dos dados do bloco; qualquer alteração, por menor que seja, nos dados resultaria em um *hash* completamente diferente. Ao incluir o *hash* do bloco anterior, cria-se uma dependência sequencial e cronológica. Para alterar um bloco antigo, um agente malicioso precisaria recalcular o *hash* daquele bloco e de todos os blocos subsequentes na cadeia, uma tarefa computacionalmente inviável na prática. Esse encadeamento criptográfico torna os registros, uma vez inseridos, efetivamente permanentes e à prova de violação (NARAYANAN et al., 2016).

3.3 Transparência e Auditabilidade

Em uma rede blockchain, especialmente em um modelo permissionado como o proposto para a cadeia do ouro, os registros de transações são visíveis para todos os participantes autorizados. Cada transação adicionada à cadeia é publicamente (dentro da rede) verificável e rastreável até sua origem. Isso cria uma trilha de auditoria transparente, em tempo real e inalterável. Qualquer participante autorizado, como um órgão fiscalizador, pode inspecionar a cadeia para verificar a procedência e a trajetória de um ativo, aumentando drasticamente a responsabilidade e a confiança no sistema.

4. Aplicação da Blockchain na Cadeia do Ouro: Arquitetura de uma Solução

A aplicação da tecnologia blockchain na cadeia produtiva do ouro visa conectar diretamente seus fundamentos teóricos (descentralização, imutabilidade e transparência) para solucionar as falhas sistêmicas que perpetuam a ilegalidade. A proposta central consiste na criação de uma "certidão de nascimento digital" para cada lote de ouro extraído, um processo academicamente conhecido como *tokenização de ativos* ou a criação de um *digital twin* (gêmeo digital) na blockchain.

No momento da extração em uma mina legalizada, um registro único seria criado na blockchain, contendo informações essenciais como as coordenadas geográficas da extração, o número da Permissão de Lavra Garimpeira (PLG), a data, o volume e os responsáveis. Esse registro inicial, uma vez validado e inserido na cadeia, torna-se imutável devido ao encadeamento criptográfico. A partir daí, cada etapa subsequente — transporte, refino, primeira venda para uma DTVM e exportação — seria registrada como uma nova transação vinculada ao registro original, criando uma trilha de custódia completa e auditável.

A implementação de tal sistema combate diretamente as fragilidades do modelo anterior. A **imutabilidade** impede a alteração fraudulenta de dados de origem, tornando a prática de declarar ouro ilegal como se viesse de uma mina legalizada extremamente difícil. A **transparência** (em um ambiente permissionado) permite que a Agência Nacional de Mineração (ANM), o BACEN e outros órgãos fiscalizadores auditem a trajetória do ouro em tempo real, eliminando a dependência da "boa-fé" e da verificação manual de documentos em papel, que são facilmente falsificáveis. A discussão sobre o uso de blockchain para rastreabilidade mineral já é reconhecida em nível institucional, como aponta o relatório da Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2022).

Adicionalmente, a tecnologia permite o uso de **contratos inteligentes** (*smart contracts*), que são programas autoexecutáveis que impõem automaticamente os termos de um acordo quando condições predefinidas são atendidas. Por exemplo, um contrato inteligente poderia ser programado para autorizar a transferência de propriedade do ouro para uma DTVM somente após verificar, via integração de sistemas, que a PLG associada àquele lote está ativa e válida no banco de dados da ANM. Isso automatiza a verificação de conformidade, reduzindo a possibilidade de erro humano ou fraude e aumentando a segurança das transações.

A tabela a seguir resume a transformação que a implementação da blockchain pode proporcionar, comparando o sistema atual com o modelo proposto.

Tabela 1. Análise Comparativa: Rastreabilidade do Ouro com e sem Blockchain.

Característica	Sistema Atual (Baseado em Papel e Boa-Fé)	Sistema Proposto (Baseado em Blockchain)
Verificação de Origem	Declaratória, baseada na confiança no vendedor.	Verificável, com registro imutável desde a extração.
Risco de Fraude ("Esquentamento")	Alto, devido à facilidade de falsificar documentos e à antiga presunção de legalidade.	Baixo, pois a alteração de registros é computacionalmente inviável.
Transparência para Stakeholders	Mínima. A cadeia é opaca para consumidores e fiscalizadores externos.	Alta (permissionada). Órgãos reguladores podem ter acesso em tempo real a toda a trilha.
Eficiência da Fiscalização	Baixa. Requer auditorias manuais, reativas e pontuais.	Alta. Permite auditoria contínua, automatizada e proativa.
Acesso a Mercados Internacionais	Comprometido por riscos de reputação e falta de comprovação de origem ética.	Fortalecido, ao prover prova auditável de conformidade com padrões socioambientais.

5. Desafios e Limitações na Implementação

Apesar do seu potencial transformador, a implementação da tecnologia blockchain na cadeia do ouro enfrenta desafios significativos de ordem técnica, econômica, social e de governança. Uma visão crítica é essencial para o desenvolvimento de uma solução viável e eficaz.

Um dos principais obstáculos é o custo de desenvolvimento e manutenção de uma infraestrutura blockchain robusta. Projetos de gestão de cadeia de suprimentos baseados em blockchain podem exigir investimentos financeiros elevados, o que pode ser uma barreira para a adoção em larga escala, especialmente por parte do setor público ou de cooperativas menores. Associado a isso, há o desafio da adesão por parte dos garimpeiros de pequeno porte. Muitos desses profissionais atuam com recursos limitados e possuem baixo letramento digital, o que poderia dificultar sua adaptação a um sistema que exige o registro digital de informações, demandando extensivos programas de capacitação e o desenvolvimento de interfaces de usuário simplificadas.

O desafio técnico mais crítico, no entanto, é o chamado "problema do oráculo". A blockchain garante a integridade dos dados *uma vez que eles estão registrados na cadeia*, mas não pode garantir a veracidade desses dados no ponto de entrada. Se um agente mal-intencionado registrar um lote de ouro extraído ilegalmente como se viesse de uma área permitida, a blockchain irá registrar essa informação fraudulenta de forma imutável, um fenômeno conhecido como "*garbage in, garbage out*" (lixo entra, lixo sai). Portanto, uma solução completa não pode ser puramente digital. Ela exige a criação de um **sistema**

ciber-físico que integre a blockchain a tecnologias de verificação no mundo real, como dispositivos de geolocalização (IoT), selos físicos invioláveis com identificadores únicos (NFC/RFID) e, potencialmente, análises isotópicas para confirmar a origem geológica do metal.

Por fim, a implementação bem-sucedida depende da superação de desafios de governança e regulatórios. É indispensável a criação de normas claras que padronizem o uso da tecnologia para a rastreabilidade do ouro, conforme sinalizado pela própria decisão do STF. Além disso, é preciso estabelecer um modelo de governança para a rede blockchain: quem terá permissão para registrar dados (mineradoras, cooperativas), quem poderá validar transações (ANM, DTVMs) e como disputas serão resolvidas. A criação de um consórcio envolvendo múltiplos stakeholders — governo, setor privado e sociedade civil — é um desafio político e organizacional complexo, mas fundamental para a legitimidade e o sucesso do sistema. A resistência por parte de atores que se beneficiam do status quo de opacidade também é um fator que não pode ser subestimado.

6. Conclusão

A problemática da rastreabilidade do ouro no Brasil, e em particular no estado de Mato Grosso, transcende uma simples falha de fiscalização; ela representa uma falha sistêmica, historicamente amparada por uma legislação inadequada que incentivava a ilegalidade. A decisão do Supremo Tribunal Federal de derrubar a presunção de legalidade do ouro foi um passo fundamental, mas que, por si só, não resolve o problema, criando um vácuo regulatório e tecnológico que demanda soluções inovadoras e robustas.

Este artigo demonstrou que a tecnologia blockchain, com seus pilares de imutabilidade, descentralização e transparência, emerge como uma ferramenta promissora para preencher esse vácuo. A implementação de um sistema de rastreabilidade baseado em blockchain pode criar uma "certidão de nascimento" digital para o ouro, permitindo o rastreamento completo do metal da mina ao mercado. Tal sistema não apenas dificulta drasticamente a lavagem de ouro, mas também fortalece a legalidade, promove a sustentabilidade e aumenta a competitividade dos produtores lícitos em mercados internacionais. A proposta está em total alinhamento com a necessidade de desenvolver inovações para os desafios socioeconômicos e ambientais da Fronteira Oeste de Mato Grosso, tema central da XIV ERI-MT.

Contudo, a implementação não é trivial. Desafios como o "problema do oráculo", os custos de implementação, a inclusão digital dos pequenos garimpeiros e a necessidade de um modelo de governança claro devem ser enfrentados de forma estratégica. A tecnologia não é uma panaceia, mas um componente central de uma solução mais ampla que deve incluir regulação, fiscalização e integração com tecnologias de verificação física.

Como trabalhos futuros, sugere-se a pesquisa e o desenvolvimento de protótipos de sistemas ciber-físicos que integrem blockchain com tecnologias de IoT e selos

invioláveis para resolver o problema da entrada de dados. Adicionalmente, estudos sobre modelos de governança para consórcios de blockchain no setor mineral brasileiro são cruciais para viabilizar uma implementação que seja segura, justa e eficaz, transformando a realidade da mineração de ouro no país.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Arrecadação da CFEM: Relatório Anual 2017-2018*. Brasília: ANM, 2019. Disponível em: <http://www.gov.br/anm/pt-br>. Acesso em: 3 out. 2025.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Sistema financeiro nacional: instituições financeiras autorizadas*. Brasília: Banco Central do Brasil, 2023. Disponível em: <http://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/instituicoesautorizadas>. Acesso em: 1 out. 2025.
- BRASIL. Lei nº 7.766, de 11 de maio de 1989. Dispõe sobre o ouro, ativo financeiro, e sobre o Imposto Único sobre Ouro. *Diário Oficial da União*, Brasília, 12 maio 1989. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7766.htm. Acesso em: 1 out. 2025.
- BRASIL MINING SITE. (2025). *Ouro no Brasil: desafios e oportunidades*. Disponível em: <http://www.brasilminingsite.com.br/ouro>. Acesso em: 3 out. 2025.
- BRITO, Ricardo; BOADLE, Anthony. *Mais de 90% de ouro brasileiro importado pela Europa tem origem em áreas com risco de ilegalidade, diz estudo*. CNN Brasil, 13 ago. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/mais-de-90-de-ouro-brasileiro-importado-pela-europa-tem-origem-em-areas-com-risco-de-ilegalidade-diz-estudo/>. Acesso em: 05 out. 2025.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). *Blockchain e a rastreabilidade mineral no Brasil*. Brasília: CNI, 2022. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br>. Acesso em: 3 out. 2025.
- CUNHA, M.; PINHEIRO, R. Esquentamento de ouro e os desafios da rastreabilidade. *Revista de Direito Ambiental*, São Paulo, v. 27, n. 108, p. 77-94, 2022.
- FAUSTO, B. *História do Brasil*. 13. ed. São Paulo: EdUSP, 2013.
- GOMES, A.; SOUSA, R. Cadeia do ouro e desafios da rastreabilidade. *Revista de*

Desenvolvimento Sustentável, v. 12, n. 3, p. 45-62, 2020.

INSTITUTO ESCOLHAS. *94% do ouro brasileiro exportado para a Europa vêm de áreas de risco de ilegalidade*. São Paulo: Instituto Escolhas, 2024. Disponível em: <https://escolhas.org/94-do-ouro-brasileiro-importado-pela-europa-vem-de-areas-de-riesco>. Acesso em: 2 out. 2025.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Acesso em: 4 out. 2025.

NARAYANAN, A.; BONNEAU, J.; FELTEN, E.; MILLER, A.; GOLDFEDER, S. *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: A Comprehensive Introduction*. Princeton: Princeton University Press, 2016.

NATIONS UNIES. *Estudo sobre a cadeia de produção do ouro na região da Bacia do Rio Tapajós-PA*: com foco no regime de permissão de lavra garimpeira: sumário executivo. Brasil: UNODC, [s.d.]. Disponível em: https://www.unodc.org/cofrb/uploads/documents/Sumario_Executivo_-Estudo_Cadeia_Produtiva-lw.pdf. Acesso em: 05 out. 2025.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). *Informe de Recursos Minerais: economia mineral do ouro*. Brasília: SGB, 2023. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publica/Redes-Institucionais/Rede-de-Economia-Mineral/Informe-de-Recursos-Minerais-8122.html>. Acesso em: 1 out. 2025.

SOUSA, Marcelo Januário de. *Economia mineral do ouro*. Brasília: SGB-CPRM, 2023. Série Ouro, nº 19. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/24380/1/irm_economia_mineral_do_ouro.pdf. Acesso em: 05 out. 2025.

STF – SUPREMO TRIBUNAL FEDERAL. *Ações Diretas de Inconstitucionalidade nº 7273 e 7345*. Brasília: STF, 2023. Disponível em: <http://portal.stf.jus.br/processos/listarProcessos.asp?classe=ADI&numero=7273>. Acesso em: 2 out. 2025.