AXOLODAO: PLATAFORMA DESCENTRALIZADA PARA RASTREABILIDADE E AUDITORIA CIENTÍFICA DE AXOLOTES EM CATIVEIRO

AXOLODAO: DECENTRALIZED PLATFORM FOR TRACEABILITY AND SCIENTIFIC AUDITING OF CAPTIVE AXOLOTLS

NATHÁLIA PIRES FIGUEREDO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA E LIDERANÇA - INTELI

VINICIUS LUCAS CIARDI

JOSÉ ROMUALDO DA COSTA FILHO
UNINOVE – UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO

BRYAN KANO FERREIRA

Comunicação:
O XIV SINGEP foi realizado em conjunto com a 14th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) e com a SPARK (Society for Promoting Academic Research and Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

AXOLODAO: PLATAFORMA DESCENTRALIZADA PARA RASTREABILIDADE E AUDITORIA CIENTÍFICA DE AXOLOTES EM CATIVEIRO

Objetivo do estudo
Apresentar o desenvolvimento e a implantação do AxoloDAO, plataforma descentralizada em blockchain, e analisar a intervenção na organização parceira quanto à rastreabilidade de espécimes, à auditoria científica e à transparência de dados no monitoramento de axolotes em cativeiro.

Relevância/originalidade
O relato aplica blockchain, tokenização por NFT e auditoria por consenso a um domínio pouco explorado, a conservação ex situ de espécie criticamente ameaçada, articulando rastreabilidade, governança descentralizada e transparência de dados científicos em um software auditável e publicamente verificável.

Metodologia/abordagem
Abordagem por participação direta da equipe no desenvolvimento e observação dos fluxos operacionais, com fontes primárias e secundárias. O software foi construído em cinco sprints ágeis e validado por mais de trinta testes unitários e deploy na rede de testes Sepolia.

Principais resultados
Protótipo full-stack implantado em Sepolia, com arquitetura híbrida on-chain e off-chain, tokenização de 13 exemplares por ERC-721, ancoragem de dez parâmetros por árvores de Merkle e fluxo de auditoria por consenso, substituindo o controle manual e fragmentado anterior.

Contribuições teóricas/metodológicas
Demonstra que controle de acesso por papéis e registro imutável atendem a requisitos de proveniência e integridade de dados científicos, integrando tokenização de espécimes, ancoragem por Merkle e governança on-chain em um modelo de referência replicável para conservação.

Contribuições sociais/para a gestão
Oferece às organizações de conservação uma infraestrutura auditável e publicamente verificável que fortalece a credibilidade dos dados perante reguladores e financiadores e viabiliza a captação baseada em impacto, com potencial de replicação em outras iniciativas com equipe técnica dedicada.

Palavras-chave: Blockchain, Rastreabilidade de dados científicos, Conservação, Governança descentralizada, Software

AXOLODAO: DECENTRALIZED PLATFORM FOR TRACEABILITY AND SCIENTIFIC AUDITING OF CAPTIVE AXOLOTLS

Study purpose
To present the development and deployment of AxoloDAO, a decentralized blockchain platform, and analyze the intervention in the partner organization regarding specimen traceability, scientific auditing, and data transparency in the monitoring of captive axolotls.

Relevance / originality
The report applies blockchain, NFT tokenization, and consensus auditing to an underexplored domain, the ex situ conservation of a critically endangered species, linking traceability, decentralized governance, and scientific data transparency in an auditable, publicly verifiable software.

Methodology / approach
Direct-participation approach through team involvement in development and observation of operational flows, using primary and secondary sources. The software was built across five agile sprints and validated through more than thirty unit tests and deployment on the Sepolia test network.

Main results
A full-stack prototype deployed on Sepolia, with a hybrid on-chain and off-chain architecture, ERC-721 tokenization of 13 specimens, Merkle-tree anchoring of ten parameters, and a consensus audit flow, replacing the previous manual and fragmented control.

Theoretical / methodological contributions
It demonstrates that role-based access control and immutable registration meet provenance and integrity requirements for scientific data, integrating specimen tokenization, Merkle anchoring, and on-chain governance into a replicable reference model for conservation.

Social / management contributions
It offers conservation organizations an auditable, publicly verifiable infrastructure that strengthens data credibility before regulators and funders and enables impact-based fundraising, with potential for replication in other initiatives that have a dedicated technical team.

Keywords: Blockchain, Scientific data traceability, conservation, Decentralized governance, Software

AXOLODAO: PLATAFORMA DESCENTRALIZADA PARA RASTREABILIDADE E AUDITORIA CIENTÍFICA DE AXOLOTES EM CATIVEIRO

Resumo

Este relato descreve o desenvolvimento e a implantação do AxoloDAO, plataforma descentralizada que informatiza o monitoramento, o registro e a auditoria científica de axolotes mantidos em cativeiro. O produto técnico, classificado como software/aplicativo, foi desenvolvido por uma equipe discente em parceria com uma startup Web3 e um museu biológico, ao longo de dez semanas organizadas em cinco sprints com abordagem ágil. A solução adota uma arquitetura híbrida que combina componentes on-chain e off-chain: seis smart contracts em Solidity, tokenização de espécimes e aquários pelo padrão ERC-721, ancoragem de medições ambientais por árvores de Merkle, controle de acesso por papéis e um fluxo de auditoria por consenso entre especialistas certificados. O front-end em React integra-se a carteiras digitais e atualiza os painéis em tempo real. O protótipo foi validado na rede de testes Sepolia, com a tokenização de 13 exemplares, o monitoramento de dez parâmetros físico-químicos e mais de trinta testes unitários aprovados. A intervenção substituiu um controle manual e fragmentado por uma infraestrutura auditável e publicamente verificável, com potencial de replicação em outras iniciativas de conservação que dependem de evidências de impacto para captar recursos. A principal contribuição é um modelo de referência que articula rastreabilidade, governança descentralizada e transparência de dados científicos em projetos de conservação animal.

Palavras-chave: Blockchain. Rastreabilidade de dados científicos. Conservação ex situ. Governança descentralizada. Software.

1 Contexto em que se apresenta o problema

A digitalização dos processos científicos e organizacionais tem ampliado a busca por soluções tecnológicas que assegurem eficiência operacional, confiabilidade, rastreabilidade e transparência na gestão de dados. Nesse contexto, a tecnologia blockchain oferece registros imutáveis, auditáveis e descentralizados (Swan, 2015), o que reduz a dependência de intermediários institucionais para a validação de informações (Drouin et al., 2017) e viabiliza serviços de notarização e de registro da integridade de conteúdos científicos (Kleinaki et al., 2018).

Paralelamente, a conservação de espécies ameaçadas enfrenta desafios relacionados à integridade e à continuidade dos dados científicos coletados em cativeiro. O axolote (*Ambystoma mexicanum*), anfíbio criticamente ameaçado e relevante para pesquisas biomédicas em razão de sua capacidade regenerativa (Monaghan et al., 2014), exemplifica essa situação: o monitoramento de seus parâmetros biológicos e ambientais é frequentemente realizado de forma manual, fragmentada e suscetível a erros humanos, o que compromete tanto o valor científico dos dados quanto a tomada de decisão em tempo hábil. Sistemas de sensoriamento e de Internet das Coisas possibilitam a aquisição contínua de parâmetros físico-químicos em ambientes aquáticos (Akhter et al., 2022; Demetillo et al., 2019).

A organização parceira caracteriza-se como uma startup Web3 e iniciativa de pesquisa descentralizada, com base de operações no México. Trata-se de um laboratório de pesquisa e desenvolvimento voltado à criação de infraestrutura pública digital, ao desenvolvimento de software de código aberto e à aplicação de tecnologias blockchain sobre a rede Ethereum. A organização opera de forma descentralizada e colaborativa, com parcerias multissetoriais e um quadro de aproximadamente 27 colaboradores distribuídos, sustentada por subsídios do ecossistema Ethereum, prêmios em hackathons e parcerias estratégicas. Para validar suas

ferramentas on-chain em contextos ecológicos reais, atua em cooperação com um museu biológico responsável pela operação diária e pela conservação de anfíbios.

Antes da intervenção, a organização enfrentava dores operacionais decorrentes da ausência de infraestrutura digital para o monitoramento dos axolotes. O controle dos dez parâmetros físico-químicos críticos, entre eles temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, condutividade, turbidez, fosfatos, dióxido de nitrogênio, nitrato, amônia e dureza, ocorria de forma estritamente manual e esporádica, com kits comerciais de reagentes e baixa frequência de amostragem. Os registros eram documentados sem padronização, em cadernos físicos e planilhas fragmentadas, sem vínculo lógico entre o identificador do exemplar, o contexto do tanque e o carimbo de data e hora da captura. Esse modelo gerava silos de informação, inconsistências por erro humano e baixa rastreabilidade, o que prejudicava as análises longitudinais, a validação cruzada entre pesquisadores e reguladores e a captação de capital filantrópico, dado que financiadores exigem transparência e evidências verificáveis de resultados.

Diante desse cenário, o relato orienta-se pela seguinte questão: como uma infraestrutura descentralizada baseada em blockchain pode assegurar a rastreabilidade, a integridade e a auditabilidade dos dados científicos no monitoramento de axolotes em cativeiro? O objetivo é apresentar o desenvolvimento e a implantação do AxoloDAO e analisar a intervenção realizada na organização parceira quanto à gestão científica, à rastreabilidade de espécimes e à transparência de dados em projetos de conservação animal.

2 Diagnóstico e Desenvolvimento do PTT

2.1 Aparato científico

A blockchain é uma estrutura de dados distribuída que organiza registros em blocos encadeados por funções hash criptográficas, o que torna qualquer alteração retroativa detectável por toda a rede (Swan, 2015). A imutabilidade resultante é um atributo crítico para a ciência, pois registros de monitoramento biológico, uma vez confirmados, não podem ser adulterados sem evidência pública da violação. Esse mecanismo atende ao requisito da ciência aberta de rastreabilidade e verificabilidade independente dos dados primários (Eskerod & Larsen, 2018). Sistemas baseados em blockchain têm sido desenvolvidos para assegurar imutabilidade e rastreabilidade ao longo do ciclo de vida dos dados de pesquisa (Li et al., 2025), e a tecnologia tem sido proposta para incentivar a disponibilização de dados ecológicos abertos (Lewis, Marstein, & Grytnes, 2023), inclusive por meio de bases descentralizadas orientadas aos princípios FAIR (Marstein, Grytnes, & Lewis, 2025). Revisões sistemáticas apontam a rastreabilidade e a auditabilidade como benefícios centrais dessas implementações (Dasaklis et al., 2022).

A tokenização de ativos por meio do padrão ERC-721 (Entriken et al., 2018) estende esse princípio à identificação de espécimes biológicos: cada token é não fungível, único e vinculado de forma imutável ao histórico do indivíduo que representa, o que cria uma identidade digital verificável por qualquer agente externo sem depender de servidor centralizado. A literatura recente documenta o uso de tokens não fungíveis para assegurar proveniência e identidade de ativos físicos e biológicos (Razi et al., 2024; Wang et al., 2024), bem como suas implicações para os ecossistemas de stakeholders (Wilson et al., 2022).

A governança descentralizada refere-se a mecanismos de tomada de decisão e validação que distribuem a autoridade entre múltiplos agentes, sem depender de uma instituição central (Drouin et al., 2017). As organizações autônomas descentralizadas sistematizam esse modelo por meio de contratos inteligentes e tokens, o que amplia a coordenação horizontal e reduz assimetrias informacionais (Chambefort & Chaudey, 2024;

Santana & Albareda, 2022). Revisões da literatura organizam abordagens on-chain e off-chain para coordenar a evolução e o uso dos protocolos, tema que ganhou relevância após o ataque ao The DAO em 2016 (Liu et al., 2023), e estudos empíricos associam elementos de governança, como a distribuição do poder de voto e os incentivos, à viabilidade de longo prazo dessas organizações (Rikken, Janssen, & Kwee, 2023). O controle de acesso baseado em papéis (RBAC) é técnica consolidada para implementar essa governança em sistemas de informação (Ferraiolo et al., 2001): cada perfil de usuário, biólogo, auditor ou administrador recebe permissões específicas, o que garante que somente agentes certificados submetam ou aprovem registros críticos.

O axolote é classificado como criticamente ameaçado, com populações selvagens restritas aos canais de Xochimilco, no México. Populações mantidas em cativeiro em instituições científicas representam reservas genéticas para a sobrevivência da espécie (Monaghan et al., 2014), e os programas de reprodução apoiam-se em tecnologias reprodutivas e no manejo genético das colônias para reduzir a perda de diversidade (Silla & Byrne, 2019). Estudos recentes com indivíduos criados em cativeiro e reintroduzidos em áreas restauradas indicam a viabilidade de estratégias de conservação ex situ associadas ao monitoramento contínuo do ambiente aquático (Ramos et al., 2025), e o acompanhamento longitudinal de indicadores genômicos condiciona a avaliação da persistência das populações (Marshall et al., 2022). A gestão dessas populações exige registros contínuos de parâmetros físico-químicos, cujos desvios em relação a faixas de referência desencadeiam respostas de estresse e aumentam a mortalidade. O Protocolo de Nagoya (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2011) estabelece requisitos de rastreabilidade genética e de repartição de benefícios para material biológico, o que situa a infraestrutura de registro como exigência normativa. A aplicação de blockchain à rastreabilidade em contextos de conservação e de cadeias de suprimento de fauna tem sido investigada como mecanismo para ampliar a transparência e a confiança nos registros (Howson, 2020; Keskin et al., 2023), embora análises críticas ponderem que essa transparência não elimina, por si, as assimetrias de governança nas cadeias globais (Bernards, Campbell-Verduyn, & Rodima-Taylor, 2024).

2.2 Diagnóstico e seleção do produto técnico

O relato apoiou-se na participação direta da equipe no desenvolvimento do sistema e na observação direta dos fluxos operacionais da organização parceira. O embasamento e a validação dos requisitos apoiaram-se em fontes primárias e secundárias. As fontes primárias consistiram no contato direto com os stakeholders e na análise dos documentos estratégicos do AxoloDAO, como as bases de variáveis e indicadores. As fontes secundárias englobaram revisões técnicas de protocolos Web3, como o *Ethereum Name Service* (ENS) e o *Ethereum Attestation Service* (EAS), que serviram de referência para os mecanismos de atestação e identidade digital do protótipo.

O produto técnico resultante enquadra-se como software/aplicativo. No relatório do Grupo de Trabalho de Produção Técnica da CAPES, o software é definido como o conjunto de instruções, usadas direta ou indiretamente por um computador para obter um resultado determinado, composto por código-fonte desenvolvido em alguma linguagem de programação (item 7; CAPES, 2019). A mesma categoria consta da classificação de PTTs da ANPAD (item 8), aderente à área de Administração Pública e de Empresas, Ciências Contábeis e Turismo (Área 27). O AxoloDAO atende a essa definição: é uma plataforma full-stack de autoria da equipe, composta por um front-end em React, um backend em Node.js, um banco de dados relacional em PostgreSQL e seis smart contracts em Solidity, todos resultantes do trabalho de criação dos autores. Quanto aos campos descritivos exigidos para esse tipo de PTT, a finalidade do software é informatizar e descentralizar o monitoramento, o registro e a

auditoria científica de axolotes em cativeiro; o grau de novidade corresponde a médio teor inovativo, pela combinação de conhecimentos pré-estabelecidos, como blockchain, padrão ERC-721, árvores de Merkle, controle de acesso por papéis e atestação on-chain, aplicados a um domínio ainda pouco explorado na conservação.

2.3 Desenvolvimento do produto técnico

O AxoloDAO é um projeto de desenvolvimento de sistemas conduzido por um grupo de cinco alunos de uma faculdade de tecnologia e liderança em São Paulo, em parceria com uma startup Web3, no contexto do módulo de sistemas descentralizados com blockchain. Foi desenvolvido de fevereiro a abril de 2026, com cronograma de dez semanas divididas em cinco sprints de duas semanas, em abordagem ágil. A autoria do relato é atribuída à equipe discente responsável pelo desenvolvimento, cabendo à organização parceira a interlocução técnica e a aprovação das entregas. O tema central é a rastreabilidade e a auditoria científica de espécimes em conservação ex situ, e o financiamento apoiou-se em subsídios do ecossistema Ethereum e em aporte em espécie da instituição parceira.

Os profissionais da organização acompanharam o projeto por meio de Sprint Reviews quinzenais, realizadas com os orientadores e docentes da instituição. Nessas reuniões eram avaliados os avanços e as documentações de cada ciclo, o que manteve a plataforma alinhada às necessidades reais da organização e permitiu a validação iterativa das decisões e a incorporação de sugestões nas sprints seguintes.

Na fase de descoberta e levantamento de requisitos, foram realizados o kick-off e sessões de alinhamento com os profissionais da organização parceira, das quais resultaram personas, user stories e critérios de aceitação que orientaram as decisões subsequentes de design e arquitetura. Em paralelo, conduziu-se uma análise estratégica do contexto organizacional, que incluiu o Canvas de Proposta de Valor, a Matriz de Risco e o estudo de diferenciação de mercado frente a soluções concorrentes.

Em seguida, foram definidos os requisitos de segurança da informação, entre eles autenticidade, integridade, disponibilidade e irretratabilidade, e teve início a modelagem da arquitetura. A camada descentralizada foi implementada por meio de seis smart contracts em Solidity, organizados em registro imutável, dados mutáveis e governança de acesso. O acesso ao sistema ocorre por autenticação com carteira digital via MetaMask, que funciona como identidade digital de cada usuário. O sistema opera com perfis distintos de acesso, administrador, biólogo, auditor e visitante, controlados pelo contrato GestorCarteiras, que implementa o controle de acesso por papéis (Ferraiolo et al., 2001). O registro de um novo espécime gera sua tokenização no padrão ERC-721 (Entriken et al., 2018) por meio do contrato de identidade, o que cria um tokenId único e imutável que se torna a âncora permanente de todo o histórico do animal. De forma análoga, cada aquário é registrado por contrato próprio, também associado a um token que representa o ambiente monitorado.

A arquitetura foi concebida de forma híbrida, com componentes off-chain e on-chain complementares. Armazenar integralmente na blockchain cada medição implicaria custos de gás elevados e limitações de escalabilidade, o que inviabilizaria o uso contínuo em contexto de pesquisa; manter os dados apenas off-chain comprometeria a imutabilidade, a rastreabilidade e a auditabilidade exigidas para fins científicos. A solução preserva os dados completos no banco relacional e ancora on-chain apenas as provas criptográficas de integridade, por meio de árvores de Merkle. As medições são inseridas pelos biólogos em formulários validados; o backend organiza as informações e constrói a árvore de Merkle, que gera uma raiz criptográfica (merkleRoot) capaz de resumir e tornar verificável todo o conjunto de medições. Apenas essa raiz é ancorada on-chain pelo contrato de dados do

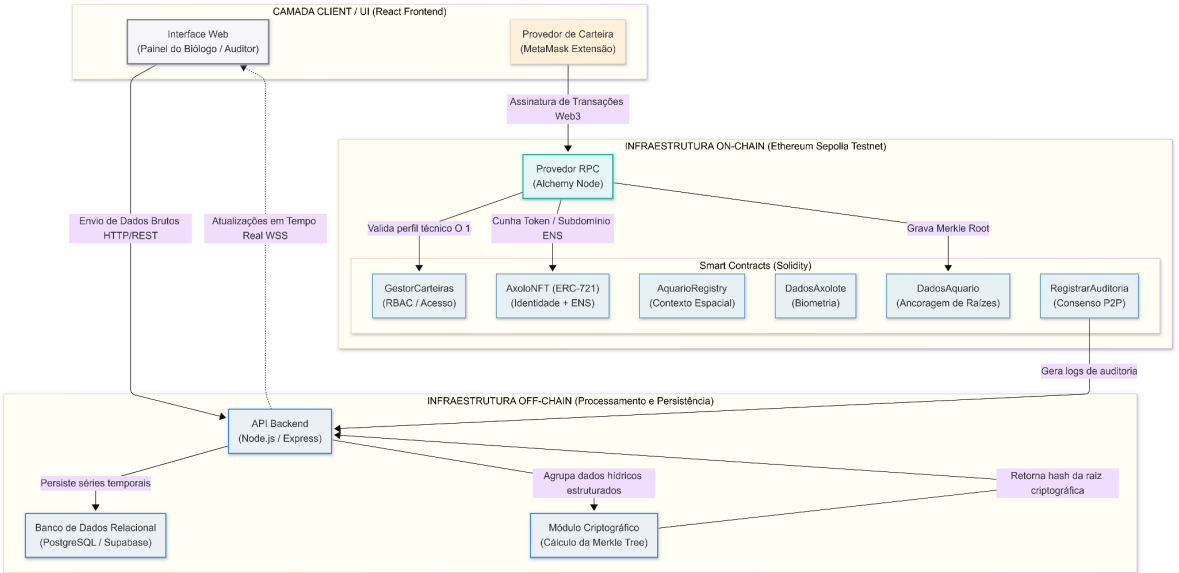
aquário, o que mantém os dados originais off-chain com integridade verificável e reduz os custos de armazenamento em rede.

Antes de serem consolidados de forma imutável, os registros passam por um fluxo de auditoria: o auditor revisa os dados submetidos em uma tela exclusiva da interface e emite sua decisão de aprovação ou rejeição por assinatura digital. O contrato de auditoria registra o resultado do consenso on-chain, o que garante que apenas informações validadas por especialistas certificados sejam persistidas definitivamente; em caso de rejeição, o sistema notifica o biólogo responsável com justificativa registrada. A combinação do controle de acesso por papéis com os atestados on-chain, alinhada ao modelo do Ethereum Attestation Service, constitui a espinha dorsal do fluxo de auditoria do AxoloDAO.

A interface da plataforma BioMuseu, desenvolvida em React, foi projetada para atender aos diferentes perfis de usuários do sistema. O acesso é realizado por autenticação com carteira blockchain via MetaMask (Figura 2), garantindo identidade digital verificável on-chain desde o login. Para biólogos e gestores, a interface apresenta painéis de monitoramento por aquário com histórico gráfico dos parâmetros ambientais, fichas detalhadas por espécime com dados biométricos (Figura 3) e atestações verificáveis on-chain e alertas automáticos quando parâmetros ultrapassam os limites ideais. Na tela de auditoria (Figura 4), auditores certificados visualizam os parâmetros de cada aquário com rastro on-chain, como endereço do smart contract e timestamp da transação, e emitem sua decisão por assinatura digital, com resultado consolidado no indicador de consenso da comunidade. As atualizações são sincronizadas em tempo real via WebSockets. O sistema foi validado por mais de trinta testes unitários com total aprovação, cobrindo registro de aquários e axolotes, controle de permissões, auditoria por consenso e integridade criptográfica dos dados, e encerrado com o deploy na rede Sepolia e produção de um vídeo de demonstração do fluxo completo.

Figura 1

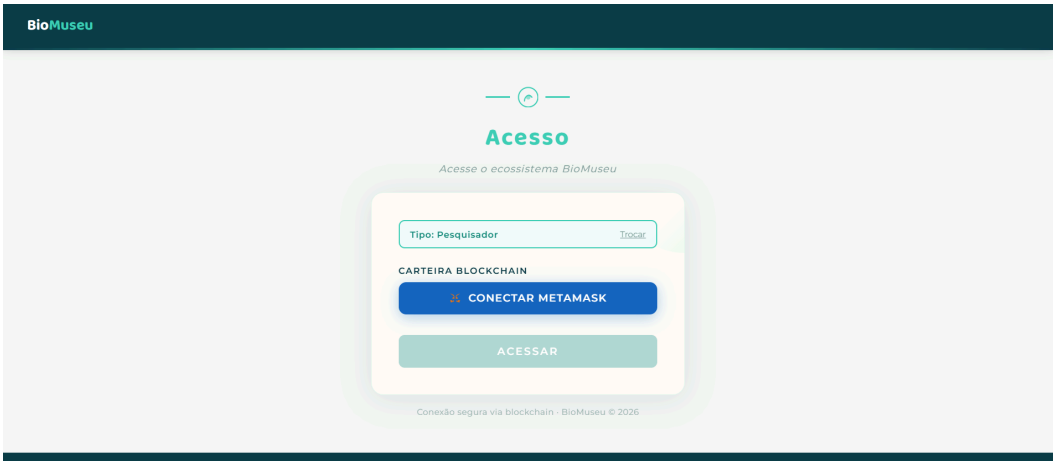
Arquitetura híbrida do sistema AxoloDAO



Nota. Elaborada pelos autores (2026).

Figura 2

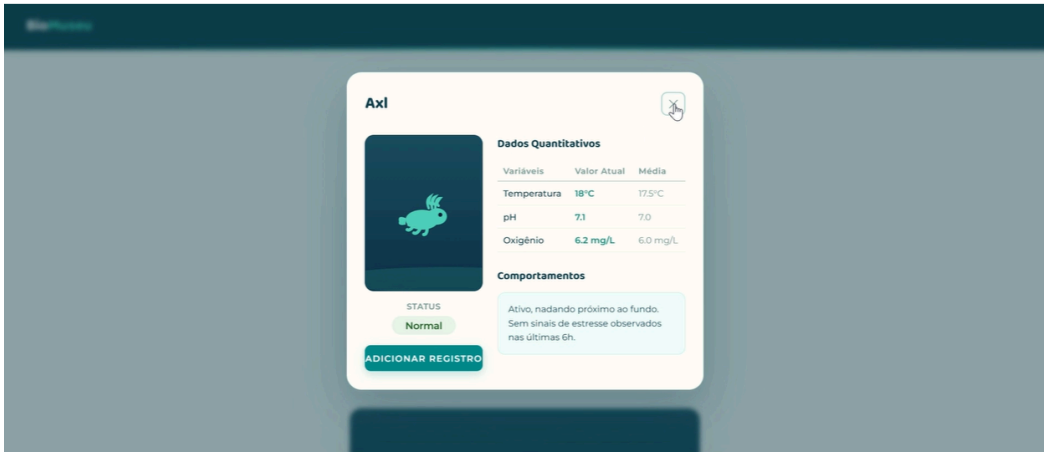
Tela de acesso com conexão via MetaMask



Nota. Elaborada pelos autores (2026).

Figura 3

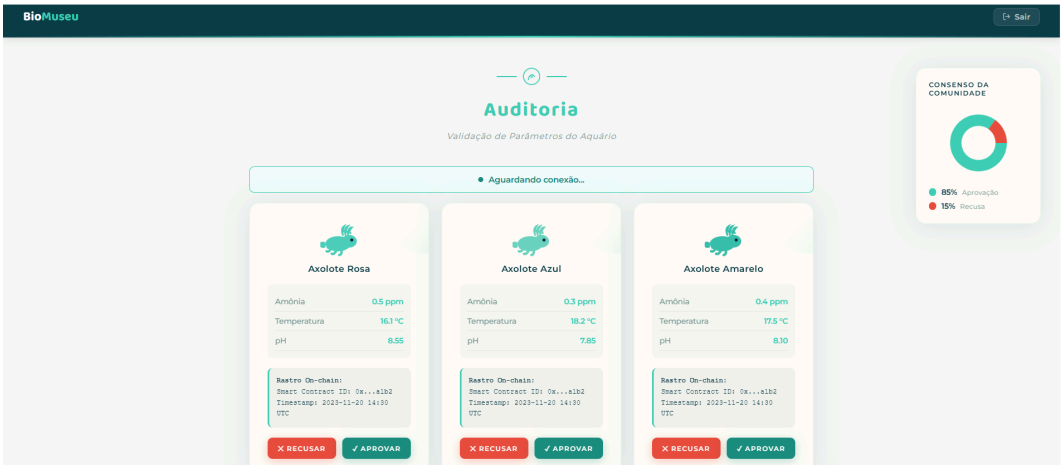
Tela da ficha individual do espécime



Nota. Elaborada pelos autores (2026).

Figura 4

*Tela de **Auditoria***



Nota. Elaborada pelos autores (2026).

3 Adoção e Contribuições do PTT

3.1 Adoção e possibilidade de replicação

O produto técnico foi implantado como protótipo funcional full-stack na rede de testes Sepolia do ecossistema Ethereum. A solução permitiu a tokenização inicial de 13 exemplares de axolotes pelo padrão ERC-721, consolidou o monitoramento de dez parâmetros ambientais críticos com ancoragem por árvores de Merkle e tornou operacional um fluxo de auditoria por consenso entre especialistas certificados. A intervenção substituiu o controle manual e fragmentado por uma infraestrutura auditável e publicamente verificável, o que restabeleceu a confiabilidade e a continuidade dos dados.

A experiência tem potencial de replicação em iniciativas de conservação, instituições de pesquisa e entidades do terceiro setor que enfrentem cenários semelhantes de fragmentação de dados e de dependência de sistemas de registro centralizados. Para que a replicação ocorra com consistência, alguns fatores precisam ser observados: equipe técnica multidisciplinar com papéis definidos, diagnóstico do fluxo de informação vigente, envolvimento da organização parceira desde o início, uso de padrões Web3 abertos e consolidados e definição de um modelo de governança adequado ao contexto científico. Por se tratar de descrição realizada por autores cujo vínculo não decorre exclusivamente de programa de pós-graduação, registra-se que o produto é aderente às áreas de Administração Pública e de Empresas, Ciências Contábeis e Turismo (Área 27).

3.2 Contribuições segundo a ficha de avaliação da Área 27 (CAPES, 2020)

As contribuições do produto são descritas a seguir conforme os cinco itens da ficha de avaliação de PTT da Área 27: aderência, impacto, aplicabilidade, inovação e complexidade.

Aderência: o produto é aderente à área de Administração Pública e de Empresas, Ciências Contábeis e Turismo. O tema articula governança descentralizada, gestão de dados científicos, transparência e financiamento baseado em impacto, com aplicação direta em uma organização que reúne um laboratório Web3 e um museu biológico. O relato dialoga com linhas de pesquisa voltadas à gestão de organizações, à governança e ao uso de tecnologia da informação, ao documentar a construção de uma infraestrutura de dados auditável e verificável.

Impacto: avaliam-se o impacto potencial e o realizado. O impacto realizado é baixo, pois o protótipo foi validado em ambiente de testes, com inserção manual de dados, de modo que a transformação da rotina da organização ainda não se materializou em produção. O impacto potencial é alto, dada a capacidade de reestruturar a gestão de dados de conservação, fortalecer a credibilidade dos registros perante reguladores e financiadores e viabilizar a captação baseada em impacto, além da possibilidade de replicação em outras iniciativas.

Aplicabilidade: avaliam-se a aplicabilidade potencial, a realizada e a replicabilidade. A aplicabilidade realizada é média: o software foi implantado e tornado funcional na rede de testes, com mais de trinta testes unitários aprovados e um vídeo de demonstração, embora ainda sem integração com sensores e sem operação em produção. A aplicabilidade potencial é alta, pois o modelo pode ser empregado por outras organizações de conservação com equipe técnica dedicada. Quanto à replicabilidade, o produto é escalável, uma vez que a arquitetura híbrida e os padrões Web3 podem ser transpostos para outros contextos com os devidos ajustes.

Inovação: o teor de inovação é médio, correspondente à inovação incremental. O produto combina e modifica conhecimentos pré-estabelecidos, como a blockchain, a tokenização ERC-721, as árvores de Merkle, o controle de acesso por papéis e a atestação on-chain, e os integra em uma arquitetura híbrida aplicada a um contexto ainda sub-representado na literatura, o da conservação ex situ de uma espécie criticamente ameaçada. A contribuição não reside na criação de uma tecnologia inédita, mas na recombinação de instrumentos existentes para um ambiente em que ainda eram pouco empregados.

Complexidade: a complexidade é alta, pois o desenvolvimento exigiu a combinação de diferentes atores e de diferentes conhecimentos. Participaram a equipe discente multidisciplinar, a startup Web3, o museu biológico e os orientadores da instituição, e o arranjo demandou a integração de conhecimentos de engenharia de software, blockchain, biologia da conservação, segurança da informação e governança descentralizada, com a resolução das tensões entre a natureza híbrida do sistema off-chain e on-chain e as exigências científicas da organização parceira.

Em conjunto, esses achados confirmam que a aplicação do controle de acesso por papéis (Ferraiolo et al., 2001) e do registro imutável em blockchain atende a requisitos de proveniência e integridade associados à gestão de dados científicos (Eskerod & Larsen, 2018; Li et al., 2025). O fluxo de auditoria por consenso on-chain corresponde às abordagens de governança sistematizadas por Liu et al. (2023), e a tokenização de espécimes concretiza o uso de tokens não fungíveis para proveniência de ativos biológicos discutido por Razi et al. (2024) e Wang et al. (2024).

3.3 Considerações finais e recomendações

Os resultados indicam que os objetivos do projeto foram atendidos. A plataforma proveu um registro imutável e descentralizado de dados biológicos e ambientais, com tokenização pelo padrão ERC-721 para as identidades dos espécimes e árvores de Merkle para a integridade dos dados com eficiência operacional. A arquitetura híbrida e o modelo financeiro projetado compõem uma ferramenta de coordenação interinstitucional e de transparência. Esses resultados dialogam com o referencial adotado: a imutabilidade descrita por Swan (2015) e os requisitos de integridade e proveniência associados à gestão de dados científicos (Eskerod & Larsen, 2018) sustentam a arquitetura implementada, enquanto os mecanismos de governança e auditoria on-chain correspondem às abordagens sistematizadas por Liu et al. (2023).

O trabalho apresenta limitações. A validação ocorreu em ambiente de testes, na rede Sepolia, sem integração com sensores de Internet das Coisas para a coleta automatizada de dados, e as estimativas financeiras têm caráter projetado, sem realização em produção. Além disso, a avaliação dos ganhos foi predominantemente qualitativa, sem coleta sistemática de métricas quantitativas antes e depois da intervenção.

Como agenda de trabalhos futuros e de novos relatos de produção, recomenda-se a expansão do sistema para a integração direta com dataloggers e dispositivos de hardware, o que eliminaria a intermediação humana na inserção de parâmetros ambientais. Recomenda-se, ainda, investigar modelos econômicos que incorporem mecanismos de staking de dados para incentivar a validação científica por pares e aplicar algoritmos de inteligência artificial sobre o histórico imutável construído, com vistas a análises preditivas de saúde e bem-estar animal. Organizações que enfrentam desafios semelhantes podem adotar a arquitetura híbrida e os padrões Web3 documentados neste relato.

Declaração de uso de Inteligência Artificial Generativa

Os autores declaram ter utilizado ferramentas de inteligência artificial generativa como suporte à produção deste relato de PTT, em conformidade com a política institucional sobre uso de inteligência artificial generativa (setembro de 2025). O uso limitou-se a tarefas de organização estrutural, refinamento de linguagem e formatação do texto, preservando a autoria intelectual, a responsabilidade pelos argumentos apresentados e a integridade científica do trabalho. Todas as referências citadas foram verificadas pelos autores nas fontes originais.

Referências

Aaltonen, K., Derakhshan, R., Di Maddaloni, F., & Turner, R. (2024). Stakeholder engagement: Theoretical and methodological directions for project scholarship. International Journal of Project Management, 42(7), 102649. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2024.102649

Akhter, F., Siddiquei, H. R., Alahi, M. E. E., Jayasundera, K. P., & Mukhopadhyay, S. C. (2022). An IoT-enabled portable water quality monitoring system with MWCNT/PDMS multifunctional sensor for agricultural applications. IEEE Internet of Things Journal, 9(16), 14307-14316. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3069894

Bernards, N., Campbell-Verduyn, M., & Rodima-Taylor, D. (2024). The veil of transparency: Blockchain and sustainability governance in global supply chains. Environment and Planning C: Politics and Space, 42(5), 742-760. https://doi.org/10.1177/23996544221142763

Chambefort, C., & Chaudey, M. (2024). Blockchain, tokens, smart contracts, and decentralized autonomous organization: Expanding and renewing the mechanisms of governance? European Management Review, 21(3), 511-515. https://doi.org/10.1111/emre.12677

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (2019). Grupo de Trabalho de Produção Técnica: relatório final. CAPES.

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (2020). Ficha de avaliação da Área 27: Administração Pública e de Empresas, Ciências Contábeis e Turismo. CAPES. https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/documentos/avaliacao/FICHA_ADMINISTRACAO_P_ATUALIZADA.pdf

Dasaklis, T. K., Voutsinas, T. G., Tsoulfas, G. T., & Casino, F. (2022). A systematic literature review of blockchain-enabled supply chain traceability implementations. Sustainability, 14(4), 2439. https://doi.org/10.3390/su14042439

Demetillo, A. T., Japitana, M. V., & Taboada, E. B. (2019). A system for monitoring water quality in a large aquatic area using wireless sensor network technology. Sustainable Environment Research, 29(1), Article 12. https://doi.org/10.1186/s42834-019-0009-4

Drouin, N., Müller, R., & Sankaran, S. (Eds.). (2017). Cambridge handbook of organizational project management. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316662243

Entriken, W., Shirley, D., Evans, J., & Sachs, N. (2018). EIP-721: Non-fungible token standard. Ethereum Improvement Proposals. https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721

Eskerod, P., & Larsen, T. (2018). Advancing project stakeholder analysis by the concept shadows of the context. International Journal of Project Management, 36(1), 161-169. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.05.003

Ferraiolo, D. F., Sandhu, R., Gavrila, S., Kuhn, D. R., & Chandramouli, R. (2001). Proposed NIST standard for role-based access control. ACM Transactions on Information and System Security, 4(3), 224-274. https://doi.org/10.1145/501978.501980

Howson, P. (2020). Building trust and equity in marine conservation and fisheries supply chain management with blockchain. Marine Policy, 115, 103873. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103873

Keskin, B. B., Griffin, E. C., Prell, J. O., Dilkina, B., Ferber, A., MacDonald, J., Hilend, R., Griffis, S., & Gore, M. L. (2023). Quantitative investigation of wildlife trafficking supply chains: A review. Omega, 115, 102780. https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102780

Kleinaki, A.-S., Mytis-Gkometh, P., Drosatos, G., Efraimidis, P. S., & Kaldoudi, E. (2018). A blockchain-based notarization service for biomedical knowledge retrieval. Computational and Structural Biotechnology Journal, 16, 288-297. https://doi.org/10.1016/j.csbj.2018.08.002

Lewis, R. J., Marstein, K.-E., & Grytnes, J.-A. (2023). Incentivising open ecological data using blockchain technology. Scientific Data, 10, 605. https://doi.org/10.1038/s41597-023-02496-2

Li, X., Huang, Y., Liu, Y., Yi, H., Li, L., Wu, Y., Zhang, X., Yang, X., Lin, Y., Lu, D., & Jiang, G. (2025). Enhancing data integrity in data-driven environmental science research through blockchain technology. Environmental Science & Technology, 59(35), 18696-18705. https://doi.org/10.1021/acs.est.5c03461

Liu, Y., Lu, Q., Zhu, L., Paik, H.-Y., & Staples, M. (2023). A systematic literature review on blockchain governance. Journal of Systems and Software, 197, 111576. https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111576

Marshall, I. R., Brauer, C. J., Wedderburn, S. D., Whiterod, N. S., Hammer, M. P., Barnes, T. C., Attard, C. R. M., Möller, L. M., & Beheregaray, L. B. (2022). Longitudinal monitoring of neutral and adaptive genomic diversity in a reintroduction. Conservation Biology, 36(4), e13889. https://doi.org/10.1111/cobi.13889

Marstein, K.-E., Grytnes, J.-A., & Lewis, R. J. (2025). ECKOchain: A FAIR blockchain-based database for long-term ecological data. Methods in Ecology and Evolution, 16(6), 1020-1027. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14280

Monaghan, J. R., Stier, A. C., Michonneau, F., Smith, M. D., Pasch, B., Maden, M., & Seifert, A. W. (2014). Experimentally induced metamorphosis in axolotls reduces regenerative rate and fidelity. Regeneration, 1(1), 2-14. https://doi.org/10.1002/reg2.8

Ramos, A. G., Mena, H., Schneider, D., & Zambrano, L. (2025). Movement ecology of captive-bred axolotls in restored and artificial wetlands: Conservation insights for amphibian reintroductions and translocations. PLOS ONE, 20(4), e0314257. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314257

Razi, Q., Devrani, A., Abhyankar, H., Chalapathi, G. S. S., Hassija, V., & Guizani, M. (2024). Non-fungible tokens (NFTs): Survey of current applications, evolution, and future directions. IEEE Open Journal of the Communications Society, 5, 2765-2791. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3343926

Rikken, O., Janssen, M., & Kwee, Z. (2023). Governance impacts of blockchain-based decentralized autonomous organizations: An empirical analysis. Policy Design and Practice, 6(4), 465-487. https://doi.org/10.1080/25741292.2023.2270220

Santana, C., & Albareda, L. (2022). Blockchain and the emergence of decentralized autonomous organizations (DAOs): An integrative model and research agenda. Technological Forecasting and Social Change, 182, 121806. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121806

Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2011). Nagoya Protocol on access to genetic resources and the fair and equitable sharing of benefits arising from their utilization to the Convention on Biological Diversity. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. https://www.cbd.int/abs/doc/protocol/nagoya-protocol-en.pdf

Silla, A. J., & Byrne, P. G. (2019). The role of reproductive technologies in amphibian conservation breeding programs. Annual Review of Animal Biosciences, 7(1), 499-519. https://doi.org/10.1146/annurev-animal-020518-115056

Swan, M. (2015). Blockchain: Blueprint for a new economy. O'Reilly Media.

Wang, G., Chen, C., Jiang, Z., Li, G., Wu, C., & Li, S. (2024). Efficient use of biological data in the Web 3.0 era by applying nonfungible token technology. Journal of Medical Internet Research, 26, e46160. https://doi.org/10.2196/46160

Wilson, K. B., Karg, A., & Ghaderi, H. (2022). Prospecting non-fungible tokens in the digital economy: Stakeholders and ecosystem, risk and opportunity. Business Horizons, 65(5), 657-670. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2021.10.007