

# Biodiversidade Verificável: criando mercados confiáveis para serviços ecossistêmicos com IA + Blockchain + IoT

por **Thiago Rossi**

Maio, 2026



Oferecido por  
**Ecossis Soluções Ambientais**

O Fórum Econômico Mundial estima que mais da metade do PIB global (~US\$ 44 trilhões) apresenta dependência moderada ou alta dos serviços providos pela natureza (WEF, 2023). Ainda assim, os mercados que deveriam proteger esses serviços (ex.: sequestro de carbono, polinização, regulação hídrica, manutenção da biodiversidade), enfrentam um problema estrutural que nenhuma regulação por si só consegue resolver: a incapacidade de produzir evidência verificável, rastreável e resistente à fraude sobre o estado real dos ecossistemas.

Esse déficit de confiança não é trivial. Ele está na raiz do escândalo de créditos de carbono que abalou o mercado voluntário global em 2023, quando investigações do Guardian e do Zeit revelaram que mais de 90% dos créditos emitidos por um dos maiores certificadores do mundo não correspondiam a reduções reais de emissões.

O problema não é exclusivo do carbono: permeia toda a arquitetura dos chamados Pagamentos por Serviços Ecossistêmicos (PSE), instrumentos que, apesar de crescente demanda global, segue sendo minados por custos de transação elevados, monitoramento insuficiente e assimetria de informações entre pagadores e provedores (Wunder et al., 2020).

A questão central deste artigo é esta: como a convergência entre sensoriamento remoto via IoT, análise preditiva por Inteligência Artificial e registro imutável em blockchain, pode resolver o problema da credibilidade nos mercados de serviços ecossistêmicos e, com isso, viabilizar uma nova geração de instrumentos econômicos para a conservação da biodiversidade?

## A Crise de Credibilidade nos Mercados de Serviços Ecossistêmicos

O pagamento por serviços Ecossistêmicos surgiram como resposta ao fracasso dos mecanismos de comando-e-controle em conter a degradação ambiental. A lógica é economicamente elegante: mercado, criar incentivos financeiros diretos para quem os conserva pode alinhar comportamentos privados a objetivos sociais.

Na prática, contudo, a implementação esbarra em um conjunto de desafios bem documentados pela literatura.

Oberhauser (2019), em estudo publicado na *Frontiers in Blockchain*, identificou três gargalos estruturais nos esquemas de PSE: (i) a dificuldade de monitorar condicionalmente o desempenho ambiental — a chamada condicionalidade efetiva; (ii) os altos custos de transação para estabelecer contratos, verificar resultados e transferir recursos; e (iii) as assimetrias de poder e distribuição de benefícios que comprometem a equidade do sistema. Essas limitações tornam-se ainda mais agudas quando os esquemas de PSE operam no Sul Global, onde a infraestrutura institucional é frágil e o risco de captura e corrupção é elevado.

O surgimento do Quadro Global de Biodiversidade de Kunming–Montreal, adotado na COP15 em 2022, e as recomendações finais da Taskforce on Nature-related Financial Disclosures (TNFD), publicadas em setembro de 2023, ampliaram dramaticamente a pressão sobre empresas e instituições financeiras para que quantifiquem, reportem e mitiguem seus impactos sobre a natureza. Até 2025, mais de 500 organizações e 129 instituições financeiras haviam aderido ao framework TNFD (TNFD, 2024). Esse contexto cria uma demanda crescente por dados de biodiversidade que sejam ao mesmo tempo granulares, auditáveis e juridicamente defensáveis.

### O Problema do Oráculo e a Integridade na Origem dos Dados

O princípio fundacional de qualquer blockchain é que, uma vez registrado, um dado não pode ser alterado. Essa propriedade, porém, não garante que o dado registrado corresponda à realidade física do mundo. Esse é o chamado problema do oráculo: a blockchain é um sistema fechado e determinístico; o mundo natural, um sistema aberto e caótico. A ponte entre os dois requer mecanismos de confiança que a tecnologia, por si só, não resolve de forma automática.

Estudos recentes publicados na ScienceDirect identificam o problema do oráculo como o principal gargalo para a transição de visibilidade de dados para confiança computacional em sistemas IoT-blockchain integrados (Hassan et al., 2023). A solução técnica mais robusta atualmente disponível envolve a validação criptográfica dos dados ainda na camada de borda — isto é, no próprio dispositivo sensor — antes que a informação seja transmitida para a cadeia. Ao assinar digitalmente cada medição com uma chave privada única associada ao hardware, o sistema garante não apenas que o dado não foi adulterado em trânsito, mas que provém de um dispositivo físico específico, com localização e calibração rastreáveis.

Essa abordagem, denominada integridade na origem, é análoga ao que a metrologia científica aplica a medições industriais: a rastreabilidade não começa no laboratório de análise, mas no instante e no instrumento da coleta. Quando aplicada ao monitoramento ambiental, essa lógica transforma um sensor IoT de campo em um agente de confiança metrológica, capaz de produzir evidência com valência jurídica e financeira.

### IoT e Sensoriamento Multimodal: Construindo o Substrato da Evidência Ecológica

O monitoramento da biodiversidade em larga escala exige uma infraestrutura de sensoriamento que vai muito além do imageamento por satélite. Hallmann et al. (2022), em artigo publicado na *Basic and Applied Ecology*, argumentam que a ciência da biodiversidade necessita de algo equivalente às estações meteorológicas climáticas: redes de sensores autônomos, permanentes e verificáveis, capazes de capturar sinais bioacústicos, eDNA (DNA ambiental), parâmetros físico-

químicos de solo e água, e movimentos de fauna. Esses sistemas, integrados, produzem o que os autores denominam Automated Multisensor Modules for Biodiversity (AMMODs), que nada mais são que plataformas que transformam o monitoramento de espécies de uma atividade pontual e cara em um fluxo contínuo e automatizado de dados.

A revisão sistemática de Popescu sobre IoT e blockchain no monitoramento de poluição ambiental (2025) demonstra que a integração dessas tecnologias, quando corretamente arquitetada, supera limitações críticas dos métodos tradicionais: reduz custos de verificação, elimina a necessidade de terceiros confiáveis centralizados para custodiar os dados, e permite auditoria em tempo real por qualquer parte autorizada da cadeia de governança. Ao mesmo tempo, o estudo é enfático quanto às condições de sucesso: a integridade da arquitetura depende da qualidade dos sensores na borda, da gestão do problema do oráculo e da escolha adequada do protocolo de consenso blockchain em função da escala e do contexto de implementação.

### **Inteligência Artificial: Da Detecção de Padrões à Classificação de Evidências**

Se a IoT resolve o problema da coleta e da autenticidade do dado bruto, a Inteligência Artificial resolve o problema da interpretação. Os sinais capturados por sensores de campo (imagens de câmeras trap, registros acústicos, séries temporais de parâmetros hídricos) são, por si só, dados sem significado ecológico direto. A IA é a camada que transforma esse fluxo de sinais em indicadores de estado dos ecossistemas: abundância de espécies, integridade de habitats, índices de conectividade de paisagem.

A revisão publicada na Remote Sensing in Ecology and Conservation (Pettorelli et al., 2024) documenta como modelos de aprendizado profundo, especialmente redes convolucionais e transformers treinados em dados de sensoriamento remoto, são capazes de estimar parâmetros de biodiversidade com precisão comparável a levantamentos de campo, a uma fração do custo e com cobertura espacial e temporal incomparavelmente superior. O estudo aponta, contudo, uma condição crítica: a confiabilidade desses modelos depende de validação de campo rigorosa e de dados de treinamento representativos, que são justamente o tipo de dado que a integração com IoT certificada pode fornecer.

No contexto dos mercados de serviços ecossistêmicos, a IA desempenha ainda uma segunda função essencial: a detecção de anomalias e a identificação de padrões de fraude. Modelos de classificação temporal treinados sobre séries históricas de dados certificados podem sinalizar automaticamente quando leituras de sensores de campo divergem de padrões esperados para aquele bioma, estação e condição climática. A IA acaba, portanto, funcionando como um sistema de alerta precoce contra adulterações ou falhas de equipamento que comprometam a integridade do registro ambiental.

### **Blockchain como Infraestrutura de Governança Distribuída para a Natureza**

Em artigo publicado na Nature em 2017, Guillaume Chapron cunhou o conceito de criptogovernança ambiental ao argumentar que a tecnologia blockchain poderia substituir intermediários corruptíveis na gestão de recursos naturais, permitindo que comunidades com direitos sobre ecossistemas recebessem pagamentos diretos e verificáveis pela conservação, sem que fundos pudessem ser desviados, contratos adulterados ou resultados falseados. A

proposta de Chapron era especulativa; quase uma década depois, a literatura científica acumulou evidências sobre as condições em que essa promessa se sustenta.

A pesquisa de Oberhauser (2019) na *Frontiers in Blockchain* demonstrou, em prova de conceito implementada na Namíbia, que smart contracts alimentados por algoritmos de sensoriamento remoto podem automatizar pagamentos condicionados à integridade de corredores ecológicos — liberando recursos para comunidades locais somente quando o monitoramento confirma a manutenção da cobertura florestal acordada. O experimento mostrou a viabilidade técnica da arquitetura, mas também evidenciou seus limites: em contextos de governança complexa, a blockchain não resolve contradições políticas, apenas as torna transparentes.

Para aplicações em escala industrial, blockchains permissionadas oferecem vantagens significativas sobre redes públicas de prova de trabalho: menor consumo energético, throughput de transações compatível com o volume de dados IoT industriais, e controle de acesso adequado a contextos regulatórios. Estudos de benchmark publicados no *Journal of Cloud Computing* (Alsharabi et al., 2024) demonstram que arquiteturas privadas baseadas em Hyperledger mantêm propriedades de imutabilidade e auditabilidade suficientes para aplicações de rastreabilidade ambiental, com custo operacional significativamente inferior às alternativas públicas.

## O Protocolo de Trivergência: Arquitetura para Mercados Confiáveis

A trivergência entre IoT, IA e blockchain não é simplesmente a coexistência dessas três tecnologias em um mesmo sistema.

É, antes, uma arquitetura de confiança distribuída em que cada camada resolve uma classe específica de falha que as demais não conseguem endereçar sozinhas. A IoT resolve o problema da presença física e da autenticidade metrológica do dado. A IA resolve o problema da interpretação ecológica e da detecção de anomalias. A blockchain resolve o problema da custódia imutável, da auditabilidade e da automação contratual.

Quando operando de forma integrada, esse protocolo é capaz de produzir o que podemos chamar de evidência ambiental de grau financeiro: registros digitais com proveniência verificável desdeo sensor, interpretação algorítmica auditável e custódia imutável em ledger distribuído. Essa classe de evidência é funcionalmente equivalente ao que a metrologia científica produz para medições industriais sob controle legal sendo, portanto, capaz de fundamentar transações financeiras de alto valor com o mesmo rigor que se exige de ativos financeiros convencionais.

Na prática, isso se traduz em smart contracts que liberam pagamentos de PSE somente quando o sistema detecta, com base em dados de campo certificados, que os indicadores de biodiversidade acordados foram mantidos ou melhorados. Significa também NFTs ambientais que encapsulam metadados rastreáveis sobre o estado de um ecossistema em um dado momento, criando ativos digitais negociáveis cujo valor é ancorado em evidência física verificável, não em declarações autorreferenciadas.

## Implicações para o Brasil: Da Liderança em Biodiversidade à Liderança em Evidência

Com aproximadamente 20% da biodiversidade do planeta, os maiores estoques de carbono tropical e uma indústria agropecuária que responde por parcela crescente do comércio global, o

país está simultaneamente no centro da demanda por serviços ecossistêmicos e no centro das críticas quanto à confiabilidade das certificações ambientais que embalam seus produtos

A adoção crescente do TNFD por empresas e investidores internacionais criará, nos próximos anos, uma pressão regulatória e de mercado sem precedente sobre cadeias produtivas com impacto sobre biomas brasileiros. Empresas que não consigam demonstrar rastreabilidade de seus impactos na biodiversidade correm o risco de enfrentar barreiras de acesso a mercados e capital. As que conseguirem fazê-lo com dados verificáveis e de grau financeiro ganharão vantagem competitiva estrutural.

A oportunidade para o Brasil não está apenas em adequar-se a essas exigências, mas em liderar o desenvolvimento do padrão tecnológico que as viabilizará. Um país que domina a produção da maior diversidade biológica do planeta pode também dominar a infraestrutura que torna essa diversidade mensurável, verificável e monetizável, exportando não apenas commodities, mas protocolos de confiança para a sustentabilidade global.

### Conclusão: Verificabilidade como Fundamento de Mercados que Funcionam

A crise de credibilidade nos mercados de serviços ecossistêmicos não é uma falha de intenções, é uma falha de infraestrutura. Os instrumentos econômicos para a conservação da biodiversidade existem, a demanda por eles cresce e o arcabouço regulatório internacional está sendo rapidamente construído. O que falta é a capacidade técnica de produzir evidência ambiental com o grau de confiabilidade que mercados financeiros exigem.

A trivergência tecnológica não é uma solução mágica, e a literatura é cautelosa quanto a expectativas infladas sobre tecnologias em fase de amadurecimento. Mas é, até o momento, a arquitetura mais robusta disponível para resolver simultaneamente os três problemas centrais dos mercados de serviços ecossistêmicos: autenticidade do dado de campo, interpretação ecológica confiável e custódia imutável e auditável do registro ambiental.

Quando esses três elementos operam de forma integrada e metrologicamente rigorosa, criam a condição para que a biodiversidade deixe de ser um ativo intangível invisível ao mercado financeiro e se torne um ativo verificável, negociável e protetor de valor tanto para quem conserva quanto para quem investe na conservação.

Duas décadas de atuação na interface entre tecnologia e regulação ambiental ensinaram à Ecossis que provas valem mais que promessas. É com esse princípio, e com a arquitetura técnica que o sustenta, que trabalhamos para que os mercados de serviços ecossistêmicos finalmente se tornem o que sempre deveriam ter sido: confiáveis.

---

*Deseja entender como a arquitetura de trivergência da Ecossis pode ser aplicada ao monitoramento de ativos naturais em sua cadeia produtiva ou portfólio de investimentos? Entre em contato com nossa equipe técnica para uma avaliação de viabilidade.*

### Referências

Alsharabi, N., Ktari, J., Frikha, T. et al. Using blockchain and AI technologies for sustainable, biodiverse, and transparent fisheries of the future. J Cloud Comp 13, 135 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00696-8>.

Chapron, G. The environment needs cryptogovernance. *Nature* 545, 403–405 (2017). <https://doi.org/10.1038/545403a>.

Hassan, A., Makhdoom, I., Iqbal, W., Ahmad, A., & Raza, A. (2023). From trust to truth: Advancements in mitigating the Blockchain Oracle problem. *Journal of Network and Computer Applications*, 217, 103672. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103672>.

Oberhauser, D. (2019). Blockchain for Environmental Governance: Can Smart Contracts Reinforce Payments for Ecosystem Services in Namibia? *Front. Blockchain* 2:21. doi: [10.3389/fbloc.2019.00021](https://doi.org/10.3389/fbloc.2019.00021).

Pettorelli, N., Williams, J., Schulte, H., & Crowson, M. (2024). Deep learning and satellite remote sensing for biodiversity monitoring and conservation. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. <https://doi.org/10.1002/rse2.415>.

Ajakwe, I.U., Ajakwe, S.O., Lee, J.M. et al. Internet-of-Things-blockchain integration in environmental pollution monitoring data management: trends and techniques. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 22, 16123–16142 (2025). <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06615-x>.

EPLS Design. (2025, May 29). Taskforce on Nature-related Financial Disclosures (TNFD) Recommendations – TNFD. Taskforce on Nature-Related Financial Disclosures. <https://tnfd.global/publication/recommendations-of-the-taskforce-on-nature-related-financial-disclosures/>.

Nature Risk Rising: Why the Crisis Engulfing Nature Matters for Business and the Economy. (2020, January 19). World Economic Forum. <https://www.weforum.org/publications/nature-risk-rising-why-the-crisis-engulfing-nature-matters-for-business-and-the-economy/>.

Sven Wunder, Jan Börner, Driss Ezzine-de-Blas, Sarah Feder, Stefano Pagiola. 2020. Payments for Environmental Services: Past Performance and Pending Potentials. *Annual Review Resource Economics*. 12:209–234. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-094206>.