

Capítulo do Livro [Blockchain & Tecnologia](#)

Blockchain, Sustentabilidade e Ativos ambientais

Gustavo Leite & Thiago Rossi

Imagine um mundo onde as comunidades mais afetadas por desastres climáticos sejam diretamente beneficiadas por mercados globais de carbono, alimentados por tecnologias que garantem transparência e confiança. Ou uma comunidade rural isolada, excluída historicamente das cadeias econômicas globais, e receba o acesso direto a recursos financeiros internacionais.

Os desafios ambientais atuais são proporcionais à complexidade de nossa sociedade e refletem a polaridade e desigualdade que vivemos (Rockström et al., 2009). Nesse cenário, mudanças climáticas, perda de biodiversidade e desigualdade no acesso a recursos estão interligados em um sistema global delicado e difícil de gerenciar.

Eventos extremos como secas e enchentes, agravados pelo aquecimento global, já causaram prejuízos de US\$313 bilhões em 2021 (IPCC, 2021). Ao mesmo tempo, a perda anual de 10 milhões de hectares de florestas, conforme relatório da FAO (2020), compromete a capacidade do planeta de absorver carbono e manter a temperatura. Essa dinâmica revela não apenas a escala, mas também a interdependência desses problemas, que exigem soluções inovadoras.

Políticas econômicas, por exemplo, que incentivam a expansão agrícola, mas resultam na perda de 10 milhões de hectares de florestas por ano (FAO, 2020). Como resultado, agravam as mudanças climáticas e deslocam mais de 20 milhões de pessoas anualmente. Comunidades locais, pressionadas por necessidades econômicas, frequentemente adotam práticas que perpetuam a degradação ambiental com impactos cruzados tanto locais quanto globais.

Nesse contexto, tecnologias como o blockchain se apresentam como ferramentas promissoras, oferecendo descentralização, transparência e rastreabilidade para integrar diferentes atores e interesses. A capacidade dessa tecnologia de lidar com a complexidade sistêmica (Tapscott & Tapscott, 2016) transforma desafios em oportunidades para uma gestão ambiental mais inclusiva, eficaz e transparente.

Afinal, qual é a proporção de responsabilidade pelas mudanças climáticas entre estes diversos agentes? A resposta para essa questão é tão complexa quanto as próprias interações entre os sistemas humanos e naturais. Isso sem incluir a variável de emissões históricas, pois as emissões atuais de gases de efeito estufa, por si só, não explicam a profundidade da crise que enfrentamos.

Sistemas baseados em blockchain permitem rastrear cadeias produtivas, ajudando a reduzir as 931 milhões de toneladas de alimentos desperdiçados anualmente (UNEP). A imutabilidade dos registros assegura o cumprimento de metas,

como a redução de emissões de carbono, cujas compensações voluntárias movimentaram mais de US\$2 bilhões em 2021 (Ecosystem Marketplace).

1. Impacto global e local

As ações locais são fundamentais para enfrentar desafios globais, especialmente em questões ambientais. Projetos de reflorestamento, como o programa brasileiro “Plantar Florestas”, que busca restaurar 12 milhões de hectares até 2030, contribuem diretamente para a captura de carbono e para as metas do Acordo de Paris. Além disso, podem registrar em tempo real a captura de CO₂, permitindo auditorias e demonstrando resultados com dados confiáveis.

Da mesma forma, iniciativas de reciclagem, como na Alemanha, onde 67% dos resíduos são reciclados (Statista, 2021), demonstram como práticas locais reduzem emissões e promovem a sustentabilidade. Sistemas como esse podem rastrear materiais desde a coleta até o reprocessamento, garantindo confiança e eficiência.

Tais exemplos evidenciam como esforços locais podem gerar impactos positivos no cenário global, conectando comunidades às metas ambientais planetárias com rastreabilidade e transparência. Essas capacidades do blockchain não apenas promovem a responsabilização das partes, mas também facilita a colaboração multissetorial, conectando governos, empresas e comunidades em ações coordenadas para ampliar o impacto de soluções sustentáveis.

A colaboração entre diferentes setores é essencial para enfrentar os desafios sistêmicos da sustentabilidade. Conectar o local e o global somente será possível quando iniciativas públicas, privadas e comunitárias trabalharem em colaboração.

2. Cooperação multissetorial

A cooperação entre iniciativas é essencial para a gestão de desafios ambientais. Governos possuem a capacidade regulatória para estabelecer políticas e metas climáticas. Empresas detêm os recursos e a inovação necessários para implementar soluções práticas. A sociedade civil desempenha um papel essencial na fiscalização, adoção de práticas sustentáveis e engajamento local.

Entretanto, esses atores enfrentam dificuldades de alinhamento devido a prioridades e agendas distintas. A falta de transparência em decisões e ações amplia lacunas entre os setores, dificultando a criação de soluções integradas e eficazes.

Como solução, o blockchain oferece uma infraestrutura de consenso distribuído e descentralizado. Governos podem monitorar políticas ambientais em tempo real através de registros transparentes e imutáveis. Além disso, empresas são capazes de demonstrar conformidade regulamentar e comunidades locais podem compartilhar dados sobre seus esforços e impactos.

Plataformas baseadas em blockchain facilitam a troca de informações entre as partes. Dados sobre redução de emissões geram relatórios automatizados, podendo ser auditáveis pelos atores da rede. Dessa forma, promove-se maior confiança entre

diferentes setores e facilita a coordenação, beneficiando iniciativas globais como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS).

A tokenização é também uma aplicação potencial, como a criação de tokens de carbono que representam uma tonelada de CO₂ capturada ou evitada, emitidos por projetos como reflorestamento ou geração de energia renovável. Empresas que superam suas metas de emissões poderiam optar por adquirir esses tokens, contribuindo financeiramente para iniciativas sustentáveis e ampliando a rastreabilidade.

Por último, a tokenização pode viabilizar novos modelos de financiamento colaborativo para a sustentabilidade como, por exemplo, um token baseado em blockchain vinculado a projetos de conservação de biodiversidade, permitindo que investidores globais contribuam diretamente para iniciativas locais. Através de contratos inteligentes, fundos seriam liberados apenas quando metas específicas fossem atingidas, como a restauração de hectares de floresta ou o aumento da população de espécies ameaçadas. Essa abordagem não apenas alinha interesses conflitantes, mas também introduz uma dimensão temporal crítica, garantindo a continuidade de projetos de longo prazo. Ao integrar cooperação multissetorial e incentivos financeiros, o blockchain pode transformar o panorama da sustentabilidade.

Ferramentas que promovam transparência e consenso podem facilitar a integração entre governos, empresas e sociedade civil, alinhando objetivos distintos em ações coordenadas deixando o debate apenas no âmbito político e técnico. Mas como?

3. Desafios

Os desafios da sustentabilidade demandam uma visão de longo prazo, mas enfrentam incertezas como mudanças climáticas imprevisíveis e instabilidade política. Projetos de restauração ambiental ou transição energética podem levar décadas para gerar impacto, sendo frequentemente prejudicados por alterações nas prioridades governamentais ou econômicas.

Tecnologias inovadoras podem oferecer soluções ao criar registros confiáveis que garantem continuidade. A automatização de etapas, como a liberação de recursos vinculada à verificação de resultados, pode assegurar o cumprimento de metas preestabelecidas. Esses mecanismos contribuem para reduzir conflitos de interesse, promovendo confiança e estabilidade em iniciativas de longo prazo.

Enquanto a sociedade não pautar as questões de mudanças climáticas como um assunto de estado e não de governo, não teremos qualquer chance de enfrentar a crise que vivemos, seja pela escala temporal, fronteira e econômica.

4. Conflitos de interesse e equidade

A busca pelo crescimento econômico frequentemente entra em conflito com a necessidade de preservar o meio ambiente. A expansão agrícola, a extração de

recursos naturais e a urbanização geram impactos nos ecossistemas, mas também impulsionam economias locais e globais. Alinhar esses interesses, criando créditos ambientais negociáveis que financiam iniciativas de conservação enquanto compensam impactos produtivos. Essa abordagem incentiva práticas responsáveis e integra a sustentabilidade à estratégia econômica.

A equidade na distribuição dos benefícios é crucial para garantir a justiça e eficácia dessas iniciativas. Populações vulneráveis, frequentemente as mais afetadas por crises ambientais, têm acesso limitado aos recursos gerados. Tecnologias descentralizadas podem democratizar esse acesso, permitindo que comunidades locais se beneficiem diretamente por meio de incentivos financeiros atrelados à conservação. Esses mecanismos ampliam oportunidades para populações marginalizadas, fortalecendo a resiliência e o impacto positivo das soluções sustentáveis em escala global.

A transparência promovida pelo uso da blockchain conecta ações locais a metas globais. Sua programabilidade automatiza processos e garante compromissos em cenários instáveis. Essas características ampliam confiança e colaboração multissetorial, transformando desafios em oportunidades. A seguir, veremos como o blockchain se aplica na prática, com exemplos no contexto da sustentabilidade.

CASOS DE USO NO CONTEXTO DA SUSTENTABILIDADE

Transparência na Cadeia de Suprimentos

Um dos maiores desafios das cadeias de suprimento globais tem a ver com a sua opacidade, ou seja, a dificuldade em rastrear a origem dos produtos e as práticas associadas à sua produção. Com a blockchain, cada etapa de produção e distribuição é registrada, garantindo que stakeholders tenham acesso a informações detalhadas.

Um exemplo disso é a IBM Food Trust (Kamath, 2017), uma plataforma blockchain desenhada para aumentar a transparência e rastreabilidade de produtos alimentícios. Com ela, diferentes stakeholders do sistema alimentar se conectam para prover e acessar informações sobre a origem e o tratamento dos produtos de maneira descentralizada.

Outro desafio enfrentado pelas empresas está relacionado à gestão de resíduos e emissões de gases de efeito estufa (GHG). A falta de dados precisos e confiáveis limita a confiança de stakeholders sobre o manejo dos resíduos e o uso de combustíveis fósseis para a operação. Interligando a blockchain com sensores IoT, é possível registrar em tempo real a geração de resíduos e emissões.

A comercialização de créditos de carbono é um desafio adicional à coleta e tratamento dos dados. A falta de transparência sobre a procedência do crédito e a presença de intermediários onerosos demandam fiscalização frequente, aumentando os custos. Ao criar mercados descentralizados, baseados na blockchain, as transações são registradas de maneira pública e auditável, reduzindo riscos de falsificação e dupla contabilidade entre outros.

Projetos sustentáveis muitas vezes enfrentam desafios relacionados ao financiamento. Com os contratos inteligentes, financiadores e projetos dependem

menos de intermediários ao programar condições pré-estabelecidas para a liberação e uso de fundos.

O impacto da blockchain também se estende à capacitação de comunidades locais e pequenos negócios. Ao democratizar o acesso a informações e mercados globais, essa tecnologia possibilita a participação de agentes tradicionalmente excluídos das cadeias econômicas (Robinson, 2018). Pequenos agricultores, por exemplo, podem utilizar plataformas baseadas em blockchain para acessar mercados de forma direta, certificando práticas sustentáveis e conquistando maior valor por seus produtos. Isso cria um ciclo virtuoso que beneficia não apenas os indivíduos, mas também o meio ambiente.

INTEGRAÇÃO COM IoT, IA e SMART CONTRACTS

A Trivergência (Isaacson, 2022), ou seja, a convergência da blockchain com IA (Inteligência Artificial) e IoT (Internet das Coisas), conectados, através de uma infraestrutura criptográfica, podem registrar dados automaticamente, aumentando a eficiência do monitoramento de projetos de sustentabilidade.

Essa convergência está criando um ecossistema robusto para alavancar a sustentabilidade. De maneira conjunta, elas oferecem automação, confiabilidade e rastreabilidade para resolver desafios ambientais com eficiência e transparência. A validação e tratamento de dados com o uso de IA, amplia a confiabilidade dos dados e o tratamento de erros, quando existirem, permitindo a identificação de problemas na rede de sensores quase que instantaneamente.

O poder da IoT está em conectar dispositivos, sensores e máquinas em uma rede de coleta e compartilhamento de dados em tempo real (Guinard, 2017). A integração com a blockchain permite o registro imutável das informações ambientais capturadas em uma infraestrutura distribuída de sensores.

Dessa forma, endereçamos um desafio constante (Baumann, 2018) dos projetos de sustentabilidade que é o acompanhamento contínuo das práticas sustentáveis nas cadeias de suprimento. Rastreando a origem de materiais, como madeira, alimentos, recicláveis, conseguimos dar visibilidade em tempo real aos acontecimentos na cadeia e permitimos que diferentes stakeholders enxerguem o micro e o macro e pontos de melhoria. Isso assegura a conformidade com regulamentações ambientais e aumenta a confiança dos consumidores.

O Papel dos Contratos Inteligentes

No contexto ambiental, os *smart contracts* podem ser utilizados para automatizar processos de licenciamento e conformidade. Ao estabelecer condições prévias, dados recebidos dos sensores e enviados à blockchain são automaticamente validados e o contrato é executado. Estando a execução limitada pelas condições, é de interesse das partes que os processos operacionais e o funcionamento dos dispositivos IoT estejam calibrados e em sincronia, reduzindo as chances de fraude.

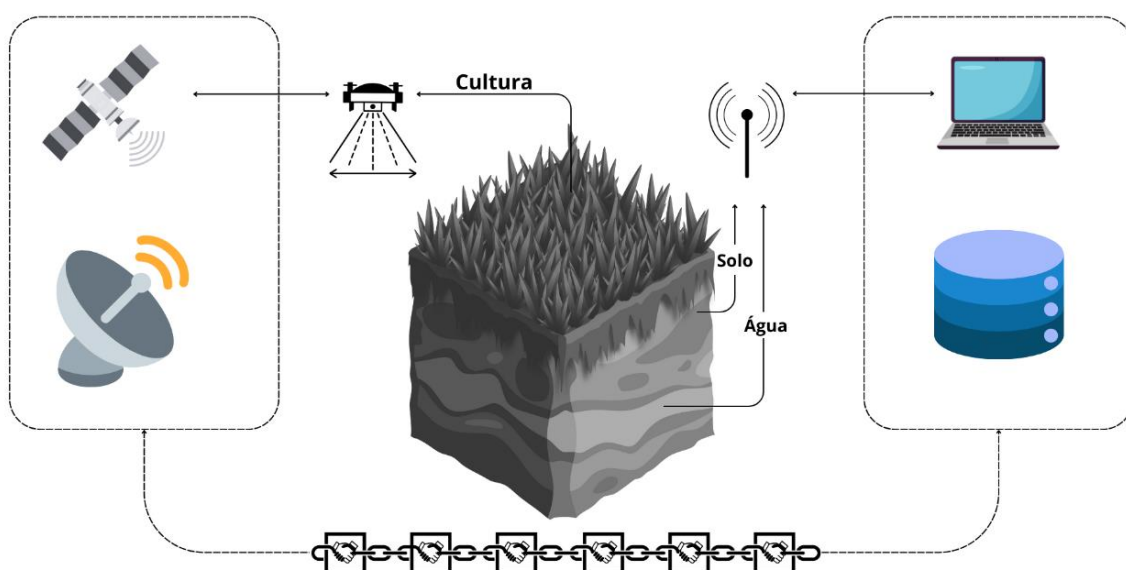
Um exemplo prático de uso dos contratos inteligentes na sustentabilidade pode ser visto em empresas de um setor regulamentado onde o monitoramento das emissões de carbono é essencial. Ao configurar sensores IoT para monitorar as emissões de veículos automotores, o contrato inteligente pode assumir o papel de

liberar automaticamente as autorizações ambientais e reportar aos setores e órgãos competentes. Caso as emissões estejam fora dos padrões delimitados, alertas podem ser emitidos para que gestores analisem o problema.

Outro caso prático de integração entre blockchain e IoT é o monitoramento de resíduos industriais. Pagamentos para empresas certificadas podem ser acionados pelo contrato inteligente após os sensores registrarem os volumes dos resíduos descartados, transporte e destinação realizados conforme exigência da lei.

Para além da IoT, a integração da IA com a blockchain na sustentabilidade oferece soluções que vão desde a coleta e processamento dos dados até a sua análise nos contextos sociais e ambientais. Com a IA, complementa-se a imutabilidade e a descentralização da blockchain com a identificação de padrões complexos e previsão de comportamento.

No caso do monitoramento através de sensores, a IA é utilizada para analisar os dados coletados pelos sensores que estão conectados à blockchain. Um exemplo disso ocorre na rede de monitoramento da qualidade da água em rios, onde sensores registram informações e a IA processa os dados para identificar anomalias que possam estar presentes.



Ao falar do financiamento de projetos de sustentabilidade, a IA já é utilizada para prever tendências em projetos sustentáveis (Tapscott, 2019). Atualmente, algoritmos de aprendizado de máquina analisam dados históricos de emissões, manutenção de ativos ambientais e serviços ecossistêmicos, crescimento econômico e mudanças climáticas para estimar tendências. Previsões como essas podem ser registradas na Blockchain, em mercados de dados como o Ocean Protocol (McConaghy, 2018). Além disso, modelos preditivos já são utilizados para prever o impacto de iniciativas de reflorestamento e recuperação de biodiversidade, monitoramento de estradas e atropelamento de fauna.

TOKENIZAÇÃO DE ATIVOS AMBIENTAIS

A tokenização de ativos ambientais é uma nova tendência que visa aprimorar a forma como a preservação do meio ambiente e a gestão de recursos naturais são tratadas. Ativos ambientais podem ser entendidos como bens públicos ou privados que podem ser avaliados de acordo com os benefícios que eles entregam para os recursos.

O ciclo da água, o ciclo do carbono, o ciclo dos nutrientes nos solos, a polinização feita por insetos ou pequenos animais, todos são exemplos de serviços ecossistêmicos que acontecem naturalmente. A tokenização, portanto, desses “ativos” visa utilizar as métricas de preservação ou regeneração desses serviços recompensando atores que agem para equilibrar os impactos negativos da ação humana. Assim, esses ativos podem ser utilizados tanto em mercados regulados quanto voluntários.

A gestão desses ativos ainda enfrenta desafios, como falta de transparência, alto custo e dificuldade de monitoramento em tempo real. Desafios, como já vimos anteriormente, sendo endereçados com o uso de IoT, IA e blockchain.

A Tokenização

A tokenização no caso dos ativos ambientais diz respeito ao processo de converter ativos físicos (RWA) ou intangíveis em tokens digitais na blockchain. Essa abordagem permite que sejam tokenizados créditos de carbono, áreas de preservação e serviços ecossistêmicos, e que esses sejam representados de maneira única em uma blockchain, permitindo a compra, venda ou troca de unidades ou frações em mercados digitais.

Além disso, com os ativos ambientais tokenizados, torna-se viável que investidores de diferentes partes do mundo apoiem iniciativas ambientais de forma direta, globalizando e descentralizando o apoio à essas iniciativas.

Casos de Uso

1. Créditos de Carbono

Com o uso de blockchain, cada certificado de crédito de carbono emitido é registrado de forma única, impedindo sua duplicação ou revenda indevida.

2. Terras de preservação

Tokens digitais também podem representar uma fração de uma reserva ambiental, permitindo que diversos investidores tenham acesso a esse mercado e facilitando a entrada de novos investidores.

3. Serviços Ecossistêmicos

O pagamento por serviços ambientais ou ecossistêmicos já é uma realidade. Tokens desse tipo podem representar, por exemplo, a preservação de populações de abelhas e sua polinização em áreas agrícolas. Esse tipo de remuneração pode incentivar que agricultores conservem essas populações e que biorregiões possam investir nesses serviços onde eles são mais necessários.

Embora as oportunidades sejam atrativas, os desafios relacionados a esses ativos ainda permanecem. Diferentemente dos créditos de carbono, faltam estudos e padronização metodológica para avaliar diferentes métricas de biodiversidade e serviços ecossistêmicos.

Regulamentações e aceitação por parte do mercado são pontos chave para viabilizar maior *accountability* no que tange a gestão dos recursos. Avanços na governança, na condução de estudos e o aumento no interesse em soluções financeiras sustentáveis indicam uma expansão significativa da prática de tokenização de ativos ambientais.

FINANÇAS E SUSTENTABILIDADE

Aprofundando brevemente sobre a questão das oportunidades, vale destacar que grandes atores do mercado blockchain podem ter um papel significativo na viabilidade das iniciativas e projetos de sustentabilidade. *Exchanges* centralizadas ou descentralizadas são responsáveis hoje por facilitar a negociação dos ativos digitais.

Essas plataformas possuem infraestruturas robustas e alcance global, além de criarem mercados especializados. Binance, Coinbase e OKX já têm explorado iniciativas de financiamentos sustentáveis, além da ClimateTrade (Antonopoulos, 2020) e da Moss. Com esses investimentos as exchanges contribuem para a mitigação de desafios ambientais e fortalecem sua imagem perante investidores, mostrando seu comprometimento com práticas responsáveis.

Por último, investir na educação e conscientização de seus clientes significa incentivar maior participação em mercados sustentáveis através de campanhas sobre os benefícios e a importância de ativos sustentáveis. Ao listar tokens ambientais nas plataformas, exchanges podem destacar os impactos positivos que estão associados a esses ativos, com dados verificáveis sobre o retorno financeiro, mas principalmente sobre os resultados e contribuições do projeto para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Conclusão

Os próximos anos serão o alvorecer de novas soluções, ainda nem pensadas, que o Blockchain e IA irão gerar, mas será também o momento de sentirmos eventos climáticos extremos e em escalas globais

Integrar a blockchain com estratégias globais de sustentabilidade depende de compreender a transparência e a inclusão como princípios de uma inovação realmente sustentável. No mundo atual, é essencial não somente desenvolver novas tecnologias, mas usá-las para reformular sistemas econômicos e sociais multissetoriais e multiobjetivos.

No que tange a sustentabilidade e o futuro da nossa existência como espécie no planeta, mais que uma revolução, precisamos de uma “desconstrução positiva” sobre o que entendemos sobre cooperação e nossa responsabilidade. Blockchain e sua convergência com outras tecnologias emergentes têm o potencial de acelerar essa transformação. Mas nosso maior desafio ainda é enxergarmos além das soluções técnicas e garantir que elas sirvam como plataformas para um futuro próspero social e ecologicamente.

REFERÊNCIAS

- ANTONPOULOS, A. M. **A internet do Dinheiro**. EmRede Editora, 2018.
- CASEY, M. J. **The Token Economy: When Money Becomes Programmable**. Blockchain Research Institute. 2017.
- CHRYSTIE, D. **Coopetition in Global Commerce: Why It Will Take a Pro-Competitive Global Village to Scale Blockchain**. Blockchain Research Institute. 2023.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). (2020). **Global Forest Resources Assessment 2020**. FAO.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2021). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press.
- ISAACSON, T. M. **Patents at Trivergence: Combining Blockchain, Artificial Intelligence, and the Internet of Things**. Blockchain Research Institute. 2022.
- JACOB-LOPES, E., ZEPKA, L. Q., DEPRÁ, M. C. **Smart Food Industry: The Blockchain for Sustainable Engineering. Volume I - Fundamentals, Technologies, and Management**. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2022.
- KAMATH, R. **Food Traceability on Blockchain: Walmart's Pork and Mango Pilots with IBM**. Blockchain Research Institute. 2017.
- KUMAR, N., et al. **Blockchain, Big Data and Machine Learning, Trends and Applications**. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2022.
- MAJER, A. **Enabling IoT and the Universal Sharing Network**. Blockchain Research Institute. 2017.
- MUTHU, S. S. (ed.). **Blockchain Technologies for Sustainability, Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes**. Springer. 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6301-7_2.
- ROBINSON, R. W. **Distributed and Collaborative Marketplaces: Blockchain Serving the Unbanked**. Blockchain Research Institute. 2018.
- ROCKSTRÖM, J., et al. (2009). **Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity**. Ecology and Society.
- TAPSCOTT, D., & TAPSCOTT, A. (2016). **Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World**.
- ECOSYSTEM MARKETPLACE. (2021). **State of the Voluntary Carbon Markets 2021: Installment 1 - Market Insights**. Forest Trends Association Portfolio.
- STATISTA. (2021). **Recycling rate of municipal waste in Germany from 2005 to 2021**. Statista. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/>