

Anexo I. Registro del Título del Trabajo Fin de Grado (TFG-BA)

NOMBRE DEL ALUMNO: Borja Muñoz Espinosa

PROGRAMA: E2 + BA

GRUPO: B

FECHA: 9/10/2025

Director Asignado: Rivas Compains

Apellidos

Francisco Javier

Nombre

Título provisional del TFG-BA:

**Evaluación de la Contribución de la Tecnología Blockchain a la Sostenibilidad y Eficiencia Económica:
Análisis del Impacto Ambiental, Tecnológico y Regulatorio**

ADJUNTAR PROPUESTA (objetivo, bibliografía, metodología e índice preliminares)

Firma del estudiante:

Borja

Fecha: 9/10/2025



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales - ICADE

Evaluación de la Contribución de la Tecnología Blockchain en la Sostenibilidad y Eficiencia Económica: Análisis del Impacto Ambiental, Tecnológico y

Clave: 202004447

Índice

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 ANTECEDENTES Y RELEVANCIA DEL ESTUDIO.....	3
1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	4
1.3 LIMITACIONES	4
2. VISIÓN GENERAL DE LA TECNOLOGÍA DE CRIPTOMONEDAS Y SU IMPACTO AMBIENTAL	5
2.1 FUNCIONAMIENTO DE LAS CRIPTOMONEDAS: INTRODUCCIÓN TECNOLÓGICA.....	5
2.2 IMPACTO AMBIENTAL DE LA MINERÍA DE CRIPTOMONEDAS	7
2.3 IMPLICACIONES ECONÓMICAS DE LA HUELLA AMBIENTAL DE LAS CRIPTOMONEDAS.....	9
3. INNOVACIONES TECNOLÓGICAS EN CRIPTOMONEDAS PARA MEJORAR LA SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA	11
3.1 DESARROLLO DE MECANISMOS DE CONSENSO ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES.....	11
3.2 ADOPCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN LA MINERÍA	16
3.3 SOLUCIONES DE ESCALABILIDAD EN BLOCKCHAIN	19
4. BLOCKCHAIN COMO FACILITADOR DE LA SOSTENIBILIDAD EN OTROS SECTORES	23
4.1 CADENAS DE SUMINISTRO.....	23
4.2 SALUD	23
4.3 FINANZAS.....	23
5. PANORAMA REGULATORIO E IMPLICACIONES POLÍTICAS.....	23
6. CONCLUSIONES.....	23
7. BIBLIOGRAFÍA.....	23

1. Introducción

1.1 Antecedentes y Relevancia del Estudio

(Escribir al finalizar el trabajo)

1.2 Objetivos y Preguntas de Investigación

Objetivos específicos:

- a. Evaluar el impacto ambiental de las criptomonedas, con un enfoque particular en las actividades de minería y su contribución a la huella de carbono global.
- b. Analizar innovaciones tecnológicas destinadas a mejorar la sostenibilidad de las criptomonedas, incluyendo mecanismos de consenso energéticamente eficientes y el uso de energías renovables.
- c. Explorar el potencial de blockchain para promover la sostenibilidad en otros sectores, como cadenas de suministro, agricultura, salud y finanzas.
- d. Estudiar el panorama regulatorio, identificando modelos y políticas emergentes que favorezcan el desarrollo sostenible de las criptomonedas.
- e. Proponer recomendaciones para equilibrar el desarrollo de las criptomonedas con los objetivos globales de sostenibilidad y viabilidad económica.

Preguntas de investigación:

- *¿Cuáles son las principales fuentes de impacto ambiental asociadas al consumo energético y a la minería de criptomonedas?*
- *¿Qué innovaciones tecnológicas están siendo implementadas o desarrolladas para mejorar la sostenibilidad ambiental y económica de las criptomonedas?*
- *¿Cómo puede la tecnología blockchain contribuir a promover la sostenibilidad en sectores clave como la agricultura, la salud y las cadenas de suministro?*
- *¿Qué papel desempeñan las regulaciones existentes en la transición hacia criptomonedas más sostenibles, y cómo podrían evolucionar para fomentar la innovación y la sostenibilidad?*

1.3 Limitaciones

Divergencia en datos y estimaciones:

Los datos sobre consumo energético y emisiones de carbono de las criptomonedas, especialmente en sistemas PoW, presentan variabilidad significativa debido a diferencias en las metodologías y fuentes utilizadas.

Enfoque en tecnologías consolidadas:

Aunque se examinan innovaciones emergentes, el análisis se centra en mecanismos de consenso y soluciones tecnológicas ampliamente implementadas, dejando fuera tecnologías en etapas iniciales de desarrollo.

Limitaciones geográficas y regulatorias:

El estudio aborda tendencias regulatorias globales, pero no profundiza en las particularidades de cada jurisdicción, lo que podría limitar la aplicabilidad directa de algunas recomendaciones a contextos específicos.

Alcance interdisciplinario:

Si bien el trabajo integra dimensiones ambientales, tecnológicas, económicas y regulatorias, no profundiza en aspectos éticos y socioculturales relacionados con la sostenibilidad de las criptomonedas.

Adaptabilidad tecnológica y temporal:

Dado el rápido ritmo de evolución del sector, las conclusiones están condicionadas por el estado actual de las criptomonedas y blockchain, lo que podría requerir revisiones futuras para reflejar cambios significativos en la industria.

2. Visión General de la Tecnología de Criptomonedas y su Impacto Ambiental

2.1 Funcionamiento de las Criptomonedas: Introducción Tecnológica

Las criptomonedas son activos digitales basados en la tecnología blockchain, que permite la realización de transacciones de forma descentralizada y segura, sin necesidad de confiar en autoridades centrales como los bancos. Este concepto se introdujo en 2008 con Bitcoin, desarrollado por el pseudónimo Satoshi Nakamoto, que estableció un sistema de contabilidad compartida o blockchain, donde las transacciones quedan registradas de forma transparente e inalterable en una red de nodos interconectados.

En esencia, una blockchain es un tipo de tecnología de registro distribuido (DLT) que organiza los datos en "bloques" de transacciones. Cada bloque está vinculado criptográficamente al anterior, formando una "cadena" que asegura la inmutabilidad y la transparencia del sistema. Esta estructura permite que cada participante de la red mantenga una copia actualizada de la cadena de bloques, lo cual garantiza tanto la redundancia como la resistencia a manipulaciones o fraudes (Zheng et al., 2017).

Mecanismo de Consenso Principal (PoW)

La seguridad y la integridad de las criptomonedas dependen de los mecanismos de consenso, que permiten a los participantes de la red acordar el estado actual de la blockchain. Entre estos mecanismos, la Prueba de Trabajo (Proof of Work, PoW), introducida por Bitcoin, ha sido históricamente el más utilizado y sigue siendo una de las bases tecnológicas más importantes en el ecosistema de las criptomonedas.

PoW se basa en que una serie de usuarios denominados "mineros" utilizan equipos especializados para resolver problemas matemáticos complejos, los cuales sirven para verificar y registrar transacciones en la blockchain. A cambio de esto, reciben la criptomoneda como recompensa (Nakamoto, 2008). Sin embargo, este proceso consume una gran cantidad de energía. El consumo anual de Bitcoin, por ejemplo, se estima entre 80 y 140 teravatios-hora (TWh) para 2024 (Digiconomist, 2024; Cambridge Centre for Alternative Finance, 2024), lo cual es comparable al consumo de países medianos como Argentina, generando emisiones significativas de gases de efecto invernadero (Truby et al., 2022). Cabe destacar que las estimaciones sobre el consumo anual de Bitcoin varían significativamente dependiendo de la fuente.

Sin embargo, el sector ha comenzado a explorar alternativas más sostenibles, como la Prueba de Participación (Proof of Stake, PoS), que reduce drásticamente el consumo energético al

reemplazar el proceso de minería por un sistema basado en la participación activa de los usuarios. Estas alternativas, junto con otras variantes de consenso, serán analizadas más a fondo en el apartado 3.1, donde se compararán sus ventajas y limitaciones en el contexto de la sostenibilidad y la eficiencia tecnológica.

2.2 Impacto Ambiental de la Minería de Criptomonedas

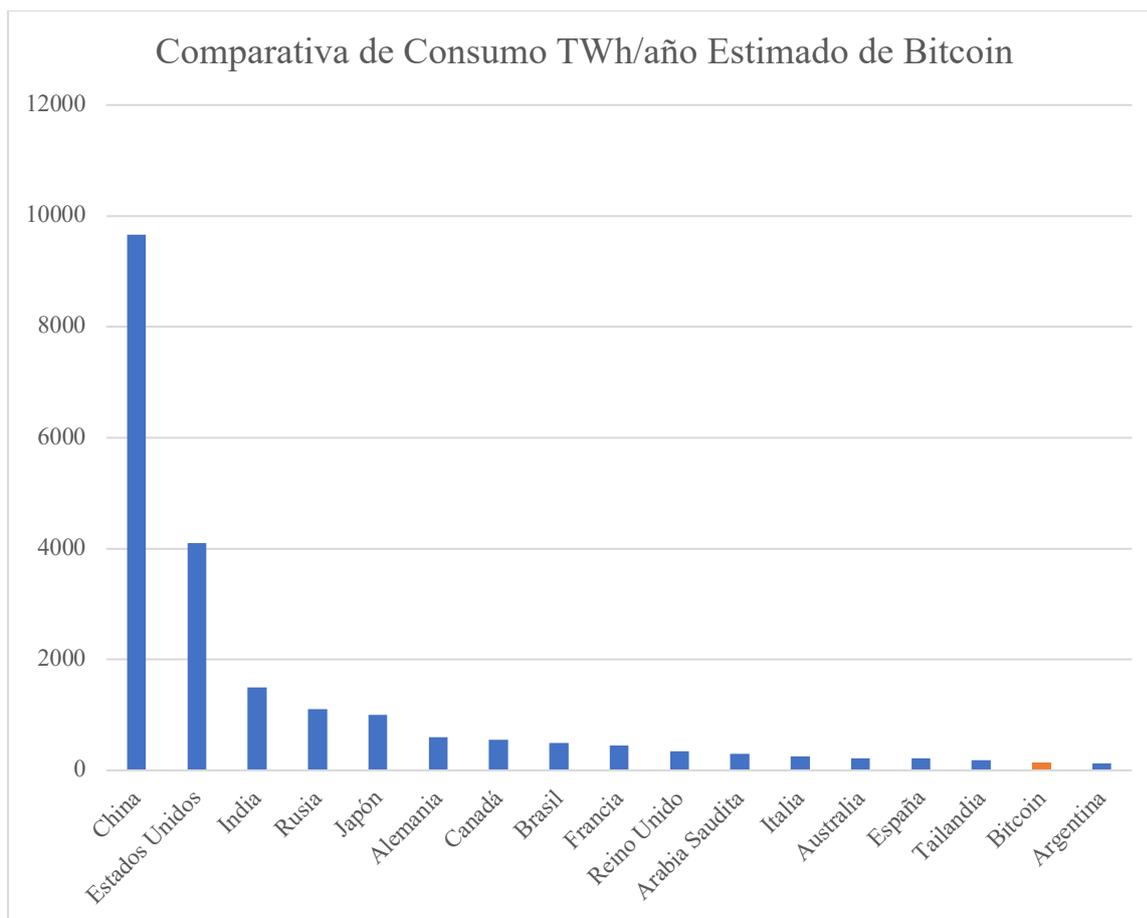
El diseño competitivo de PoW implica que los mineros deben utilizar hardware especializado de alto rendimiento de manera constante, consumiendo así grandes cantidades de electricidad. Este consumo energético elevado no solo representa un desafío en términos de sostenibilidad, sino que también provoca un incremento en las emisiones de carbono. En algunas regiones donde la minería se concentra, como ciertas zonas de Estados Unidos y Kazajistán (Truby et al., 2022), la electricidad aún se obtiene mayormente de combustibles fósiles, lo cual intensifica el impacto ambiental de esta actividad.

Huella de Carbono y Emisiones

La huella de carbono de la minería PoW es significativa. Se estima que la minería de Bitcoin genera más de 50 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono anualmente, lo cual equivale a las emisiones de pequeños países industrializados. Además del consumo de energía, el uso de equipos especializados, como los Circuitos Integrados de Aplicación Específica (ASICs), contribuye a la generación de residuos electrónicos (e-waste) debido a su corta vida útil y a la necesidad de actualización constante (Sarkodie et al., 2023).

Figura 2¹

¹ Cambridge Centre for Alternative Finance. (2024). *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI)*. Disponible en: <https://ccaf.io/cbeci/>



Variabilidad en la Huella de Carbono y el Consumo Energético de las Blockchains

Actualmente, no existe una metodología estándar para medir de forma uniforme el impacto ambiental de las blockchains, debido a las diferencias en los algoritmos utilizados, los protocolos de consenso y los tipos de hardware implementados. Además, resulta complicado separar el consumo energético propio de la blockchain del impacto causado por las infraestructuras de red que la soportan.

Se han realizado varios intentos para medir este impacto ambiental, centrados especialmente en Bitcoin y Ethereum por su popularidad y su uso del mecanismo de consenso Proof of Work (PoW). Sin embargo, los resultados obtenidos presentan grandes discrepancias, lo que refleja la falta de metodologías comparables y de estudios revisados por pares. Esta situación se ve agravada por la experiencia limitada de la industria de blockchains públicas en abordar y cuantificar el impacto climático (Sedlmeir et al., 2020).

Otro problema significativo es que muchos estudios no recurren a investigaciones previas sobre el impacto ambiental, como las realizadas en el sector de las Tecnologías de la Información y

la Comunicación (TIC), ni a normas reconocidas, como las de la Organización Internacional de Normalización (ISO) (Ghosh & Das, 2020). Esto pone de manifiesto la necesidad urgente de establecer estándares claros y desarrollar herramientas fiables que permitan evaluar de forma precisa el impacto ambiental de las tecnologías blockchain.

2.3 Implicaciones Económicas de la Huella Ambiental de las Criptomonedas

El impacto ambiental de las criptomonedas no solo plantea problemas de sostenibilidad, sino que también tiene importantes implicaciones económicas, tanto en costes operativos directos como en términos de regulación, efectos en el mercado energético local y otros factores.

Costes Directos del Consumo Energético

La minería PoW supone un coste considerable, especialmente para operaciones a gran escala. Además, los costes de minar un solo Bitcoin pueden variar drásticamente según la ubicación, debido a las diferencias en las tarifas de electricidad. Por ejemplo, en Irán, el coste estimado de minar un Bitcoin es de aproximadamente \$1,324, mientras que en Irlanda puede superar los \$321,000, lo cual refleja la influencia de los precios locales de electricidad en la viabilidad de la minería (Küfeoğlu & Ozkuran, 2019). En Estados Unidos, donde el precio de la electricidad también es relativamente alto, la rentabilidad de la minería se ve afectada, incentivando una concentración de operaciones en regiones con tarifas eléctricas más bajas, como Texas.

Para mitigar estos costes elevados y reducir el riesgo de regulación, algunos mineros han optado por emplear fuentes de energía renovable, aunque esta transición exige una inversión inicial significativa en infraestructuras (Buterin, 2013; Truby et al., 2022). Esta tendencia hacia la energía renovable en la minería busca también atender las crecientes preocupaciones ambientales y regulatorias en torno al impacto de la industria.

A continuación, se muestra una estimación de los top 10 países dónde resulta más barato y más caro minar un Bitcoin, basado en datos de GlobalPetrolPrices.com en diciembre 2023:

Figura 3²

Países más rentables para la minería		Países menos rentables para la minería	
País	Coste eléctrico 1 BTC (USD)	País	Coste eléctrico 1 BTC (USD)
Iran	\$1,324.17	Ireland	\$321,112.30
Ethiopia	\$1,986.26	Belgium	\$280,062.89
Sudan	\$3,972.52	Bahamas	\$280,724.98
Syria	\$3,972.52	UK	\$271,455.76
Cuba	\$3,972.52	Germany	\$269,469.50
Libya	\$5,296.70	Cayman Islands	\$268,807.41
Angola	\$8,607.13	Denmark	\$258,214.01
Kyrgyzstan	\$8,607.13	Switzerland	\$236,365.14
Nigeria	\$9,269.22	Czech Republic	\$228,420.09
Bhutan	\$9,931.31	Cyprus	\$227,095.91

Impacto en los Mercados Energéticos y Costes de Regulación

La minería de criptomonedas afecta a los mercados energéticos locales al incrementar la demanda de electricidad, lo que puede derivar en alzas de precios e inestabilidad en la red, especialmente en áreas con tarifas eléctricas bajas que concentran operaciones mineras. En Estados Unidos, zonas como Texas y Nueva York han experimentado problemas de suministro y aumentos en los precios de la energía, lo cual ha impulsado a algunos estados a considerar restricciones y tasas adicionales para la minería. Además, varios gobiernos, incluyendo la Unión Europea con su Directiva de Información No Financiera (NFRD, 2014), están introduciendo regulaciones ambientales para fomentar la sostenibilidad en el sector, lo que incrementa los costes de cumplimiento, especialmente para operaciones dependientes de combustibles fósiles. Estas medidas pueden motivar a los mineros a adoptar modelos más sostenibles o a reubicarse en regiones con normativas más flexibles (Department of

² GlobalPetrolPrices.com. (2024). *Electricity Costs to Mine 1 Bitcoin at Home, Around the World*. Disponible en <https://nftevening.com/bitcoin-mining-cost/>

organization's financial, economic, logistical and medical support of the Academy of Management Russian Interior Ministry et al., 2020) (Finney, 2023).

Equilibrios Económicos y Atractivo para Inversores

Adoptar prácticas sostenibles, como la transición a PoS o el uso de energías renovables en la minería, conlleva una serie de compensaciones económicas. Aunque estas prácticas pueden reducir el impacto ambiental a largo plazo, suelen requerir inversiones iniciales elevadas y pueden disminuir la rentabilidad en el corto plazo. No obstante, el interés en prácticas sostenibles está en aumento entre los inversores que priorizan los criterios ESG (Environmental, Social, and Governance), lo cual podría beneficiar a las criptomonedas que adopten modelos de menor impacto ambiental, como Cardano (ADA) o Algorand (ALGO). Además, este tipo de innovaciones sostenibles también tienen el potencial de mejorar la eficiencia tecnológica (Alzoubi & Mishra, 2023). Las soluciones de Capa 2, el particionamiento y el "sharding" reducen la carga computacional en las redes blockchain principales, mejorando así su escalabilidad, disminuyendo los costes y reduciendo el consumo energético (Balpunuri, 2024). Estas soluciones también tienen aplicaciones prometedoras más allá de las criptomonedas, como en la gestión de cadenas de suministro, el sector de la salud y las finanzas descentralizadas (DeFi).

3. Innovaciones Tecnológicas en Criptomonedas para Mejorar la Sostenibilidad y Eficiencia

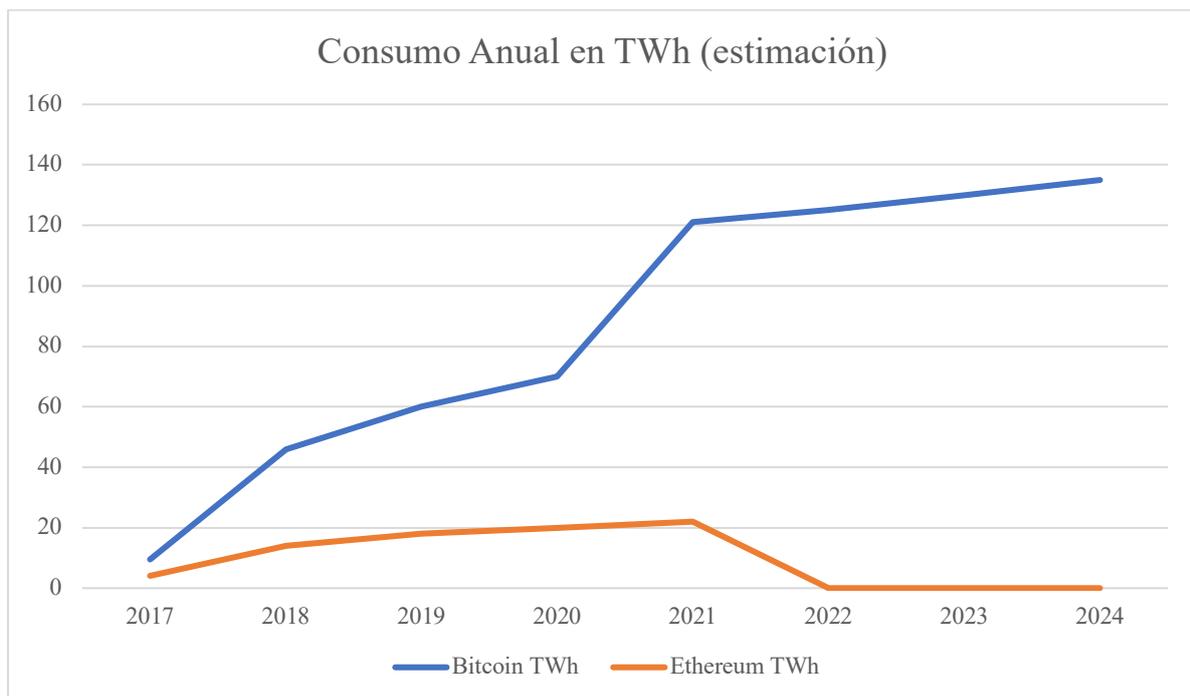
3.1 Desarrollo de Mecanismos de Consenso Energéticamente Eficientes

Una de las principales estrategias para mejorar la sostenibilidad de las criptomonedas es el desarrollo de mecanismos de consenso alternativos que reduzcan el consumo energético sin comprometer la seguridad. El alto requerimiento energético del mecanismo de consenso PoW ha llevado a la exploración de alternativas como la Prueba de Participación (Proof of Stake, PoS), la Prueba de Espacio (Proof of Space, PoSpace), la Prueba de Historia (Proof of History, PoH), y modelos híbridos (N. Birje et al., 2023).

Prueba de Participación (PoS) y Prueba de Participación Delegada (DPoS)

PoS es un mecanismo de consenso alternativo ampliamente utilizado. En PoS, una serie de validadores son seleccionados en base a la cantidad de criptomoneda que "ponen en juego" o "hacen staking", como garantía de buena conducta a la hora de validar transacciones y proponer o crear nuevos bloques, lo que significa que esos fondos están en riesgo si actúan de forma deshonesto o intentan manipular la red. A cambio de este compromiso, los validadores seleccionados reciben una recompensa en la misma criptomoneda. Así, en lugar de competir en consumo energético como en PoW, los validadores en PoS son seleccionados en función de la cantidad de criptomoneda que tienen en juego, reduciendo drásticamente el consumo energético. En septiembre de 2022, Ethereum, una de las principales criptomonedas, completó su transición de PoW a PoS en un evento conocido como "The Merge". Esta transición resultó en una reducción del 99% en el consumo energético de la red (Buterin, 2013; Vangoor et al., 2020).

Figura X³



El **Delegated Proof of Stake (DPoS)** es una variante del PoS que introduce un sistema de votación en el que los usuarios delegan su poder de decisión a validadores seleccionados. Esto permite reducir el número de validadores activos a un grupo limitado, mejorando la

³ Digiconomist. "Bitcoin Energy Consumption Index" y "Ethereum Energy Consumption Index". Disponible en: <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

escalabilidad y la velocidad de las transacciones en la red. Ejemplos destacados de su implementación incluyen Tron (TRX) y EOS. Sin embargo, este modelo enfrenta críticas por el riesgo de concentración del poder, ya que los validadores con mayores recursos o apoyo podrían ejercer un control significativo sobre la red. Esto ha llevado a problemas de centralización, como se observó en EOS, donde un número reducido de validadores controla gran parte de la red (Sedlmeir et al., 2020; Vangoor et al., 2020).

Prueba de Historia (PoH)

La Prueba de Historia, utilizada por Solana, es una innovación dentro del modelo de Prueba de Participación (PoS) que mejora la eficiencia y escalabilidad de la red al introducir un sistema de registro temporal. PoH utiliza un mecanismo criptográfico que genera un historial verificable y cronológicamente ordenado de las transacciones. Este enfoque reduce la carga computacional necesaria para organizar y validar bloques, aumentando la cantidad de transacciones por segundo y reduciendo significativamente el consumo energético por transacción (Yakovenko, 2018).

La implementación de PoH ha permitido a redes como Solana alcanzar tasas de transacción superiores a 50,000 TPS (transacciones por segundo), lo que la posiciona como una solución atractiva para aplicaciones en finanzas descentralizadas (DeFi) y mercados de tokens no fungibles (NFTs). Sin embargo, su dependencia de hardware especializado, como unidades de procesamiento de alta capacidad, podría limitar la participación de validadores individuales, planteando desafíos en términos de accesibilidad y descentralización. Además, el modelo aún requiere refinamientos para evitar problemas de "carteles" o alianzas entre validadores que puedan comprometer la integridad de la red (Vangoor et al., 2020; Yakovenko, 2018).

Prueba de Espacio (PoSpace)

Utilizada en criptomonedas como Chia (XCH), PoSpace emplea el espacio de almacenamiento no utilizado en lugar de la potencia computacional para la validación de bloques. En este modelo, los usuarios "alquilan" espacio en sus discos duros, y la red selecciona validadores en función de la cantidad de almacenamiento disponible, lo cual reduce significativamente el consumo de energía en comparación con PoW. Sin embargo, este modelo plantea preocupaciones sobre el aumento de residuos electrónicos, ya que el uso intensivo de discos duros acorta su vida útil (Vangoor et al., 2020).

Modelos Híbridos de Consenso

Los modelos híbridos de consenso combinan mecanismos como PoW y PoS para aprovechar sus respectivas fortalezas. Por ejemplo, Kadena (KDA) utiliza PoW para asegurar la red mientras implementa PoS para la validación posterior de bloques, optimizando tanto la seguridad como la eficiencia energética. Este enfoque permite a las redes adaptarse a las condiciones locales, como la disponibilidad de energía y los costes operativos. Otro caso notable es Decred (DCR), que utiliza PoW para generar bloques y PoS para votaciones en la gobernanza de la red, mejorando la participación de los usuarios en las decisiones estratégicas (Sedlmeir et al., 2020). Aunque prometedores, estos modelos híbridos aún enfrentan desafíos, como la complejidad de su implementación y la necesidad de equilibrar adecuadamente las contribuciones de cada mecanismo.

Figura X

Criptomoneda	Protocolo	Tiempo de Transacción Promedio	Coste por Transacción Promedio
Bitcoin ⁴	PoW	~ 10 minutos	~ \$1 - \$2
Ethereum ⁵	PoS	~ 12 segundos	~ \$0.10 - \$5
Tron ⁶	DPoS	~ 3 segundos	~ \$0.01
Solana ⁷	PoH - PoS	~ 1 segundo	~ \$0.00025
Chia ⁸	PoSpace	~ 5 minutos	~ \$0.01
Kadena ⁹	Modelo Híbrido	~ 10 segundos	~ \$0.001

Otros Modelos Emergentes

Además de los modelos anteriores, han surgido alternativas como:

- **Prueba de Autoridad (Proof of Authority, PoA):** Utilizado en redes privadas como VeChain, PoA asigna validadores confiables preseleccionados, lo que reduce el consumo

⁴ Bitcoin.org. "Introduction to Bitcoin". Disponible en: <https://bitcoin.org/en/>

⁵ Ethereum.org. "Ethereum Documentation". Disponible en: <https://ethereum.org/en/developers/docs/>

⁶ TRON Documentation. "TRON Network Overview". Disponible en: <https://tron.network>

⁷ Solana Documentation. "Performance Overview". Disponible en: <https://docs.solana.com>

⁸ Chia Network. "Energy Consumption in Proof of Space". Disponible en: <https://www.chia.net>

⁹ Kadena Documentation. "Kadena Overview and Technical Details". Disponible en: <https://kadena.io>

energético al eliminar la competencia entre nodos, aunque a costa de la descentralización (Balpunuri, 2024).

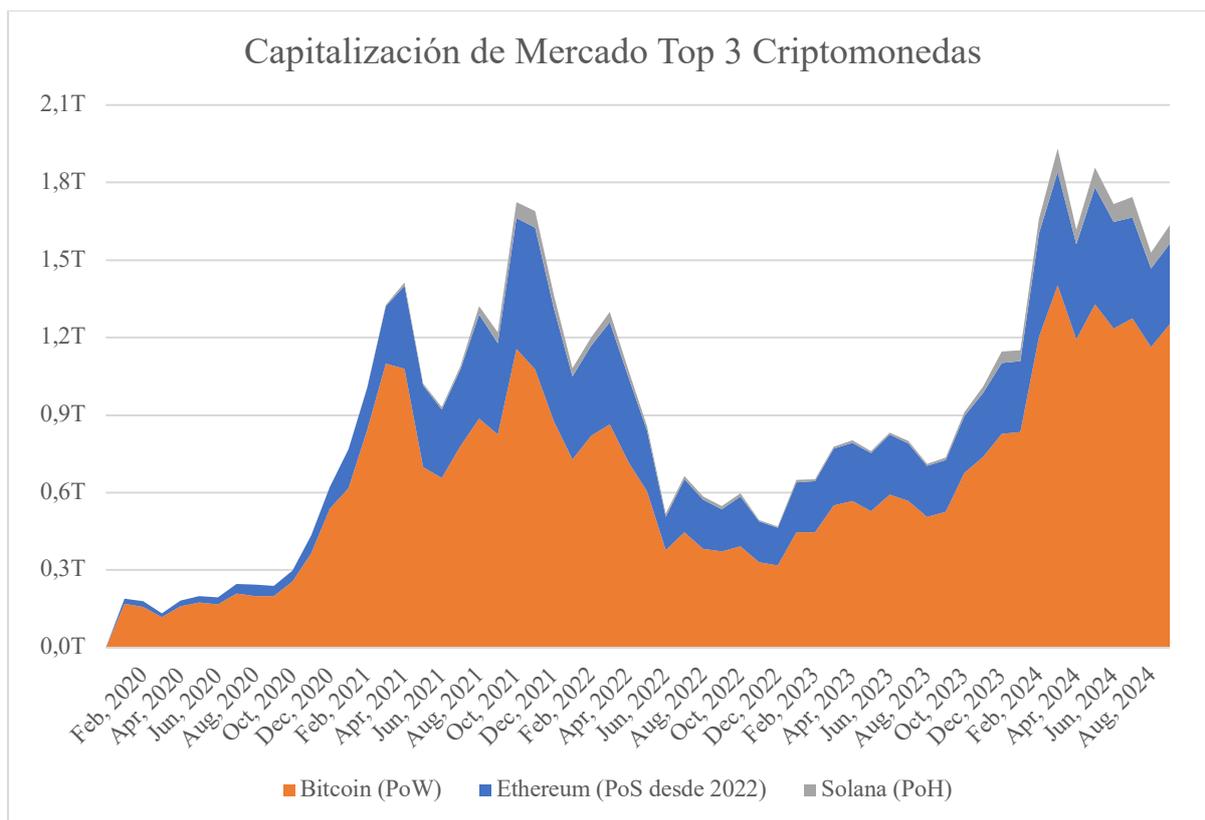
- **Prueba de Capacidad (Proof of Capacity, PoC):** Similar a PoSpace, pero optimizada para minimizar el desgaste de hardware al escribir datos en bucles continuos (Vangoor et al., 2020).
- **Prueba de Quema (Proof of Burn, PoB):** Requiere que los usuarios "quemem" (destruyan) una cantidad de criptomonedas como prueba de compromiso, logrando eficiencia energética pero con un coste económico significativo para los participantes (N. Birje et al., 2023).
- **La Prueba de Tiempo Transcurrido (Proof of Elapsed Time, PoET):** Es otro modelo emergente diseñado para maximizar la eficiencia energética. Utilizado principalmente en blockchains empresariales, PoET emplea entornos de ejecución confiables (TEE) para garantizar la aleatoriedad y la equidad en la selección de validadores. Este mecanismo elimina la necesidad de cálculos intensivos en energía y es particularmente útil en aplicaciones que requieren confianza entre participantes conocidos, como cadenas de suministro y redes industriales (Vangoor et al., 2020).

Visualización Capitalización de Mercado

El siguiente gráfico muestra la capitalización de mercado de las criptomonedas asociadas a tres de las principales blockchains: Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH) y Solana (SOL). En diciembre de 2024, la capitalización total del mercado de criptomonedas se aproximaba a los \$3T, con estas criptomonedas representando cerca del 60%. Cada una de ellas utiliza un protocolo de consenso diferente, lo que permite analizar la relevancia y evolución de cada modelo los últimos cuatro años.

Figura 4¹⁰

¹⁰ Coinmarketcap.com (2024). Disponible en <https://coinmarketcap.com/>



En el gráfico, observamos que Bitcoin sigue liderando en capitalización de mercado, reflejando su posición consolidada como reserva de valor digital. Ethereum, por su parte, muestra un crecimiento sostenido desde su transición a PoS en 2022, lo cual sugiere una respuesta favorable del mercado hacia este protocolo más sostenible. Finalmente, Solana, aunque con una capitalización de mercado más baja, presenta un crecimiento gradual, destacando el interés de los inversores en su enfoque innovador de PoH como alternativa eficiente y sostenible.

3.2 Adopción de Energías Renovables en la Minería

Otra estrategia clave para mejorar la sostenibilidad de las criptomonedas es la adopción de energías renovables en las operaciones de minería, especialmente en aquellas que utilizan mecanismos PoW. Las fuentes de energía renovable, como la eólica, solar, hidroeléctrica y geotérmica, ofrecen alternativas con baja emisión de carbono en comparación con los combustibles fósiles. Además, su integración en la minería puede no solo reducir la huella ambiental, sino también proporcionar estabilidad a las redes eléctricas mediante la monetización de excedentes energéticos y la adopción de modelos de respuesta a la demanda (Rudd & Porter, 2024; Tomatsu & Han, 2023).

Casos de Minería Alimentada por Energías Renovables

- **Islandia – Energía Geotérmica e Hidroeléctrica:** Islandia es un referente mundial en minería sostenible gracias a sus abundantes recursos de energía renovable. Empresas como Genesis Mining se benefician de una infraestructura energética basada en energía geotérmica e hidroeléctrica. El uso de estas fuentes no solo minimiza el impacto ambiental, sino que también asegura costes energéticos estables y predecibles, una ventaja en la volátil economía de la minería. Además, el clima frío reduce la necesidad de sistemas de refrigeración adicionales, optimizando el consumo energético y mejorando la eficiencia operativa (Gasiorowska et al., 2023).
- **Texas – Minería Eólica:** Texas se ha posicionado como un centro emergente de minería sostenible gracias a su capacidad para integrar proyectos eólicos. Empresas como Mara Holdings utilizan la flexibilidad de la minería para ajustar sus operaciones en función de la disponibilidad de energía y las necesidades de la red eléctrica. Durante picos de demanda, las actividades mineras se reducen o detienen temporalmente, ayudando a estabilizar el sistema energético mientras monetizan la energía excedente en periodos de baja demanda (Rudd & Porter, 2024; Stoll et al., 2023).
- **Quebec – Energía Hidroeléctrica:** Quebec se ha consolidado como un centro atractivo para la minería de criptomonedas debido a su abundante suministro de energía hidroeléctrica y su clima frío, que reduce la necesidad de sistemas de refrigeración adicionales. Sin embargo, estudios como el encargado por Hydro-Québec a la firma KPMG revelan que, a menos que se asocie con actividades adicionales, la minería de criptomonedas no genera un número significativo de empleos, lo que ha llevado a debates sobre su impacto económico y social en la región (Rosales et al., 2024).
- **Noruega y Suecia – Energía renovable diversificada:** Los países nórdicos, especialmente Noruega y Suecia, se han convertido en destinos atractivos para la minería de criptomonedas debido a su excedente de energía renovable, principalmente hidroeléctrica, y ocasionales precios negativos de la energía. Esta disponibilidad energética, combinada con un clima frío que reduce los costes de refrigeración, ha permitido que empresas como Genesis Digital Assets establezcan centros de datos en estas regiones, aprovechando el excedente de energía renovable disponible (Rudd & Porter, 2024; Tomatsu & Han, 2023).
- **El Salvador – Energía Geotérmica Volcánica:** El Salvador ha adoptado un enfoque innovador al utilizar energía geotérmica proveniente de sus volcanes para la minería de Bitcoin. Desde 2021, el país ha minado un total de 474 Bitcoin, valorados en

aproximadamente 29 millones de dólares, utilizando energía geotérmica del volcán Tecapa. Esta iniciativa posiciona a El Salvador como un referente en la integración de tecnologías emergentes con recursos naturales sostenibles (Gaikwad & Mavale, 2021).

- **Australia – Minería Solar:** En Australia, los proyectos de minería alimentados por energía solar abordan los desafíos de la capacidad limitada de la red eléctrica y monetizan el excedente energético generado por parques solares. Este modelo no solo aumenta la viabilidad económica de las iniciativas solares, sino que también fomenta inversiones sostenibles en infraestructuras renovables. En regiones aisladas, este enfoque ha demostrado ser una herramienta eficaz para equilibrar la generación intermitente de energía renovable y promover la estabilidad del sistema eléctrico (Rudd & Porter, 2024).
- **China – Reubicación hacia Renovables en Yunnan y Sichuan:** Antes de las prohibiciones gubernamentales, las provincias chinas de Yunnan y Sichuan eran epicentros de la minería de criptomonedas, aprovechando su abundante energía hidroeléctrica para alimentar las operaciones mineras. Sin embargo, las autoridades chinas han intensificado las medidas enérgicas contra la industria criptográfica local, emitiendo advertencias a las plantas hidroeléctricas para que no proporcionen suministro de energía a empresas dedicadas a la minería de criptomonedas (Xiao et al., 2023).
- **Kazajistán – Transición hacia Renovables:** Tras las restricciones impuestas por China a la minería de criptomonedas, Kazajistán ha emergido como uno de los principales destinos para esta actividad, contribuyendo significativamente al poder de procesamiento global de Bitcoin. Sin embargo, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) destaca la fuerte dependencia de Kazajistán de las energías no renovables, como el petróleo, el carbón y el gas natural, lo que plantea desafíos ambientales significativos para la sostenibilidad de la minería en el país (Estecahandy, 2024).

Nuevas Sinergias entre Minería y Energías Renovables

Bitcoin y otras criptomonedas con alta demanda energética pueden actuar como consumidores adaptables en sistemas de energía renovable. Los estudios muestran que los mineros pueden aprovechar la energía excedente durante periodos de alta generación y baja demanda, evitando la curtailment (desperdicio de energía renovable) y promoviendo el desarrollo de nuevas infraestructuras de energía limpia (Rudd & Porter, 2024). Proyectos como los de Aspen Creek Digital Corporation en EE.UU., donde instalaciones mineras están conectadas directamente a

parques solares, representan ejemplos de cómo estas sinergias pueden fomentar la expansión de infraestructura renovable.

Desafíos Persistentes en la Minería Renovable

A pesar de los avances, persisten retos significativos en la adopción de energías renovables para la minería. La intermitencia de fuentes como la eólica y solar sigue siendo un obstáculo, especialmente en regiones donde la infraestructura de almacenamiento energético es insuficiente. Además, la dependencia de localizaciones específicas limita la viabilidad de proyectos renovables a gran escala en zonas con alta concentración de operaciones mineras, subrayando la necesidad de diversificar las fuentes de energía y mejorar la eficiencia de las redes eléctricas (Rudd & Porter, 2024; Tomatsu & Han, 2023).

3.3 Soluciones de Escalabilidad en Blockchain

La escalabilidad es uno de los desafíos más importantes en las redes blockchain, especialmente a medida que su adopción y uso aumentan exponencialmente. Mejorar la escalabilidad no solo es crucial para manejar un mayor volumen de transacciones, sino también para reducir el consumo energético, disminuir los costes de transacción y aumentar la eficiencia general de las redes. Además, una escalabilidad mejorada puede contribuir significativamente a la sostenibilidad, permitiendo que las economías basadas en blockchain crezcan sin un aumento proporcional de su impacto ambiental.

Para abordar estos retos, se han desarrollado diversas estrategias, como las tecnologías de Capa 2 y el particionamiento "sharding". Estas soluciones permiten que las redes blockchain manejen un volumen mayor de transacciones mientras mantienen su seguridad, transparencia y descentralización, pilares fundamentales de esta tecnología.

Capa 1 y Soluciones de Escalabilidad en Blockchain: Introducción a la Capa 2

En el ámbito de las tecnologías blockchain, la Capa 1 se refiere a la arquitectura base de una red. Es la blockchain principal donde se procesan y validan todas las transacciones de manera directa. Esta capa es responsable de garantizar la seguridad, descentralización y transparencia

de la red, características que la convierten en la base de cualquier sistema blockchain (Song et al., 2024).

Sin embargo, a medida que el uso de estas redes crece, se han evidenciado limitaciones significativas en su diseño inicial. Uno de los principales problemas es la congestión de la red. Cuando el número de transacciones supera la capacidad de los bloques, el rendimiento se deteriora notablemente, generando retrasos, formación de colas y un aumento en las tarifas de transacción. Esto ocurre porque los usuarios compiten por el espacio limitado dentro de los bloques, lo que lleva a una escalada en los costes operativos (Song et al., 2024).

Además, el alto consumo energético asociado con mecanismos de consenso como Proof of Work (PoW) plantea serios desafíos en términos de sostenibilidad ambiental. Este modelo de consenso, utilizado en redes como Bitcoin y Ethereum 1.0, requiere una gran cantidad de recursos computacionales para validar transacciones, lo que ha suscitado críticas por su impacto ambiental (Song et al., 2024).

Para superar estas limitaciones, se han desarrollado las soluciones de Capa 2. Estas tecnologías operan como una extensión de la blockchain principal, procesando transacciones fuera de la cadena principal y registrando solo los resultados finales en la Capa 1. Al reducir la carga de trabajo de la red principal, las soluciones de Capa 2 no solo mejoran la escalabilidad, sino que también disminuyen el consumo energético y los costes de transacción (Song et al., 2024).

Ejemplos destacados de soluciones de capa 2

- **Lightning Network (Bitcoin):** es una solución de escalabilidad diseñada específicamente para Bitcoin. Este protocolo permite a los usuarios establecer canales de pago fuera de la blockchain principal, donde las transacciones se procesan de manera casi instantánea y a un coste mínimo. Solo los estados iniciales y finales de estos canales se registran en la red principal, reduciendo significativamente la congestión en la Capa 1 (Vangoor et al., 2020).

Esta tecnología resulta especialmente útil para micropagos y ha mostrado un crecimiento constante. Según datos recientes, la capacidad total de Lightning Network ha superado los 5,000 BTC, lo que refleja su creciente adopción y viabilidad como herramienta de escalabilidad (Memepool, 2025).

- **Rollups (Ethereum):** Los rollups son una solución de Capa 2 implementada en Ethereum que agrupa múltiples transacciones y las procesa fuera de la blockchain principal. Posteriormente, un resumen de estas transacciones se registra en la Capa 1 utilizando mecanismos de prueba de validez (en los zk-rollups) o de fraude (en los optimistic rollups). (Christ et al., 2024)

Esta tecnología ha sido especialmente relevante para aplicaciones con altos volúmenes de transacciones, como las finanzas descentralizadas (DeFi). Según datos de L2BEAT, en 2024, más del 50% de las transacciones en Ethereum se procesaron a través de soluciones de Capa 2, destacando la efectividad de los rollups en mejorar la escalabilidad (L2BEAT, 2025).

Particionamiento

El particionamiento es una técnica utilizada en bases de datos que divide la información en fragmentos más pequeños, llamados particiones, que pueden gestionarse de manera independiente. En el contexto de blockchain, el particionamiento permite distribuir la carga de trabajo entre los nodos, mejorando el rendimiento y facilitando la gestión de grandes volúmenes de datos (Fynn & Pedone, 2018).

Sharding

El sharding es una forma especializada de particionamiento implementada en redes blockchain como Ethereum 2.0. Esta técnica divide la blockchain en fragmentos más pequeños llamados "shards", donde cada fragmento procesa sus propias transacciones y almacena datos específicos. Los shards operan de manera semi-independiente, pero están conectados a la cadena principal mediante mecanismos de sincronización que aseguran la coherencia y seguridad de toda la red (Fynn & Pedone, 2018; Tian et al., 2024).

El principal beneficio del sharding es la capacidad de procesar transacciones en paralelo, lo que incrementa significativamente el rendimiento. Por ejemplo, Ethereum 2.0 planea implementar sharding para alcanzar hasta 100,000 transacciones por segundo (TPS), un aumento exponencial en comparación con las 30 TPS de Ethereum 1.0. Esta mejora no solo permitirá soportar un mayor volumen de transacciones, sino que también reducirá los costes de transacción y el consumo de recursos (Fynn & Pedone, 2018; Tian et al., 2024).

Desafíos del sharding

A pesar de sus beneficios, el sharding también presenta desafíos importantes. La comunicación entre shards es crucial para mantener la coherencia de la red. Una implementación inadecuada puede dar lugar a vulnerabilidades que comprometan la seguridad del sistema. Además, dividir la blockchain en múltiples shards introduce una mayor complejidad técnica y exige inversiones significativas en infraestructura. Esto puede ser inasequible para proyectos más pequeños con recursos limitados (Fynn & Pedone, 2018).

Desafíos y Perspectivas de las Soluciones de Escalabilidad

Las soluciones de escalabilidad como las tecnologías de Capa 2 y el sharding representan avances significativos en la evolución de las redes blockchain. Sin embargo, su implementación y adopción no están exentas de desafíos.

La integración de soluciones como los rollups o Lightning Network requiere un alto grado de especialización técnica por parte de los desarrolladores. Esto no solo incrementa el coste inicial de adopción, sino que también puede dificultar la usabilidad para los usuarios finales. Interfaces más complejas y nuevos procesos de interacción pueden limitar la aceptación masiva de estas tecnologías (Fynn & Pedone, 2018).

Aunque estas soluciones mejoran la escalabilidad, en algunos casos pueden comprometer la descentralización o la seguridad. Por ejemplo, el uso de cadenas laterales y canales de pago puede depender de operadores centralizados o semidescentralizados, lo que podría socavar uno de los principios fundamentales de las redes blockchain (Tian et al., 2024).

Si bien soluciones como los rollups y el sharding prometen reducir el consumo energético en redes como Ethereum, su impacto ambiental general dependerá de una transición efectiva a mecanismos de consenso más sostenibles, como Proof of Stake (PoS). Esto subraya la necesidad de adoptar enfoques holísticos que combinen tecnologías de escalabilidad con mejoras en la eficiencia energética (Fynn & Pedone, 2018).

Perspectivas futuras

El éxito de las soluciones de escalabilidad dependerá en gran medida de la colaboración entre diferentes actores del ecosistema blockchain, incluidos desarrolladores, investigadores,

reguladores y usuarios finales. Además, la innovación continua será crucial para abordar problemas emergentes y garantizar que las redes blockchain puedan escalar de manera sostenible y eficiente.

En términos de sostenibilidad, estas tecnologías ofrecen una oportunidad para reducir significativamente el impacto ambiental de las redes blockchain. Sin embargo, su implementación debe ir acompañada de políticas que promuevan la eficiencia energética y la transparencia en el desarrollo.

4. Blockchain como Facilitador de la Sostenibilidad en Otros Sectores

4.1 Cadenas de Suministro

4.2 Salud

4.3 Finanzas

5. Panorama Regulatorio e Implicaciones Políticas

6. Conclusiones

7. Bibliografía

Alzoubi, Y. I., & Mishra, A. (2023). Green blockchain – A move towards sustainability.

Journal of Cleaner Production, 430, 139541.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139541>

Balpunuri, V. V. (2024). Sustainable Blockchain: A New Horizon for Energy-Efficient

Consensus Mechanisms. *International Journal for Research in Applied Science and*

<https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.62895>

Buterin, V. (2013). *A NEXT GENERATION SMART CONTRACT & DECENTRALIZED APPLICATION PLATFORM*.

Christ, M., Baldimtsi, F., Chalkias, K. K., Maram, D., Roy, A., & Wang, J. (2024). SoK: Zero-Knowledge Range Proofs [Application/pdf]. *LIPICs, Volume 316, AFT 2024, 316*, 14:1-14:25. <https://doi.org/10.4230/LIPICS.AFT.2024.14>

Department of organization's financial, economic, logistical and medical support of the Academy of Management Russian Interior Ministry, Samolysov, P., Academy of Informatization of Education, & Association of Russia's Lawyers. (2020). LEGAL REGULATION OF CRYPTOCURRENCY MINING. *Law and digital economy*, 13-20. <https://doi.org/10.17803/2618-8198-2020-09-3-013-020>

Estecahandy, H. (2024). Geopolitics of cryptocurrency mining in Kazakhstan. *Central Asian Survey*, 43(3), 327-345. <https://doi.org/10.1080/02634937.2024.2324192>

Finney, B. R. (2023). *WIN-WIN ENVIRONMENTAL REGULATIONS FOR CRYPTO MINING: DEVELOPING A REGULATORY PROGRAM THAT REDUCES ENVIRONMENTAL HARM AND PROMOTES INNOVATION AND COMPETITION*.

Fynn, E., & Pedone, F. (2018). Challenges and Pitfalls of Partitioning Blockchains. *2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W)*, 128-133. <https://doi.org/10.1109/DSN-W.2018.00051>

Gaikwad, A., & Mavale, S. (2021). The Impact of Cryptocurrency Adoption as a Legal Tender in El Salvador. *International Journal of Engineering and Management Research*, 11(6). <https://doi.org/10.31033/ijemr.11.6.16>

- Gasiorowska, A., Folwarczny, M., Sturluson, J. P., & Demir, E. (2023). *Crypto Quest: Unveiling the Gender Gap in Iceland's Cryptocurrency Ownership and Investment*. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/fgdvk>
- Ghosh, E., & Das, B. (2020). A Study on the Issue of Blockchain's Energy Consumption. In M. Chakraborty, S. Chakrabarti, & V. E. Balas (Eds.), *Proceedings of International Ethical Hacking Conference 2019* (Vol. 1065, pp. 63-75). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0361-0_5
- Küfeoğlu, S., & Ozkuran, M. A. (2019). *Energy Consumption of Bitcoin Mining*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11659.54564>
- N. Birje, M., R H, G., C. M, R., & T. Tapale, M. (2023). Blockchain Technology Review: Consensus Mechanisms and Applications. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 71(5), 27-39. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V71I5P204>
- Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*.
- Rosales, A., Millar, H., & Richardson, A. (2024). Leveraging intra-provincial regulatory differences in a post-Paris context: Cryptocurrency mining “reverse battery” strategy in Atlantic Canada. *The Extractive Industries and Society*, 17, 101396. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101396>
- Rudd, M., & Porter, D. (2024). *Economic integration of Bitcoin mining in renewable energy and grid management*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4899244>
- Sarkodie, S. A., Amani, M. A., Ahmed, M. Y., & Owusu, P. A. (2023). Assessment of Bitcoin carbon footprint. *Sustainable Horizons*, 7, 100060. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2023.100060>
- Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), 599-608. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>

- Song, H., Qu, Z., & Wei, Y. (2024). *Advancing Blockchain Scalability: An Introduction to Layer 1 and Layer 2 Solutions* (No. arXiv:2406.13855). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.13855>
- Stoll, C., Klaaßen, L., Gallersdörfer, U., & Neumüller, A. (2023). *Climate Impacts of Bitcoin Mining in the U.S.*
- Tian, J., Jing, C., Tian, J., & Li, Y. (2024). PartChain: Scaling blockchain through account-based partitioned sharding. *Computer Networks*, 254, 110773. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110773>
- Tomatsu, Y., & Han, W. (2023). Bitcoin and Renewable Energy Mining: A Survey. *Blockchains*, 1(2), 90-110. <https://doi.org/10.3390/blockchains1020007>
- Truby, J., Brown, R. D., Dahdal, A., & Ibrahim, I. (2022). Blockchain, climate damage, and death: Policy interventions to reduce the carbon emissions, mortality, and net-zero implications of non-fungible tokens and Bitcoin. *Energy Research & Social Science*, 88, 102499. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102499>
- Vangoor, V. K. R., Ravi, C. S., & Developer, M. (2020). *Energy-Efficient Consensus Mechanisms for Sustainable Blockchain Networks*. 1(1).
- Xiao, Z., Cui, S., Xiang, L., Liu, P. J., & Zhang, H. (2023). The environmental cost of cryptocurrency: Assessing carbon emissions from bitcoin mining in China. *Journal of Digital Economy*, 2, 119-136. <https://doi.org/10.1016/j.jdec.2023.11.001>
- Yakovenko, A. (2018). *Solana: A new architecture for a high performance blockchain*.
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. *2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*, 557-564. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2017.85>