



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

**ATRIBUTOS DESEABLES PARA IMPLEMENTAR  
LA TECNOLOGÍA DE *BLOCKCHAIN* PARA  
TRAZABILIDAD DE ATRIBUTOS AMBIENTALES  
EN PROCESOS MINEROS**

HÉCTOR ANDRÉS ARAYA CORREA

PROFESOR GUÍA: MAURICIO HERRERA, Ph.D

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD

SANTIAGO – CHILE

2024



ATRIBUTOS DESEABLES PARA IMPLEMENTAR  
LA TECNOLOGÍA DE *BLOCKCHAIN* PARA  
TRAZABILIDAD DE ATRIBUTOS AMBIENTALES  
EN PROCESOS MINEROS

POR: HÉCTOR ANDRÉS ARAYA CORREA

Proyecto de Grado presentado a la Comisión integrada por los profesores:

**PROFESORES GUIA:** Mauricio Herrera Ph.D

**PROFESOR INTEGRANTE 1:** Alex Godoy-Faúndez, Ph.D

**PROFESOR INTEGRANTE 1:** Felipe Mora, Ph.D

Para completar las exigencias del Grado de Magister en Gestión de la Sustentabilidad

Diciembre, 2024  
Santiago, Chile

## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD**

Por medio de la presente, declaro que el trabajo titulado: **ATRIBUTOS DESEABLES PARA IMPLEMENTAR LA TECNOLOGÍA DE *BLOCKCHAIN* PARA TRAZABILIDAD DE ATRIBUTOS AMBIENTALES EN PROCESOS MINEROS**, que presento a la Universidad del Desarrollo de Chile, es de mi autoría (o co-autoría) y no ha sido publicado previamente, ni está siendo considerado para publicación bajo otra filiación. En igual sentido, declaro que el trabajo de tesis y su contenido, son originales y que todos los datos y referencias a trabajos ya publicados con anterioridad han sido debidamente identificados, referenciados o citados en el documento, y que estas citas han sido incluidas en las referencias bibliográficas. Afirmando, asimismo, que los materiales presentados no se encuentran protegidos por derechos de autor; y en caso de que así lo estuvieran, me hago responsable de cualquier litigio o reclamo relacionado con la violación de derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad a la Universidad del Desarrollo de Chile.

Finalmente, me comprometo a no someter este trabajo (o parte de este), a consideración en ninguna revista o congreso para publicación sin contar con la aprobación y haber pasado el debido proceso de revisión en Universidad del Desarrollo. En caso de que un artículo sea aprobado para su publicación, autorizo a la Universidad del Desarrollo a incluir dicho artículo en sus revistas, y a reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero, por medios impresos, electrónicos, Internet o cualquier otro medio, para propósitos científicos y sin fines de lucro.

HÉCTOR ANDRÉS ARAYA CORREA

Firma

HÉCTOR ANDRÉS ARAYA CORREA

Firma

*A mi esposa, una fuente de inspiración constante, quien ha sido mi mayor apoyo en cada paso en este proceso. Gracias por tu paciencia, comprensión y por creer en mí, incluso en los momentos más difíciles.*

*A mis padres, por su amor y confianza, y por brindarme siempre el respaldo necesario para alcanzar mis metas.*

*A mi hermana, por su apoyo incondicional y por ser una fuente de alegría y fuerza en mi vida.*

*A mis amigos de mi ex trabajo, quienes no solo fueron colegas, sino también una familia que me entregó la motivación necesaria para lograr el objetivo. Gracias por acompañarme en esta etapa y por todas las experiencias compartidas.*

*Gracias a todos*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis profesores, Diego, Manuel y Alex, les agradezco profundamente por su guía y paciencia. Sus enseñanzas han sido esenciales, no solo para el desarrollo de este trabajo, sino también para mi crecimiento profesional y personal.

A mis compañeros de curso, Lore y Javi, gracias por su amistad y por ser siempre una fuente de motivación. Su gran compañía en este magister hizo que cada desafío fuera más entretenido.

A mis amigos Héctor y Ale, con quienes he compartido momentos clave en mi carrera. Gracias por su apoyo constante y por ser un ejemplo de profesionalismo y por ser un gran partner.

# Atributos deseables para implementar la tecnología de *blockchain* para trazabilidad de atributos ambientales

Héctor Andrés Araya Correa

Bajo la supervisión del Profesor Mauricio Herrera Ph.D, en la Universidad del Desarrollo de Chile

## *Resumen*

Esta investigación identifica atributos deseables de para implementar *blockchain* en la trazabilidad de atributos ambientales en procesos mineros. Mediante una metodología mixta, integrando métodos cuantitativos y cualitativos, se analizaron fuentes primarias, casos de estudio como “MineHub” y la mina “El Peñasquito”, y se realizaron entrevistas semiestructuradas. Se identificaron atributos ambientales clave trazables con *blockchain*, incluyendo emisiones de GEI y gestión de recursos hídricos. Los resultados indican que *blockchain* puede mejorar la transparencia y eficiencia en la cadena de suministro minera, pero requiere un enfoque holístico que integre aspectos técnicos, éticos y socioambientales. La hoja de ruta propuesta ofrece un marco para la implementación de *blockchain* en minería, promoviendo sostenibilidad y equidad en operaciones extractivas.

Palabras clave: Trazabilidad, Atributos Ambientales, Sostenibilidad, *Blockchain*.

## HIGHLIGHTS

# Atributos deseables de para implementar la tecnología de *blockchain* para trazabilidad de atributos ambientales

Héctor Andrés Araya Correa

- Se propone una hoja de ruta para la implementación de la tecnología *blockchain* que permita la trazabilidad de los principales atributos ambientales en el sector minero.
- El estudio utiliza un diseño de investigación mixto no experimental, de alcance exploratorio-descriptivo.
- *Blockchain* tiene el potencial de mejorar la trazabilidad ambiental en minería, pero su implementación requiere un enfoque integral que considere aspectos técnicos, éticos y socioecológicos, como la gobernanza participativa y la evaluación de impactos socioambientales.
- El caso de El Peñasquito evidencia que la tecnología no resuelve problemas estructurales; se necesita integrar *blockchain* con prácticas sostenibles y compromiso con la justicia social para lograr una minería más equitativa y responsable.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1	¿QUÉ MUESTRA EL DEBATE ACTUAL EN RELACIÓN CON LA TECNOLOGÍA <i>BLOCKCHAIN</i> Y LA MINERÍA?15	
1.2	BREVE DISCUSIÓN DE LA LITERATURA.....	17
1.3	CONTRIBUCIÓN DEL TRABAJO Y OBJETIVOS .....	19
1.4	METODOLOGÍA.....	20
1.4.1	<i>Diseño Muestral</i> .....	20
<b>2</b>	<b>ASPECTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>24</b>
2.1	<i>BLOCKCHAIN</i> Y CUESTIONES AMBIENTALES .....	24
2.2	ATRIBUTOS AMBIENTALES EN LA MINERÍA .....	27
2.3	<i>BLOCKCHAIN</i> DESDE LA PERSPECTIVA SOCIAL.....	31
2.4	EL <i>BLOCKCHAIN</i> EN OTROS EJEMPLOS DE CARÁCTER AMBIENTAL.....	37
2.4.2	<i>La propuesta hegemónica para salvar al clima con blockchain</i> .....	37
2.4.3	<i>Una visión crítica sobre la relación medio ambiente y la acción climática.</i> .....	40
2.5	CATEGORIZACION DE ATRIBUTOS CLAVES.....	45
2.6	ATRIBUTOS DESEABLES DE <i>BLOCKCHAIN</i> PARA CONSIDERAR ATRIBUTOS AMBIENTALES .....	47
<b>3</b>	<b>ARTÍCULO .....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>66</b>
4.1	POTENCIAL Y ADOPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA <i>BLOCKCHAIN</i> . .....	66
4.2	APLICACIÓN EN PROCESOS MINEROS. ....	66
4.3	INTEGRACIÓN CON INICIATIVAS CLIMÁTICAS Y AMBIENTALES. ....	66
4.4	DESAFÍOS Y CONSIDERACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN. ....	67
4.5	ESTUDIO DE CASO: IMPLICACIONES SOCIOAMBIENTALES EN LA MINA EL PEÑASQUITO. ....	67
4.6	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	69
4.7	CONCLUSIÓN FINAL.....	69
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DISTRIBUCIÓN DE PARTICIPANTES POR SECTOR .....	21
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DEMOGRÁFICAS DE LOS PARTICIPANTES.....	22
TABLA 3. CUESTIONARIO Y CARACTERIZACIÓN .....	23

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. <i>FUNCIONAMIENTO DEL BLOCKCHAIN</i> .....	27
FIGURA 2. <i>CADENA DE PRODUCCIÓN MINERA CON ESLABONES IDENTIFICADOS</i> .....	30
FIGURA 3. <i>PARTICIPACIÓN DE MINEHUB Y SU PROPUESTA TECNOLÓGICA DE BLOCKCHAIN EN LA CADENA PRODUCTIVA DEL SECTOR MINERO</i> .....	31

## 1 INTRODUCCIÓN

La Internet ha permeado completamente el tejido social con sus drásticas y en muchos casos, revolucionarias propuestas de cambio, en particular en el sistema financiero. No obstante, en términos económicos 2.5 millones de la población está excluida del sistema financiero global (Tapscott & Tapscott, 2017).

La evolución de la tecnología financiera digital ha estado estrechamente ligada a los desafíos de privacidad y seguridad en las transacciones electrónicas. Chaum (1983) documentó los primeros esfuerzos significativos para abordar estos problemas mediante la aplicación de principios criptográficos a los sistemas de pago. Estos avances culminaron en la creación de eCash por Chaum et al. (1990), un sistema de pago digital pionero que ofrecía un alto grado de privacidad y eficiencia. A pesar de estos avances tecnológicos, las vulnerabilidades del sistema financiero tradicional se hicieron evidentes durante la crisis financiera global de 2008. Esta crisis puso de manifiesto la necesidad de sistemas financieros más transparentes y resistentes, lo que preparó el terreno para la introducción de tecnologías financieras más innovadoras. En respuesta a estas deficiencias sistémicas, Nakamoto (2008) propuso Bitcoin, una criptomoneda basada en la tecnología *blockchain* que prometía mayor transparencia, seguridad y descentralización en las transacciones financieras.

La innovación introducida por Nakamoto, aunque su identidad permanece desconocida, radica en la conceptualización de un sistema de pago electrónico descentralizado, comúnmente denominado *peer-to-peer* (P2P). Este sistema facilita transacciones directas entre participantes sin la necesidad de intermediarios financieros tradicionales (Nakamoto, 2008). La implementación de este concepto se materializó en Bitcoin, una moneda digital que opera sobre una infraestructura tecnológica conocida como *blockchain* o cadena de bloques.

Tapscott y Tapscott (2017) señalan que Bitcoin y su tecnología subyacente, *blockchain*, representan la aplicación más prominente y ampliamente reconocida de un sistema de registro distribuido en el ámbito financiero. Esta innovación ha catalizado un cambio paradigmático en la concepción de las transacciones financieras y la gestión de datos digitales.

La tecnología *blockchain* se define como una infraestructura digital que permite la creación y mantenimiento de registros descentralizados y confiables (Zheng et al., 2017). Esta tecnología innovadora introduce un paradigma no convencional en los sistemas económicos modernos, aspirando a establecer un modelo más equitativo, transparente e incorruptible debido a su naturaleza descentralizada (Tapscott & Tapscott, 2017). La integridad de la *blockchain* se basa en tres elementos fundamentales interconectados: (1) la información transaccional, (2) un identificador único para cada bloque (hash), y (3) referencias a los hashes de los bloques adyacentes, formando así una cadena cronológica y segura (Nakamoto, 2008). Esta estructura garantiza que cualquier alteración en la información de un bloque modifique su hash, haciendo virtualmente imposible la manipulación debido a la existencia de múltiples copias distribuidas de la cadena original, lo que confiere al sistema su característica de inmutabilidad (Zheng et al., 2017). La validación de la seguridad del sistema se realiza de manera continua por los propios usuarios que acceden y verifican la información. Algunos académicos conceptualizan este sistema como un "internet del valor" o "internet del dinero", enfatizando su potencial para revolucionar las transacciones económicas (Tapscott & Tapscott, 2017). La descentralización emerge como la característica más sobresaliente de *blockchain*, contrastando marcadamente con los sistemas convencionales donde la información se centraliza y controla por una única entidad. En la *blockchain*, la información se distribuye entre todos los participantes de la red, promoviendo así un sistema más resiliente y transparente (Saberri et al., 2019).

*Blockchain* surge como una propuesta a la crisis económica y a las condiciones de explotación de las sociedades, así como al cuidado del medio ambiente y a la trazabilidad. Por lo tanto, su objetivo social recae en crear y compartir el valor de forma colaborativa y comunitaria regresando la posibilidad para pensar en sociedades descentralizadas, informadas y que puedan tomar decisiones.

La transparencia inherente a la tecnología *blockchain* facilita el acceso universal a información verificable, permitiendo a los usuarios examinar y validar datos relativos a la producción, movilidad y disposición de productos o servicios, así como el uso de recursos naturales en diversos procesos (Saberri et al., 2019). Esta característica fundamental amplía considerablemente el espectro de aplicaciones potenciales de la *blockchain*, abarcando múltiples aspectos de la economía, la trazabilidad y la gestión ambiental (Andoni et al., 2019).

Aunque las criptomonedas, particularmente Bitcoin, representan la aplicación más reconocida de la tecnología *blockchain*, su versatilidad ha propiciado su adopción exitosa en diversos sectores. Kshetri (2018) destaca su implementación en la gestión de cadenas de suministro, mientras que Aggarwal et al. (2019) señalan su potencial en el sector sanitario. Adicionalmente, Andoni et al. (2019) examinan su aplicación en el sector energético. La *blockchain* ha demostrado su eficacia en cualquier contexto que requiera transacciones seguras, trazables y verificables, garantizando simultáneamente la privacidad y la integridad de la información.

La adaptabilidad de la tecnología *blockchain* la convierte en una herramienta particularmente valiosa para la trazabilidad de atributos ambientales. Di Silvestre et al. (2020) señalan su potencial para el registro transparente y verificable de datos ambientales, incluyendo la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que es una variable fundamental para la toma de decisiones informadas. Además, Ahl et al. (2019) destacan su aplicación en la medición y verificación del uso de energías renovables. Finalmente, Upadhyay et al. (2021) exploran su utilidad en la cuantificación y gestión de recursos

naturales en procesos productivos, así como en el seguimiento de residuos generados.

La implementación de la tecnología *blockchain* en el contexto de los recursos naturales y atributos ambientales suscita importantes consideraciones éticas, particularmente en relación con la modernización y la explotación de diversas formas de vida. Aunque este debate ético no será el foco principal de este estudio, es crucial reconocer su relevancia en el marco de esta propuesta analítica.

Un aspecto significativo de la aplicación de *blockchain* en el ámbito ambiental es su potencial para revolucionar el comercio de carbono y sus mecanismos de compensación. Fu et al. (2018) señalan que la tecnología *blockchain* puede proporcionar una plataforma que ofrezca un rastreo seguro, verificable y descentralizado para las transacciones de carbono, mejorando así la transparencia y la eficiencia del mercado.

Es fundamental destacar que la tecnología *blockchain* tiene el potencial de promover una economía más equitativa y segura, ofreciendo soluciones que mitigan la toma de decisiones sesgadas por intereses personales o discriminatorios que puedan exacerbar la disparidad económica (Tapscott & Tapscott, 2017). Sin embargo, Truby (2018) advierte que las limitaciones de la cadena de bloques y el confinamiento de información aún dependen en última instancia de la intervención humana en la obtención y mantenimiento de la cadena. Por lo tanto, las cuestiones éticas relacionadas con la creación y distribución de valor continúan planteando desafíos significativos para las sociedades en términos de controles y seguimientos.

Un tercer aspecto crucial es la descentralización de la energía renovable, que será el eje central del análisis de este proyecto. Ahl et al. (2019) demuestran que las redes de energía descentralizadas basadas en fuentes renovables han mejorado significativamente la eficiencia y eficacia de la cadena de producción,

distribución y abastecimiento de energía. La investigación sobre la transparencia en las cadenas de suministro globales adquiere una complejidad y relevancia crecientes debido a las preocupaciones climáticas y las presiones geopolíticas (Saberri et al., 2019).

La sinergia entre las energías renovables y la tecnología *blockchain* tiene el potencial de extenderse a múltiples sectores y recursos, proporcionando un modelo para la implementación de esta tecnología. En esta propuesta, se explorará específicamente la combinación de atributos entre la tecnología *blockchain* y el proceso minero.

La capacidad de la *blockchain* para transparentar la cadena de suministro de productos ha sido demostrada en diversos sectores. Por ejemplo, Tian (2017) describe cómo el Institute of Food Technology ha implementado esta tecnología en la industria alimentaria, permitiendo a diferentes actores introducir y acceder a información sobre productos específicos en una base de datos compartida.

A pesar de los desafíos pendientes, la tecnología *blockchain* se perfila como una herramienta prometedora para facilitar la transición hacia una menor dependencia de combustibles fósiles y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Además, como señalan Upadhyay et al. (2021), *blockchain* está impulsando la innovación en soluciones tecnológicas para abordar la crisis climática, incluyendo la captura de carbono, la gestión energética, la administración de recursos y el manejo de residuos.

En resumen, esta introducción establece que la tecnología *blockchain* representa una propuesta innovadora para la gestión, almacenamiento e intercambio de información de manera segura, transparente y descentralizada. Su potencial la convierte en una herramienta poderosa y prometedora para diversos sectores que buscan crear y transferir valor (Zheng et al., 2017).

En el sector ambiental, la tecnología *blockchain* no solo ofrece las ventajas mencionadas, sino que también presenta desafíos importantes en relación con el medio ambiente y la cuantificación escalable de sus beneficios e impactos negativos (Truby, 2018). La evaluación crítica de estos aspectos será fundamental para optimizar la aplicación de *blockchain* en contextos ambientales.

### **1.1 ¿Qué muestra el debate actual en relación con la tecnología *blockchain* y la minería?**

La tecnología *blockchain* lleva poco tiempo en proceso de adopción por sectores industriales como la minería. Aun cuando se tiene conocimiento sobre el potencial que puede tener al implementarse en procesos mineros, todavía no hay estudios o reportes abundantes y específicos sobre el tema.

No obstante, la visión general y el avance hasta el momento establecen una pauta clara. La descentralización del registro distribuido hace que los bloques de información sean inmutables y transparentes, con ello puede favorecer en fases como la trazabilidad, la seguridad y la eficiencia en la cadena de producción, almacenamiento y distribución, así como en la gestión de activos.

Específicamente para la minería, en la fase de trazabilidad y cadena de suministro transparente, la tecnología de la cadena de bloques permite rastrear y verificar la información en cada fase del proceso, es decir, se puede revisar la información detallada en la extracción, en la producción y en la distribución de elementos.

La trazabilidad es relevante en distintas escalas, pues las empresas mineras que utilizan *blockchain* en alguna fase de sus procesos pueden tener certeza del origen, los costos y los modos en que se está obteniendo el producto y mantener una congruencia con sus políticas y discursos que deseen enviar al cliente. A su vez, el cliente puede estar seguro de la misma información, y acceder a

productos o servicios que sean más afines a sus intereses. En cuestión de la crisis y acción climática con esta oportunidad que ofrece la tecnología *blockchain* es posible incrementar la congruencia y la coherencia entre las acciones menos impactantes con el ambiente.

Otra fase con gran potencial para la tecnología en cuestión es la gestión de contratos y acuerdos. En esta fase la automatización de los contratos puede garantizar un mejor servicio. La compra, venta y distribución estarían respaldados por un nivel de confiabilidad a menor costo y tiempo. En el caso del registro de la propiedad y la certificación es similar al anterior en el sentido de mantener un nivel de seguridad sobre la información y confianza hacia el consumidor y productor puesto que reduce el nivel de fraude en las operaciones mineras.

Sobre la gestión de datos ambientales y el tema de la sustentabilidad, sin entrar en discusión sobre la forma en que ésta última se evalúe, *blockchain* podría registrar y verificar datos relacionados con las mediciones de impacto ambiental por distintas tipificaciones energéticas o de recurso materiales, materias primas, entre otras.

En terminos de financiamiento, la tecnologia blockchain permite una mayor transparencia en cada fase de la cadena de produccion gracias al uso de tokens respaldados por informacion precisa de los activos mineros. Esto ofrece a los inversionistas una vision mas clara sobre el movimiento de sus inversiones, aumentando la confianza y facilitando la toma de decisiones financieras.

Por último, para la gestión de información y documentación, el *blockchain* contiene la información oficial de la operación minera como permisos, informes y cuestiones de seguridad. Entre los desafíos más grandes para este ejemplo de aplicación de la tecnología *blockchain* es la disposición de diversos sectores a colaborar. Es decir, empresas mineras, el sector gubernamental y todos los

implicados en la cadena de suministros deben participar de las demandas de la tecnología para que funcione adecuadamente.

## **1.2 Breve discusión de la literatura**

Elizondo, quien realiza un estudio sobre la relación de la tecnología de la cadena de bloques y su interacción con la producción de atún. Se suma al grupo de personas que describen al “*blockchain* como una base de datos descentralizada, distribuida, pública y cifrada” (Velasco, 2019).

En su estudio demuestra algunas de las ventajas y retos que hay por la apropiación de esta para procesos de producción de animales acuícolas. Desde que en 2009 se crea la primera red bitcoin, y Swan (20115) en su obra “*Blockchain, Blue print for a new economy*”, explica detalladamente cómo ha evolucionado la cadena de bloques en su aplicación de criptomonedas, hasta lograr distintas formas de pago de manera digital.

Esta tecnología reduce las entradas de productos ilegales o dañinos tanto para el usuario, productos como para el ambiente, promueve la transparencia, aumenta la eficiencia, accesibilidad y trazabilidad en la manipulación de datos. Dado que blockchanin es una tecnología de contabilidad distribuida (*Distributed Ledger Technology, DLT*) cuyo principal atributo es la descentralización, puede operar sin intermediarios y la red es gestionada únicamente por los usuarios. Es una tecnología cifrada, pública o privada, la llave de la criptografía que posee protege la información para dar validez a la información entrante (Hackius y Petersen, 2017).

Si bien los reportes de sostenibilidad han mejorado en los últimos años, la comunidad señala que la regulación que estipula qué información no financiera debe compartir las empresas es muy escasa (Rodríguez-Gutiérrez, 2021). Esto permite a las empresas seleccionar la información que desean compartir y presentarse de la forma más favorable, más linda, más contenida.

En la literatura se describe a los informes de sostenibilidad convencionales como una "hipocresía organizada", argumentando que es poco probable que estos informes se conviertan en revelaciones de información sustanciales sin presión externa; se reconoce la bondad de la inalterabilidad sin perder de vista el obstáculo que ésta representa para su adaptabilidad (Kim, 2018).

El proceso de transparencia de información y la contención de datos incrementan la confianza de la tecnología *blockchain*, revolucionando las formas de hacer negocios y llevando la tecnología a cada fibra del tejido social (Foro Económico Mundial, 2023).

Dado que las cadenas de bloques están descentralizadas y limitadas por sus propias reglas, son capaces de generar confianza entre nodos que, de otro modo, podrían no confiar entre sí, como competidores comerciales o partes interesadas en una cadena de suministro (Androulaki 2018).

La solución para eliminar el control centralizado de terceros es hacer que todos sean terceros, cada uno controlando colectivamente el acceso al registro (Tröster, 2020). Con esto podemos entrelazar la trazabilidad y analizar los atributos ambientales como un bloque.

La colaboración entre las partes interesadas de la industria es esencial para la implementación exitosa de las cadenas de bloques (Blandinet al., 2019). Las aplicaciones de *blockchain* a la minería, por ejemplo, son cada vez más creativas y sofisticadas (Saberri, 2019), y un campo con gran potencial (Kshetri, 2018).

Dentro de las contribuciones más importantes hoy en Chile es el desarrollo de la plataforma de electromovilidad la cual, presentará desafíos y creará oportunidades en las ciudades y nuevos estilos de vida. Concebir la electromovilidad como una revolución de la industria del transporte deberá estar interrelacionada con la revolución digital para diseñar soluciones integradas, como lo es el caso del *blockchain*.

La efectiva adopción de la tecnología de bloques no es todo en la operatividad del sistema. Tendrá una influencia en cada eslabón e impulsará a ciertos

cambios que considere necesarios, por ejemplo, el sector energético es un caso directo. Endesa, que es parte del sector al que se acaba de hacer referencia por más que sea visto como un mundo con fuertes condicionantes físicos que limitan la disrupción causada por un elemento digital como *blockchain*, ya han aparecido aplicaciones que prometen reinventar las relaciones entre los distintos actores del mundo de la energía.

### **1.3 Contribución del trabajo y objetivos**

Este trabajo analiza cómo los avances tecnológicos y científicos, en particular la tecnología *blockchain*, pueden aplicarse para mejorar la trazabilidad de los atributos ambientales en los procesos mineros. La implementación de *blockchain* en la gestión de cadenas de suministro tiene el potencial de aumentar significativamente la transparencia y la confiabilidad de la información, beneficiando tanto a entidades privadas como a comunidades y organismos gubernamentales.

El trabajo presenta una hoja de ruta para la implementación sistemática de *blockchain* en procesos mineros, mejorando la gestión ambiental y la transparencia en la industria. Con ello, el objetivo general es proponer atributos deseables de para la implementación de la tecnología *blockchain* que permita la trazabilidad de los principales atributos ambientales en el sector minero. Los objetivos específicos son:

- Analizar las aplicaciones actuales de la tecnología *blockchain* en el sector minero, con énfasis en la gestión de atributos ambientales.
- Identificar y definir los atributos ambientales relevantes en la minería que pueden ser trazados eficazmente mediante la tecnología *blockchain*.
- Evaluar la viabilidad de implementar la tecnología *blockchain* para la recolección y almacenamiento de información relacionada con atributos ambientales en el sector minero.

- Diseñar una hoja de ruta para la implementación de un sistema de trazabilidad de atributos ambientales basado en tecnología *blockchain* para la industria minera.

#### **1.4 Metodología.**

Este estudio adopta un diseño de investigación cualitativo no experimental con alcance exploratorio-descriptivo (Creswell & Creswell, 2018). El enfoque cualitativo permite obtener una comprensión profunda del fenómeno estudiado: la aplicación de blockchain en la trazabilidad de atributos ambientales en el sector minero. La investigación se estructuró en tres fases principales que comenzaron con una revisión sistemática de literatura siguiendo el protocolo PRISMA (Page et al., 2021), incluyendo una búsqueda en bases de datos académicas (Web of Science, Scopus, IEEE Xplore) en el período 2010-2024 usando las palabras clave: blockchain, minería, trazabilidad ambiental y sostenibilidad. Posteriormente se realizó un análisis de caso, desarrollándose un estudio de caso único (Yin, 2018) centrado en MineHub y Goldcorp Inc., seleccionado por la representatividad del fenómeno estudiado, accesibilidad a la información y relevancia en el contexto latinoamericano. Finalmente, se completó una investigación cualitativa mediante entrevistas semiestructuradas, empleando un muestreo intencional por criterios (Patton, 2015) para la selección de participantes.

##### **1.4.1 Diseño Muestral**

Se diseñó un protocolo de entrevista basado en la metodología de Kvale (2007), que estableció entrevistas con una duración de 30-45 minutos, realizadas tanto en modalidad virtual a través de Zoom como de manera presencial. Todas las sesiones fueron documentadas mediante grabación digital, contando con el

consentimiento informado de los participantes, y se estructuraron en cuatro bloques temáticos principales.

El instrumento de investigación se basó en una entrevista semiestructurada que empleó un cuestionario de respuestas abiertas. La validación del instrumento se realizó mediante una prueba piloto con dos participantes que, aunque cumplían con los criterios de selección, no formaron parte de la muestra final del estudio. Esta prueba piloto permitió refinar el protocolo y realizar los ajustes necesarios basados en la retroalimentación recibida.

Para el procesamiento de la información, se procedió a la transcripción manual de las entrevistas, cuyos detalles se presentan en las Tablas 1 y 2. Durante este proceso, se mantuvo un estricto protocolo de confidencialidad, asegurando el anonimato de los datos sensibles y de los entrevistados, además de implementar medidas de almacenamiento seguro según los protocolos éticos establecidos.

Es importante señalar que la muestra del estudio presenta ciertas limitaciones inherentes, incluyendo posibles sesgos de selección, restricciones geográficas y limitaciones temporales propias del alcance del estudio.

Para el análisis cualitativo de los datos, se implementó el Análisis Temático siguiendo la metodología de Braun & Clarke (2006). Este proceso incluyó la codificación inicial utilizando el software ATLAS.ti v9, el desarrollo de un libro de códigos, la identificación de temas emergentes y la triangulación entre investigadores.

**Tabla 1. Distribución de Participantes por Sector**

Sector Profesional	Nº Participantes	Criterios de Selección
Sector Minero	11	Mínimo 5 años de experiencia en gestión

		ambiental y/o operaciones
Expertos Supply chain	2	Experiencia en implementación de soluciones logística
Experto en Tecnología	3	Experiencia en uso Softwares
Expertos Ambientales	3	Background en evaluación de impacto ambiental y sustentabilidad
Administrativos	4	Experiencia en manejo de software
Académicos	1	Investigación activa en temas relacionados

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2. Características Demográficas de los Participantes**

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
Rango de edad	35-60 años
Nivel educativo	40% postgrado, 60% pregrado
Distribución geográfica	Nacional
Experiencia promedio	10 años

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3. Cuestionario y caracterización**

Pregunta	Caracterización
¿Conoce la tecnología de <i>blockchain</i> ?	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
¿Conoce los contratos inteligentes, y <i>blockchain</i> específico para cuestiones ambientales?	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
Desde un nivel muy general, podría contarnos ¿ha tenido alguna experiencia con <i>blockchain</i> ?, ¿cómo comenzó a relacionarse con el tema?	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
¿Ha colaborado en algún proyecto relacionado con <i>blockchain</i> y el medio ambiente?, describa su participación en el proyecto y su impacto ambiental	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
¿Cómo es que <i>blockchain</i> aporta a cuestiones ambientales y de trazabilidad, ¿qué aspectos consideraría?	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
¿Que, desde la lógica del <i>blockchain</i> , se pudiera considerar una categoría para ser un atributo ambiental?	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
¿Cuáles considera que son las ventajas de adoptar el <i>blockchain</i> en cuestiones ambientales?	Atributo Ambiental Trazabilidad

	Sostenibilidad Financiero
¿Cuáles son los atributos ambientales que consideran en su ruta de trazabilidad?	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
¿Qué cuestiones éticas consideraría dentro de la tecnología <i>blockchain</i> y los procesos mineros?	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
¿Cómo es la comunicación entre su empresa y las organizaciones públicas o privadas, gubernamentales o no, y el público en general?	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero
¿Qué desafíos identifica para garantizar el éxito en la adopción e implementación de <i>blockchain</i> a procesos mineros y el cuidado ambiental	Atributo Ambiental Trazabilidad Sostenibilidad Financiero

Fuente: Elaboración Propia

## 2 ASPECTOS TEÓRICOS

Para abordar este trabajo de investigación se ha optado por una aproximación mixta, que permite considerar el análisis de la información y la recolección y análisis de datos.

### 2.1 *Blockchain* y cuestiones ambientales

Parte de este trabajo es mostrar lo que está ocurriendo con relación a la adopción del *blockchain* con cuestiones ambientales, de preferencia en el sector minero. Sin embargo, es también una propuesta de diálogo para hacer una

reflexión crítica sobre la información reportada y la realidad próxima comprobable. Es bien sabido que los discursos políticos enmarcados en la lógica de la nación-Estado, tienen una disrupción entre lo planeado y lo llevado a cabo o lo comprometido a lo informado, es por ello que cobra relevancia la transparencia y la trazabilidad.

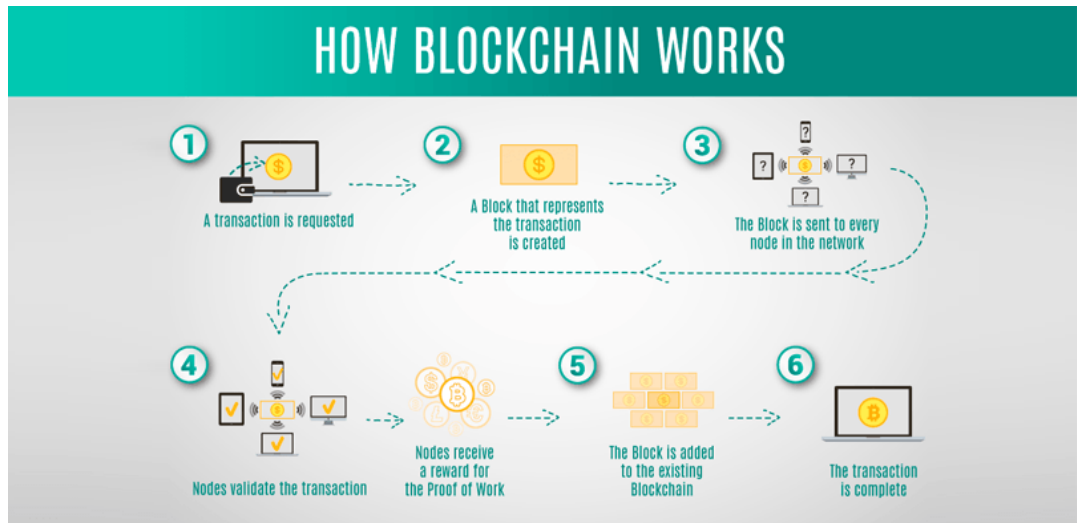
De acuerdo con las Naciones Unidas (2021) Energy *Blockchain* Lab e IBM innovaron una plataforma que comercia con activos de carbono, haciendo que la tecnología de bloques tenga la capacidad de mejorar el sistema de transacciones de dichos activos. En China ya es una realidad y la describen como la oportunidad que "permite a las organizaciones con altas emisiones controlar sus huellas de carbono y cumplir las cuotas comprando créditos de carbono a emisores con bajas emisiones" (United Nations, 2021). Así también las Naciones Unidas afirman que *blockchain* es el facilitador del comercio para las energías limpias. Es decir que permite el desarrollo de plataformas quitando importancia a las jerarquías o renombres de los usuarios de estas; los posiciona como iguales para realizar un comercio horizontal (United Nations, 2021). En estas industrias por ejemplo por parte de los consumidores podrán comprar, vender o intercambiar activos entre sí. Donde la tecnología utiliza activos digitales, también conocidos como *tokens*, es la manera en que se mide la cantidad de producción energética.

Otro de las características de *blockchain* es la capacidad que tiene para mejorar los flujos del financiamiento climático. Es una tecnología que permite el desarrollo de plataformas para el comercio en pares de energía renovable; es decir, la compra, venta o intercambio mediante fichas o activos digitales son cuantificables para que representen y sean visibles en la producción energética. Hasta el momento, uno de los atributos más fuertes de la implementación del *blockchain* al mercado climático es la capacidad de cuantificar y notificar las reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub>e. La transparencia que reporta y facilita la

tecnología en cuestión permite el seguimiento y la notificación de las emisiones de reducción, disminuyendo las probabilidades de fallos en la parte de contabilidad.

De esta manera el *blockchain* se posiciona como una herramienta útil para la supervisión de los procesos realizados en la aplicación de las “contribuciones determinadas a nivel nacional en virtud del Acuerdo de París”. En palabras de Massamba Thioye, copresidente de la Coalición de la Cadena del Clima y director de la Subdivisión de Aplicación del Marco Normativo de la División de Mitigación del Cambio Climático de las Naciones Unidas: "En la formulación de políticas climáticas, es importante que la medición, la notificación y la verificación de la acción climática sean transparentes. Permite a los responsables políticos comprender dónde deben incentivar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y, al mismo tiempo, confiar en que cumplen los requisitos establecidos en sus normas" (United Nations, 2021).

**Figura 1.** *Funcionamiento del Blockchain.*



Fuente: Mayuranathan et al. (2020), p.3.

## 2.2 Atributos ambientales en la minería

La fusión de la tecnología *blockchain* en el sector minero tiene la capacidad de mejorar el nivel de seguridad y la trazabilidad de la información por medio de cuatro fases: identificación de una necesidad, selección de la tecnología a utilizar, diseño de arquitectura y validación de la propuesta (Pardo, 2023).

Sin embargo, muchas veces hay una gran diferencia entre las estimaciones y los resultados de implementación, por ello vale la pena ahondar en la investigación. De manera que, para aterrizar el ejemplo de cómo la tecnología *blockchain* puede operar de manera conjunta con el sector minero, analizaremos el estudio de caso de la empresa MineHub y su prototipo en la mina el Peñasquito, Zacatecas, México.

Primero explicamos brevemente que es y a qué se dedica MineHub (2023), quienes se describe como proveedora de:

Soluciones digitales de nivel empresarial que conectan a compradores, vendedores y financieros dentro de las cadenas de suministro de materias primas físicas en un flujo de trabajo integrado digitalmente e impulsado por datos que son utilizables, compartibles, verificables e infalsificables. MineHub es una marca registrada de MineHub Technologies Inc. en Canadá y/o en otros países.

Aquellos que trabajan con MineHub o que recurren a sus soluciones tienen total acceso a las cadenas de suministros. De esta manera, empresas de todo el mundo que utilizan soluciones MineHub están interviniendo sus operaciones logísticas, gestión comercial, modelos financieros a través de alternativas digitales que conectan a compradores, vendedores y financieros. Así, conecta los eslabones de las cadenas productivas comerciales a través de portales digitales con “datos utilizables, compartibles, verificables e infalsificables” y ofrece servicios concretos en la resiliencia de la cadena de suministros, la prevención del fraude, la seguridad de los datos y normativas y en el cumplimiento de ESG y contabilidad de emisiones (MineHub, 2023).

Aquí resaltan aspectos relevantes para la investigación; se comienzan a identificar atributos ambientales con valor en el mercado y sector minero: las emisiones de CO<sub>2</sub>e, otros aspectos que implican factores sociales, territoriales, políticos y por supuesto, económicos. Lo ideal de esto sería llegar a un equilibrio de los factores sin emitir prejuicios a ningún de ellos.

La cadena de suministros digital que maneja MineHub facilita la visibilidad y la resistencia que las empresas tienen sobre la información en tiempo real, esta es parte de las virtudes de la tecnología de la cadena de bloques que MineHub e IBM venden en el sector minero. De manera consecuente aumenta la eficiencia y la eficacia de los flujos de ingresos y materias prima al sustituir los procesos manuales con las funciones que aporta la tecnología *blockchain*.

Aun cuando su discurso de mercadotecnia se basa en promover la comodidad en las cadenas, incrementar la eficiencia, resiliencia y la sustentabilidad, la información precisa sobre cada eslabón de la cadena productiva no es de acceso libre para el público en general. De manera que es una de las limitaciones que serán señaladas para los fines de esta investigación.

No obstante, todo esto es información inaccesible para todo el público ajeno a MineHub. Es decir, para esta investigación no es posible el acceso a datos específicos sobre estos procesos. A pesar de ello se pudo obtener información muy útil para entender las formas en las que interviene el *blockchain* en la minería y dibujar una ruta. Se intentará describir cada uno de los puntos que surgen de la manera en que opera MineHub.

Los metales y la minería son cruciales para la economía mundial; 1.8 trillones de dólares se mueven por el mundo cada año alimentando a la industria que necesita materias primas para elaborar los productos que utilizamos como especie humana en cada aspecto de la vida, desde lo cotidiano hasta lo especializado.

La cadena de suministros de la minería es larga, involucra cientos de empresas, miles personas y millones de interacciones. Tiene distintos nodos: el punto de origen de la materia prima, es decir, de dónde se extrae. Este es un inicio importante en cuestiones geografía y ecología políticas puesto que las condiciones sociales y ambientales responden a desigualdades extremas.

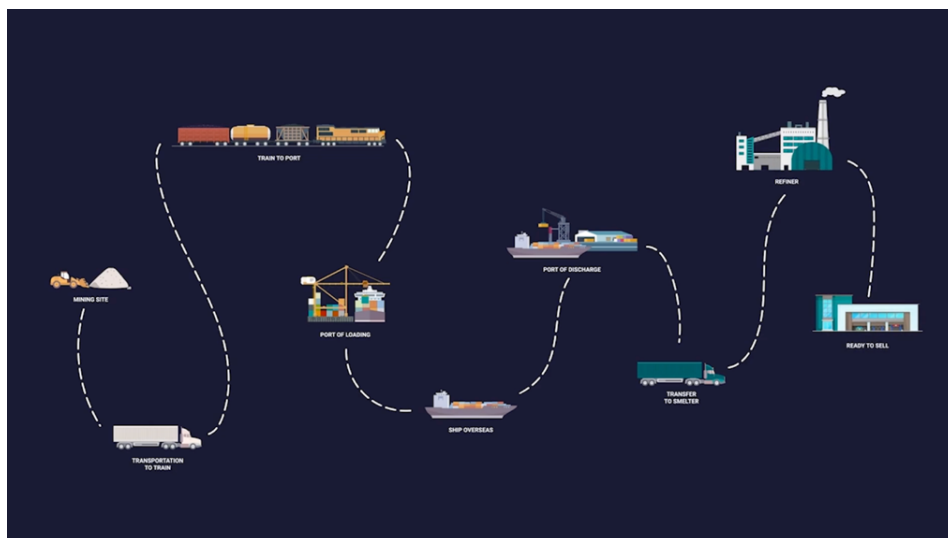
Aun cuando este análisis no se enfoca en cuestionar la clasificación de atributos ambientales, es importante mencionar que el concepto de sustentabilidad puede estar en función de las necesidades humanas (mirada antropocéntrica) o puede intentar promover el respeto por la vida misma. Cuestión con el potencial de modificar los resultados completamente.

MineHub, el *blockchain* y los atributos ambientales son un claro ejemplo de una propuesta antropocéntrica inscrita en el marco neoliberal que fomenta la

sustentabilidad. Sin caer en juicios sobre dualidades, solo se están ofreciendo críticas para invitar a la reflexión.

En segundo lugar, de la cadena de producción minera que opera con *blockchain* está la movilidad. Aquí hay varias subdivisiones: transporte terrestre, tren a puerto, puerto de carga, transporte marítimo, puerto de descarga y transporte a punto de fundición. Por último, están las fases de refinación y salida a los puntos de venta (véase figura 2).

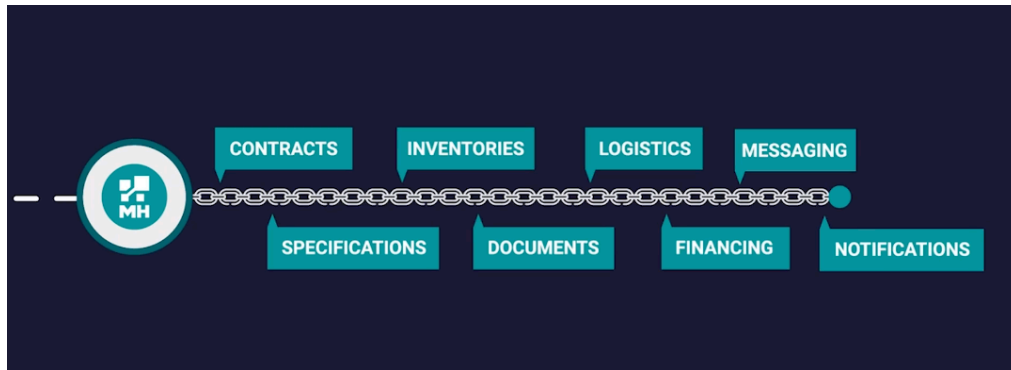
**Figura 2. Cadena de producción minera con eslabones identificados.**



Fuente: <https://minehub.com/about/>

La innovadora propuesta del *blockchain* interfiere en los contratos, las especificaciones, los inventarios, documentos, logística, financiamiento, mensajería y notificaciones (véase figura 3)

**Figura 3. Participación de Minehub y su propuesta tecnológica de blockchain en la cadena productiva del sector minero**



Fuente: <https://minehub.com/about/>

Entonces, entre las propuestas que consideran atributos ambientales está involucrado el sector energético y su transición a fuentes renovables; todo un campo del conocimiento para reflexionar sobre sus prácticas, aplicaciones y alcances. La cuantificación de emisiones de carbono y la verificación de la precedencia de minerales, la cuantificación de recursos naturales con potencial de transformación.

### **2.3 Blockchain desde la perspectiva social**

Goldcorp Inc. es una empresa minera transnacional con sede en Vancouver, Canadá. Es reconocida como una de las tres empresas mineras especializada en oro más grande del mundo. Su principal actividad operacional está ubicada en el continente americano. Tiene propiedades en Estados Unidos, México, Chile, Honduras, Guatemala, Republica Dominicana, Argentina y Canadá. El valor de sus reservas minerales cerró el 2011 con un precio de mercado en el orden de ciento ochenta millones de dólares (Goldcorp, 2013).

Hace cuatro años MineHub Technologies, Inc. e IBM hicieron pública su colaboración para implementar la tecnología *blockchain* en el proceso de

minería. Pensaron introducirla en la eficiencia operativa, logística y en la etapa de financiamiento para reducir costos.

Entre las empresas mineras que decidieron colaborar con esta alianza están ING Bank, Kutcho Copper Corp, Ocean Partners USA Inc, Wheaton Precious Metals Corp, y la canadiense Goldcorp Inc. Esta última será la que se tomará para esta investigación para analizar su ejemplo en la mina mexicana, ubicada en el estado de Zacatecas.

La minería de rajo a cielo abierto ha creado una nueva categoría en el campo de la geografía, reconocido como geografía de la minería. En América Latina y en el México rural es una práctica con una fuerte presencia. Los efectos sobre la tierra, agua, aire y salud son drásticos (Garibay, 2011).

México es un país rico en minerales y está registrado que el 85% de sus reservas aún permanecen sin explotar (Castro Ramírez, 2015). El mayor potencial para la minería se ubica al norte del país, en los estados de Sonora, Coahuila, Chihuahua, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas. Es en este último en donde se encuentra la minería en cuestión, el Peñasquito.

Asimismo, está documentado que los emplazamientos de tajo a cielo abierto en México “midan de mil a más de ocho mil hectáreas de área cercada donde la destrucción del paisaje es absoluta. Pero la superficie de afectación indirecta puede multiplicarse de forma exponencial según el caso” (Garibay, 2014).

Esta reportado que la minera canadiense “ganó el control de la tierra y agua necesaria para operar la mina el Peñasquito en el norte de Zacatecas; cómo desactivó las protestas campesinas posteriores, y cómo ha logrado tomar grandes volúmenes de riqueza mineral a cambio de compensaciones minúsculas a la comunidad local.

El papel de los agentes del Estado en la negociación y la interpretación de los contratos legales resultantes es particularmente significativo. Los investigadores debieran examinar las tácticas que las corporaciones mineras utilizan para tomar territorialidades campesinas y acallar la protesta

campesina, porque éstas dan forma a un proceso más general de un desigual intercambio económico y ecológico” (Garibay, 2011).

Si bien es cierto que la tecnología *blockchain* ha favorecido cada una de las etapas del proceso que conlleva la extracción de minerales. La práctica minera es considerada de alto impacto a la salud humana y ambiental. Por lo tanto, en esta sección de la investigación se busca resaltar las maneras en que los atributos ambientales son vistos por debajo para cumplir fines económicos de alcance global.

La finalidad es evidenciar la importancia de los atributos ambientales para integrarlos a las fases en las que interviene a la tecnología *blockchain* y proponer medidas que contemplen con más seriedad a los atributos ambientales.

La actividad minera con o sin *blockchain* contempla en muchos de sus estudios las perspectivas de género, las estrategias de acumulación por desposesión, las formas de discriminación hacia los habitantes locales, cuestiones de salud, entre otros (Castro Ramírez, 2015).

En el caso del Peñasquito, la acumulación por desposesión se ha articulado en favor de la transnacional para facilitar su inversión en el ejido Cedros, municipio de Mazapil, Zacatecas. En donde está la mina Peñasquito, actual propiedad de la canadiense Goldcorp Inc. (Castro Ramírez, 2015).

Goldcorp Inc. practica la “minería a cielo abierto con contratos de ocupación temporal y cuya actividad atenta contra las formas de vida de las comunidades” (Castro Ramírez, 2015). Las implicaciones ambientales por esta forma de extracción de minerales comienzan con las grandes cantidades de tierra o suelo superficial que se debe remover para alcanzar los depósitos de minerales. Hasta esta fase la primera alteración visible es la alteración del paisaje.

El paisaje es el contenedor de vegetación, formaciones rocosas, suelos superficiales, todo ello brinda las bases para la vida natural y la vida humana puesto que los recursos para la vida humana son obtenidos del paisaje.

Entonces, la degradación del paisaje implica la degradación del entorno y la pérdida de biodiversidad a escala local.

Continuando con las implicaciones ambientales por la minería a cielo abierto se nombra la pérdida de biodiversidad. Este rubro es de suma importancia para esta actividad ya que el daño que queda en el suelo y todo lo impactado por la minería es tan agresivo que la pérdida dura años. De manera que las personas locales prácticamente pierden la oportunidad de volver a aprovechar ese espacio en alguna de sus formas naturales.

La contaminación del agua es otro punto relevante. La remoción del suelo libera minerales tóxicos y productos químicos que se infiltran a las aguas subterráneas y contaminan las aguas superficiales. Las consecuencias de esto se extienden hasta los ecosistemas acuáticos y la oportunidad de que las personas aprovechen esa agua.

Los residuos mineros generalmente son almacenados en represas o depósitos y deben tratarse de forma especial, de lo contrario pueden contaminar además de lo enunciado, el aire; todas las afectaciones representan una afectación a largo plazo. Las emisiones de polvos y gases durante la actividad minera a cielo abierto son masivas, afectando la salud humana y ambiental.

Todas las repercusiones mencionadas conllevan alteraciones de patrones hidrológicos, impactos en las comunidades locales y requisitos de agua. Como las consecuencias se viven por largos periodos es muy complicado para el ecosistema y para la esfera social reponerse una vez que la empresa minera termina su actividad.

Por ejemplo, “en regiones desérticas cuando el agua extraída agota los acuíferos compartidos con comunidades vecinas o en regiones lluviosas cuando precipitaciones excepcionales causan derrames de las presas de jales que almacenan desechos contaminantes” (Garibay, 2014).

En este sentido, a pesar de que el *blockchain* está mejorando fases del proceso en términos de información confiable y reduciendo costos, así como

aumentando la confiabilidad de la información reportada, en el sector minero no deja de catalogarse como una actividad de alto impacto ambiental con terribles consecuencias para las localidades.

Sería interesante valorar si los resultados de un proceso minero bien afianzado a la tecnología de bloques, contra uno sin *blockchain*, y entonces reflexionar si, bajo estas condiciones la minería es una actividad viable para el ecosistema y las comunidades locales, o es más fuerte el discurso capitalista que maquilla y engrandece las necesidades humanas y su apego hacia los minerales.

Para Cedros hay proyecciones para cuando Golcorp Inc. termine de operar. De acuerdo con Quintana (2004) esta región tendrá dos cráteres de grandes magnitudes: el Peñasco, con una profundidad de seiscientos metros y mil quinientos de diámetro; y el Chile Colorado, con una profundidad de quinientos metros y ochocientos de diámetro.

Una vez finalizada la actividad minera, por ley, los autores del contrato son quienes deben asumir la responsabilidad con relación al impacto ambiental para lidiar con el deterioro (Quintana, 2014).

A pesar de la reglamentación oficial, en el nivel de la cotidianidad, las personas locales reconocen perfectamente que su estancia en la zona minera, con trabajo prometido por la empresa líder termina en el momento en que la extracción ceda. Cuando se acaba el mineral, se va la empresa canadiense y la población debe migrar. Las condiciones ambientales son tan deplorables que no hay oportunidad de vida al menos durante un par de generaciones humanas.

En este sentido sería importante considerar qué tanto puede ayudar verdaderamente el *blockchain* a la economía local a través de la minería. ¿La reducción de contaminación del aire, suelo y agua que se pueda reducir por la implementación de *blockchain* sería suficiente para que las emisiones de CO<sub>2</sub>e y los impactos sociales sean considerados como un precio que valga la pena por los beneficios que ofrece la explotación minera?

Finalmente, muchas de las cuestiones que se tocan van más allá de la adopción de la tecnología *blockchain* en la actividad minera. Mas bien son cuestiones de ecología política que, aun cuando la tecnología *blockchain* surgió como una oportunidad para que las minorías o grupos segregados, y todo mundo en general, tomara el control sobre su economía, pareciera que una vez más, el neoliberalismo y el capitalismo han cooptado al *blockchain* para perpetuar una lógica económica que continúe lo más homogénea posible.

De modo que desde la perspectiva social a escala local la implementación de la tecnología *blockchain* en los procesos mineros puede ser irrelevante; para los habitantes locales es una cuestión de disputa por el territorio (Garibay, 2014); que se termina traduciendo en una lucha por la vida misma.

Para el sector social defender su territorio y la defensa por los atributos ambientales, es una cuestión de subsistencia, en donde la conexión que existe con su entorno les permite reconocer que dependen totalmente de las condiciones naturales y saludables para mantener una vida en bienestar.

Ahora bien, ubicando como actor principal al ambiente, los atributos ambientales mantienen una estrecha relación con la noción territorial. Es a partir de ellos que se determinan. Los atributos ambientales que debieran estar bajo el foco de análisis de la tecnología en cuestión son la “propiedad del suelo, el acceso al agua, derechos de paso, por la reubicación de poblados, por la contaminación de aguas y suelos, por la afectación a la salud de las personas y animales, así como los daños a lugares de valor simbólico, entre otros” (Garibay, 2014).

Sin embargo, abrir la categoría de atributos ambientales a las conexiones que hay con aspectos sociales (aunque su división sea exclusivamente con fines analíticos ya que en la vida cotidiana son imposibles de separar) implicaría reconocer y sobre todo atender las “disputas territoriales, las afectaciones a derechos colectivos, patrimoniales, agrarios, civiles, derechos humanos,

derechos procesales y aquellos que la población local considera adquiridos por costumbre” (Garibay, 2014).

Por lo tanto, los atributos ambientales, desde la posición de la empresa minera se limitan atributos naturales como la contaminación, uso y aprovechamiento del agua, aire, suelo, energía y el mineral.

#### **2.4 El *blockchain* en otros ejemplos de carácter ambiental**

Los sectores con los que la tecnología de la cadena de bloques ha encontrado para fusionarse han sido muy diversos. Entre las alternativas emergentes en el campo de temas ambientales hay un par de propuestas interesantes y, aun cuando no todas están vinculadas a la actividad minera, la revisión de estas alternativas muestra cómo pueden considerarse los atributos ambientales para otros procesos particulares.

##### **2.4.2 La propuesta hegemónica para salvar al clima con *blockchain***

La tecnología *blockchain* ha demostrado un potencial significativo para optimizar diversas etapas del proceso minero, particularmente en términos de confiabilidad de la información y reducción de costos operativos. No obstante, es crucial reconocer que la minería continúa siendo una actividad con un impacto ambiental considerable y consecuencias potencialmente graves para las comunidades locales.

Un caso ilustrativo de la aplicación de *blockchain* en el sector minero es MineHub, que utiliza esta tecnología para integrar digitalmente el flujo de trabajo completo de la cadena de producción minera, desde la extracción hasta la distribución final. Paliwal et al. (2020) señalan que esta implementación permite incrementar la visibilidad y la resistencia de la información en tiempo real a lo largo de los diversos eslabones de la cadena de suministro minera, incluyendo contratos, inventarios, logística y financiamiento.

La adopción de *blockchain* en la industria minera representa un avance tecnológico significativo en la gestión de la información y la trazabilidad. Sin embargo, es fundamental contextualizar esta innovación dentro del marco más amplio de los desafíos de sostenibilidad y responsabilidad social que enfrenta el sector. La implementación de *blockchain*, si bien promete mejorar la eficiencia y transparencia operativa, debe considerarse como parte de un enfoque holístico que aborde también los impactos ambientales y sociales de la actividad minera.

La implementación de tecnología *blockchain* emerge como una solución innovadora para optimizar los sistemas de gestión sostenible de atributos ambientales en la industria minera, particularmente en lo que respecta a la trazabilidad de aspectos ambientales relevantes. La experiencia de Chile en el sector energético proporciona un precedente valioso para esta aplicación. Según Pareti y Núñez (2020), la evolución del sistema eléctrico chileno, desde sus inicios sin regulación hasta la actual demanda de transparencia e innovación en la gestión energética, ha impulsado la adopción de *blockchain* por parte de la Comisión Nacional de Energía (CNE).

La implementación de *blockchain* por la CNE ha demostrado beneficios significativos, como la certificación de la calidad y trazabilidad de la información energética publicada. No obstante, Pareti y Núñez (2020) también señalan desafíos inherentes, como los costos asociados a la encriptación automática y el procesamiento de grandes volúmenes de datos.

En el contexto de la minería chilena, se propone una aplicación análoga a la utilizada por la CNE, adaptada a las particularidades del sector. Este sistema de trazabilidad y transparencia en la cadena de suministro permitiría registrar y rastrear de manera inmutable cada etapa del proceso minero, desde la extracción hasta la distribución final de los minerales, aumentando así la

transparencia sobre el origen, movimiento y transacciones de los recursos minerales.

La implementación de contratos inteligentes entre empresas mineras, proveedores y clientes, codificados en cadenas de bloques, puede automatizar el cumplimiento de términos y condiciones básicos mientras mantiene la flexibilidad necesaria para adaptarse a las realidades operativas del sector minero. Aunque los contratos inteligentes pueden establecer parámetros y condiciones base, también pueden incorporar cláusulas específicas que permitan ajustes y modificaciones controladas, documentando de manera transparente e inmutable cada cambio realizado, desde variaciones en la ingeniería de detalles hasta modificaciones presupuestarias. Esta capacidad de registro transparente es particularmente valiosa en el sistema de monitoreo y auditoría ambiental, donde facilita el registro de datos sobre consumo de recursos, emisiones, residuos y otros indicadores ambientales de las operaciones mineras, promoviendo el cumplimiento normativo y la rendición de cuentas ante autoridades y sociedad, mientras mantiene la flexibilidad necesaria para adaptarse a las condiciones cambiantes del proyecto.

En el ámbito financiero, la utilización de criptomonedas basadas en *blockchain* para pagos a lo largo de la cadena de suministro minero podría agilizar los flujos de efectivo y reducir los costos de intermediación. Finalmente, la implementación de *blockchain* en la cadena de custodia permitiría mantener un registro inmutable de la propiedad y movimiento de los recursos minerales extraídos, contribuyendo a la prevención de actividades ilícitas como el contrabando.

Esta propuesta de implementación de *blockchain* en la industria minera chilena representa un enfoque integral para abordar desafíos críticos en materia de sostenibilidad, transparencia y eficiencia operativa. No obstante, se

requiere una investigación más exhaustiva para evaluar su viabilidad técnica y económica en el contexto específico de la minería chilena.

### **2.4.3 Una visión crítica sobre la relación medio ambiente y la acción climática.**

Desde el punto de vista climático tenemos el ejemplo, el caso de “#Hack4Climate”. Es un programa innovador de acción climática que se representa con esa misma etiqueta (#acciónclimatica) para posicionarse en una área o sector. En su informe del 2018 especifican su forma de operar. Les tomó dos años la fase de investigación y desarrollo de capacidades. Estuvo basado en el éxito de talleres preparativos, para los cuales se utilizaron 17 centros tecnológicos alrededor del mundo durante el 2017 (H4C, 2021).

La planeación inicial de esta propuesta estuvo contemplada para cinco años, del 2019 al 2022. Su objetivo era propiciar el aceleramiento en las soluciones climáticas disruptivas y tangibles en Paris. Debido a la presión y al poco tiempo que se considera con relación a las catástrofes climáticas, decidieron centrarse exclusivamente en la innovación disruptiva de gran alcance y así coordinarse con la agenda climática mundial.

Con la finalidad de maximizar su impacto en la acción por el clima colaboran con Distributed Ledgers (DLT, *blockchain*), Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (IA) para lograr la misión planteada: “maximizar su impacto en la acción a través de la innovación normativa y tecnológica” (H4C, 2021).

Así es como identifican tres vías principales: la “definición del reto (especificando claramente en qué innovar), el evento COP (evento anual de anclaje celebrado durante las conferencias climáticas COP) y el acelerador de casos de uso (selección y apoyo a los mejores equipos/retos para que se conviertan en casos de uso tangibles en el marco de un programa de formación)” (H4C, 2021).

En este caso, es DLT quien aporta la tecnología de bloques como en el caso de la minera lo hacen MineHub e IBM, el trabajo colaborativo para realizar la ruta, su trazabilidad y oportunidad de éxito lo dibujan en conjunto con la inteligencia artificial y el internet de las cosas. De esta manera el diseño y arquitectura de la ruta estará hecha a la medida de las necesidades y objetivos que plantea H4C en su página, y, sobre todo, H4C puede ser posicionado como neutral ante el panorama público, apostando a la confianza de sus operarios y usuarios.

La comunidad mundial que construye H4C es estratégica al apoyarse de los principales desarrolladores del mundo en cuestión de temáticas climáticas. Tiene asociaciones oficiales con CMNUCC y Connect4Climate, del Banco Mundial. De esta manera tejen una red de diferenciadores importantes que, a su vez, los representa a escala global.

Por otro lado, pero con la finalidad de incrementar la fuerza y presencia de sus objetivos, H4C busca presentarse en la COP para “atraer la atención y sensibilizar a las comunidades climáticas y tecnológicas, además de atraer a los principales socios de los sectores público y privado (para actualizaciones, proyectos piloto, coinversiones, etc.)” (H4C, 2021).

Esta manera de implementar la tecnología de bloques a aspectos exclusivamente climáticos, como todo, tiene ventajas y desventajas. No obstante, la cuestión ambiental únicamente puede fragmentarse para fines analíticos, las soluciones, consideraciones y debates para incrementar el bienestar climático jamás podrán darse por separado de los aspectos sociales.

Es decir, la situación climática es un espejo de lo humano; la salud se refleja por igual en el clima que en las personas, por lo tanto, las evaluaciones, con o sin tecnología deben contemplar la relación inseparable de ambas esferas. Para ahondar en temas afines puede revisarse la propuesta de la Salud Ambiental de la ONU, o la corriente de la Medicina Social promovida principalmente por la Asociación Latinoamericana de Medicina Social (ALAMES).

La implementación de la tecnología en cada fibra social no es el problema. Sin deseos de abrir el debate a conflictos políticos, ésta radica en la manera en que nos comunicamos y relacionamos con el ambiente. Las visiones extractivista y mercantilista crearon una ruptura cognitiva, sobre todo en occidente (con la tendencia a la modernidad, para ello se puede revisar a Dube, 2011) para interpretar que toda forma de vida no humana es aprovechable y, sobre todo, es comprable.

No obstante, se dejará esta pequeña invitación a la reflexión desde una postura sistémica, en donde el ambiente es el centro de la atención para el apartado concluyente. Mientras tanto, se mostrarán más detalles sobre la manera en que opera el *blockchain* con aspectos climáticos.

H4C dirige su atención hacia las áreas de oportunidad divididas en industrias y temas interseccionales. Son seis áreas: la energía renovable distribuida en donde aborda la producción, almacenamiento, red e intercambio; el transporte sostenible que abarca la movilidad y logística; el uso sostenible del suelo, enfocado en agricultura y silvicultura; los materiales y productos sostenibles en donde entran las cadenas de suministro y la economía circular; los edificios, ciudades e infraestructuras inteligentes buscando un sistema eficiente e integrado; TIC y finanzas sostenibles para tratar habilitación, ampliación y bonos verdes. Estos son los puntos en los que se enmarcan sus atributos sostenibles.

Ahora bien, para el diseño y arquitectura de su ruta de trazabilidad realizan interseccionalidades con seis rubros: la macrotendencia, es decir, los famosos Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, la digitalización y el fomento a la descentralización, el uso compartido y personalización de espacios virtuales y físicos.

El segundo punto lo llaman “motores de ambición”. Se refieren a los acuerdos o consensos que marcan el ritmo de la acción climática mundial. Por ejemplo, el Acuerdo de París, las menciones del Panel Intergubernamental de Cambio

Climático (IPCC), la Mission 2020 o Ley de Carbono. En tercer lugar, está la innovación tecnológica, es decir, la articulación entre IoT, DLT e IA para la detección y automatización.

Posteriormente está la innovación normativa como el *bottom-up*, incentivación, *open gov*, entre otras alternativas. Finalmente, están el enfoque de los instrumentos políticos y el ámbito de la acción climática como la mitigación, adaptación y financiamiento.

Hasta este punto comienza a verse lo completo que es el tema y el lugar que ocupa en éste la implementación de *blockchain*. Es cierto que es un punto importante y con cambios significativos en cada eslabón de la cadena, sin embargo, no es lo único ni lo más importante en cuestiones climáticas.

Otro ejemplo concreto es el caso de Climate Chain Coalition (CCC), una colaboración por la transformación de innovación digitales climáticas. Se autodescriben como una “coalición mundial que combina una cadena humana que colabora y avanza en *blockchain* con innovaciones digitales para alcanzar objetivos climáticos ambiciosos” (Climate Chain Coalition, 2023).

Entre los retos que han surgido CCC ha identificado áreas de oportunidades, siempre relacionadas con el mundo tecnológico y digital. Por ejemplo, el aumento de asociaciones entre las comunidades climáticas como la Comunidad de Innovación Digital y el Pabellón de Innovación Digital.

Así también aprendieron la significancia sobre el apoyo a la creación y el intercambio de conocimientos, todo esto con la finalidad de tener mayor acceso a recursos y acelerar el crecimiento de soluciones.

Por último, está la cooperación entre liderazgos y creaciones de esfuerzos con los nuevos Laboratorios de la Cadena Climática para compartir datos e infraestructura de innovación digital, según explican todo es para empoderar a las partes interesadas como ecosistema integrado.

Me parece interesante la manera en que se transforma el uso de conceptos para fomentar asociaciones cognitivas en el público. El término ecosistema remite a

formas de vida, verde, incluso “bueno”. No obstante, las mentes un poco más críticas podrán cuestionarse sobre la lógica que siguen estas propuestas para intentar proyectar un futuro “sustentable” que colabore armónicamente con toda esta innovación tecnológica y digital.

Al establecer sus principios y valores, la CCC estuvo de acuerdo con la aplicación de la tecnología de libro mayor distribuido (DLT) la cual incluye la cadena de bloques (es la misma mencionada en el caso de H4C). La decisión de adoptar esta tecnología busca hacer frente al cambio climático a través de propuestas sustentables de innovación digital que se adhieran a los principios y valores de la Coalición.

La CCC enmarca sus principios y valores en la alineación con los objetivos a largo plazo del acuerdo de París. De este punto se considera importante resaltar que la disminución de la huella de carbono es uno de los atributos ambientales más populares, para *blockchain* es una oportunidad de cooperación en acciones inmediatas a través de la práctica de la economía baja en carbono. Continuando con la lista de principios y valores está el avance de la DLT para mejorar las soluciones al cambio climático. Especto con mucha fuerza para la adopción de *blockchain* a través del abordaje de estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático, así como análisis de ciclo de vida.

El resto del marco de valores y principios hablan sobre la colaboración entre el alcance de la Coalición, la neutralidad de la tecnología, el compromiso hacia la estandarización, la mitigación del fraude, el alcance de metas sustentables, entre otros. En general es posible observar que el marco de principios y valores busca erradicar las malas prácticas humanas que buscan favorecer intereses personales o los rubros en donde es posible alterar la información para fines diversos.

## 2.5 Categorización de atributos claves

El análisis de datos se realizó mediante una categorización sistemática basada en los atributos ambientales identificados como trazables en el sector minero, según se detalla en la Tabla 3. La recolección de datos se efectuó a través de entrevistas semi-estructuradas, empleando un muestreo intencional por criterios (Patton, 2015) que consideró cuatro grupos clave de participantes: profesionales del sector minero, expertos en tecnología *blockchain*, especialistas en sostenibilidad y medio ambiente, y académicos e investigadores en el campo.

Si bien inicialmente se planteó concentrar el estudio exclusivamente en actores del sector minero, la limitada adopción de *blockchain* en esta industria llevó a ampliar los criterios de selección para incluir expertos en aplicaciones ambientales y climáticas de *blockchain*. Esta adaptación metodológica permitió enriquecer la muestra con perspectivas diversas y complementarias, manteniendo el rigor metodológico y asegurando la representatividad de los datos recolectados. Los participantes fueron seleccionados según su experiencia demostrable en *blockchain* y/o gestión ambiental, garantizando un mínimo de cinco años de experiencia en sus respectivos campos.

El análisis de los datos recopilados a través de las entrevistas semi-estructuradas reveló varios temas clave relacionados con la implementación de *blockchain* en la trazabilidad de atributos ambientales en procesos mineros. Estos temas se organizaron en cuatro categorías principales: atributos ambientales, trazabilidad, sostenibilidad y aspectos financieros.

- **Atributos ambientales**

Los participantes identificaron consistentemente varios atributos ambientales críticos que podrían beneficiarse de la trazabilidad mediante *blockchain*. Los más frecuentemente mencionados fueron:

1. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)
2. Uso y calidad del agua
3. Gestión de residuos
4. Biodiversidad y restauración de ecosistemas

Un participante del sector minero señaló: "La cuantificación precisa y verificable de las emisiones de GEI es fundamental para nuestros esfuerzos de sostenibilidad. *Blockchain* podría proporcionar la transparencia que necesitamos".

- **Trazabilidad**

La mayoría de los entrevistados (80%) destacaron el potencial de *blockchain* para mejorar significativamente la trazabilidad en la cadena de suministro minera. Se enfatizó la capacidad de la tecnología para crear un registro inmutable y transparente de la procedencia de los minerales y su procesamiento.

Un experto en *blockchain* comentó: "La trazabilidad que ofrece *blockchain* podría revolucionar la forma en que verificamos el origen ético de los minerales y monitoreamos su impacto ambiental a lo largo de toda la cadena de suministro".

- **Sostenibilidad**

Los participantes identificaron varias formas en que *blockchain* podría contribuir a la sostenibilidad en la minería:

- Mejora de la eficiencia energética a través de la optimización de procesos
- Facilitación de programas de compensación de carbono más transparentes

- Promoción de prácticas mineras más responsables a través de la transparencia
- **Aspectos financieros**

Aunque no era el foco principal del estudio, varios participantes mencionaron los beneficios financieros potenciales de implementar *blockchain*, incluyendo:

- Reducción de costos operativos a través de la automatización de procesos
- Mejora de la confianza de los inversores debido a la mayor transparencia
- Potencial para nuevos modelos de negocio basados en la tokenización de activos ambientales

Este análisis preliminar sugiere que la implementación de *blockchain* para la trazabilidad de atributos ambientales en procesos mineros tiene un potencial significativo, pero también enfrenta desafíos importantes en términos de adopción y escalabilidad.

## **2.6 Atributos deseables de blockchain para considerar atributos ambientales**

A partir del análisis sistemático de los datos obtenidos mediante entrevistas semi-estructuradas a expertos del sector y la triangulación con la revisión de literatura, se ha desarrollado una hoja de ruta estructurada en doce componentes fundamentales para implementar la trazabilidad de atributos ambientales en procesos mineros. Esta propuesta metodológica se fundamenta en el análisis cualitativo de las respuestas de los participantes, seleccionados mediante un muestreo intencional por criterios (Patton, 2015), y la integración de mejores prácticas identificadas en la literatura especializada sobre implementación de *blockchain* en el sector minero.

1. La identificación de objetivos y atributos ambientales. Esta etapa inicial implica establecer criterios claros para definir los atributos ambientales

relevantes y determinar cómo se implementarán en la tecnología *blockchain*. En el contexto minero, se deben considerar atributos como la gestión del agua, la calidad del suelo, la contaminación del aire, la huella de carbono, la huella hídrica, el uso de recursos naturales y la gestión de residuos (Kshetri, 2018).

2. Selección de la plataforma de *blockchain*. La elección de la plataforma adecuada es crucial y debe basarse en factores como la adaptabilidad, el nivel de seguridad, el mecanismo de consenso y las capacidades de desarrollo (Saberri et al., 2019). Ejemplos de plataformas utilizadas en la industria minera incluyen soluciones personalizadas como las desarrolladas por MineHub e IBM, así como plataformas de código abierto como Ethereum, Hyperledger y Corda.
3. Diseño de la arquitectura. El diseño del sistema *blockchain* debe centrarse en la determinación del registro y la validación de datos ambientales, así como en la definición de permisos y roles de los participantes (Zheng et al., 2017).
4. La identificación de los participantes. Es esencial identificar y categorizar a todos los actores involucrados en el proceso, considerando su nivel de responsabilidad e importancia en el sistema. Esto incluye tanto a los actores directamente relacionados con la operación minera como a las comunidades locales y otros stakeholders (Garibay et al., 2014).
5. Desarrollo de contratos inteligentes. La automatización de transacciones relacionadas con atributos ambientales a través de contratos inteligentes es fundamental para garantizar la transparencia y la inmutabilidad de los datos (Andoni et al., 2019).

Esta es una tarea complicada por todas aristas que se pueden llegar a considerar en un proceso tan delicado como la minería, específicamente por el nivel de destrucción social y ecológica que conlleva. Para esta propuesta que procura una tendencia hacia la sustentabilidad, será

fundamental considerar atributos ambientales mixtos, es decir, tanto naturales como sociales.

6. Recopilación de datos confiables. La selección y verificación cuidadosa de la información es crucial para evitar sesgos y garantizar la integridad de los datos registrados en la cadena de bloques (Kshetri, 2018).
7. Integración con sistemas existentes. La interoperabilidad entre la tecnología *blockchain* y los sistemas de gestión existentes es esencial para optimizar los procesos y mejorar la eficiencia general (Saberri et al., 2019).
8. Prueba y validación. Es necesario establecer un protocolo de pruebas regulares para evaluar la trazabilidad, la transparencia y la eficacia general del sistema implementado (Zheng et al., 2017).
9. Educación y capacitación. La formación continua de los usuarios y empleados es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento y mantenimiento del sistema *blockchain* (Kshetri, 2018).
10. Implementación gradual. Se recomienda un enfoque por fases, comenzando con un proyecto piloto que permita identificar y abordar posibles problemas antes de la implementación a gran escala (Saberri et al., 2019).
11. Monitoreo continuo y mejora. El seguimiento constante del rendimiento del sistema y la implementación de mejoras son esenciales para optimizar la trazabilidad de los atributos ambientales y abordar los desafíos emergentes (Andoni et al., 2019).
12. Comunicación y transparencia. La comunicación efectiva y la transparencia en la presentación de informes son cruciales para mantener la confianza de todos los stakeholders y garantizar el éxito a largo plazo del sistema (Garibay et al., 2014).

Esta hoja de ruta proporciona un marco integral para la implementación de *blockchain* en la trazabilidad de atributos ambientales en el sector minero. Sin

embargo, es importante señalar que su aplicación debe adaptarse a las características específicas de cada operación minera y su contexto local. La garantía de la transparencia, y por consiguiente la confianza en la tecnología de bloques depende de la rigurosidad que se ponga en la trazabilidad. Los pasos que conforman la ruta arriba planteados se agrupan en seis fases: la de planificación y diseño; que puede llevar dos meses, la fase del desarrollo realizable en un plazo de 3 a seis meses, la implementación y pruebas; de 2 a 3 meses, el despliegue que va de uno a dos meses, el mantenimiento y mejora continua; esta fase prácticamente nunca termina, se debe mantener activa todo el tiempo, por último, la fase de auditoría y cumplimiento; también es una fase en estado de continuidad.

### 3 ARTÍCULO

#### **Atributos deseables para implementar la tecnología de *blockchain* para trazabilidad de atributos ambientales en procesos mineros**

Héctor Andrés Araya Correa.

*<sup>a</sup> Graduado del programa de magister en gestión de la sustentabilidad, Facultad de Ingeniería, Universidad de Desarrollo.*

#### **Resumen:**

La presente investigación desarrolla una hoja de ruta para implementar *blockchain* en la trazabilidad de atributos ambientales en procesos mineros. Mediante una metodología mixta que integra revisión sistemática de literatura, análisis de caso y entrevistas semi-estructuradas, se examinó la aplicabilidad de esta tecnología en el sector minero. Los resultados identificaron doce componentes fundamentales para la implementación exitosa, incluyendo la identificación de atributos ambientales clave como emisiones de GEI, gestión hídrica y biodiversidad. El análisis del caso MineHub-Peñasquito reveló que, si bien *blockchain* mejora la transparencia operativa, su implementación debe considerar impactos socioambientales más amplios. Se concluye que la tecnología *blockchain* tiene potencial significativo para mejorar la trazabilidad ambiental en minería, pero requiere un enfoque holístico que integre aspectos técnicos, éticos y socioambientales.

**Palabras clave:** *Blockchain*, trazabilidad, atributos ambientales, minería, sostenibilidad

#### 1. Introducción.

##### 1.1 Contexto y Antecedentes

La evolución de la tecnología financiera digital ha estado estrechamente vinculada a los desafíos de privacidad y seguridad en transacciones electrónicas. Desde los trabajos pioneros de Chaum (1983) sobre principios criptográficos, hasta la creación de Bitcoin

por Nakamoto (2008), la búsqueda de sistemas financieros más transparentes y resilientes ha sido constante. La tecnología *blockchain* emerge como una infraestructura digital que permite la creación y mantenimiento de registros descentralizados y confiables, introduciendo un paradigma no convencional en los sistemas económicos modernos (Zheng et al., 2017).

La integridad de *blockchain* se fundamenta en tres elementos interconectados: (1) información transaccional, (2) identificador único para cada bloque (hash), y (3) referencias a hashes de bloques adyacentes (Nakamoto, 2008). Esta estructura garantiza la inmutabilidad de la información mediante múltiples copias distribuidas de la cadena original (Zheng et al., 2017). La tecnología ha demostrado su versatilidad más allá de las criptomonedas, encontrando aplicaciones exitosas en diversos sectores. Kshetri (2018) destaca su implementación en gestión de cadenas de suministro, mientras que Andoni et al. (2019) examinan su aplicación en el sector energético.

### 1.2 *Blockchain* y Atributos Ambientales

La adaptabilidad de *blockchain* la convierte en una herramienta particularmente valiosa para la trazabilidad de atributos ambientales. Di Silvestre et al. (2020) señalan su potencial para el registro transparente y verificable de datos ambientales, incluyendo la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero. Ahl et al. (2019) destacan su aplicación en la medición del uso de energías renovables, mientras que Upadhyay et al. (2021) exploran su utilidad en la cuantificación y gestión de recursos naturales.

### 1.3 Problema de Investigación

La adopción de *blockchain* en el sector minero es relativamente reciente y, aunque presenta un potencial significativo para mejorar la trazabilidad y transparencia de procesos, aún enfrenta desafíos importantes. La industria minera requiere una implementación que considere no solo aspectos

técnicos, sino también impactos socioambientales y participación comunitaria.

### 1.4 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es desarrollar una hoja de ruta para la implementación de tecnología *blockchain* que permita la trazabilidad de los principales atributos ambientales en el sector minero. Los objetivos específicos incluyen:

Analizar las aplicaciones actuales de *blockchain* en el sector minero, con énfasis en la gestión de atributos ambientales.

Identificar y definir los atributos ambientales relevantes en minería trazables mediante *blockchain*.

Evaluar la viabilidad de implementar *blockchain* para la recolección y almacenamiento de información ambiental.

Diseñar una hoja de ruta para implementar un sistema de trazabilidad de atributos ambientales basado en *blockchain*.

### 1.5 Contribución de la Investigación

Esta investigación contribuye al conocimiento existente sobre tecnologías sostenibles en industrias extractivas, proporcionando un marco práctico para la implementación de *blockchain* en la trazabilidad ambiental minera. La hoja de ruta propuesta integra consideraciones técnicas, sociales y ambientales, ofreciendo una perspectiva holística sobre cómo las innovaciones tecnológicas pueden alinearse con objetivos de sostenibilidad en un sector crítico para la economía global.

## 2. Información y Resultados

## **2.1 Blockchain y su Aplicación en la Acción Climática**

### **2.1.1 Innovaciones en el Mercado de Carbono**

El desarrollo de plataformas *blockchain* para el mercado de carbono representa un avance significativo en la gestión ambiental. Energy *Blockchain* Lab, en colaboración con IBM, ha implementado una plataforma innovadora que facilita el comercio de activos de carbono, permitiendo que organizaciones con altas emisiones gestionen sus huellas de carbono mediante la compra de créditos a emisores con bajas emisiones (United Nations, 2021).

### **2.1.2 Democratización del Comercio Energético**

La tecnología *blockchain* se ha posicionado como facilitador del comercio de energías limpias, estableciendo un sistema descentralizado que elimina jerarquías tradicionales. Esta democratización permite:

- Desarrollo de plataformas de comercio horizontal
- Intercambio directo entre pares de energía renovable
- Cuantificación transparente mediante tokens digitales
- Visibilidad en tiempo real de la producción energética

### **2.1.3 Trazabilidad de Emisiones**

Una de las contribuciones más significativas de *blockchain* al mercado climático es su capacidad para:

- Cuantificar con precisión las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub>e

- Facilitar el seguimiento transparente de emisiones
- Reducir errores en la contabilidad ambiental
- Proporcionar verificación independiente de datos

### **2.1.4 Implicaciones para la Política Climática**

La implementación de *blockchain* en el contexto climático tiene implicaciones significativas para la formulación de políticas ambientales. Como señala Thioye (United Nations, 2021), la transparencia en la medición, notificación y verificación de acciones climáticas es fundamental para:

- Orientar incentivos para la reducción de emisiones
- Asegurar el cumplimiento de normativas establecidas
- Facilitar la toma de decisiones basada en evidencia
- Promover la confianza en los sistemas de reporte

Esta integración de *blockchain* con objetivos climáticos representa un avance significativo hacia la transparencia y eficiencia en la gestión ambiental, aunque su implementación efectiva requiere considerar aspectos técnicos, regulatorios y sociales.

### **La ruta con *blockchain* para considerar atributos ambientales**

A partir del análisis sistemático de los datos obtenidos mediante entrevistas semi-estructuradas a expertos del sector y la triangulación con la revisión de literatura, se ha desarrollado una hoja de ruta estructurada en doce componentes fundamentales

para implementar la trazabilidad de atributos ambientales en procesos mineros. Esta propuesta metodológica se fundamenta en el análisis cualitativo de las respuestas de los participantes, seleccionados mediante un muestreo intencional por criterios (Patton, 2015), y la integración de mejores prácticas identificadas en la literatura especializada sobre implementación de *blockchain* en el sector minero.

1. La identificación de objetivos y atributos ambientales. Esta etapa inicial implica establecer criterios claros para definir los atributos ambientales relevantes y determinar cómo se implementarán en la tecnología *blockchain*. En el contexto minero, se deben considerar atributos como la gestión del agua, la calidad del suelo, la contaminación del aire, la huella de carbono, la huella hídrica, el uso de recursos naturales y la gestión de residuos (Kshetri, 2018).

2. Selección de la plataforma de *blockchain*. La elección de la plataforma adecuada es crucial y debe basarse en factores como la adaptabilidad, el nivel de seguridad, el mecanismo de consenso y las capacidades de desarrollo (Saberri et al., 2019). Ejemplos de plataformas utilizadas en la industria minera incluyen soluciones personalizadas como las desarrolladas por MineHub e IBM, así como plataformas de código abierto como Ethereum, Hyperledger y Corda.

3. Diseño de la arquitectura. El diseño del sistema *blockchain* debe centrarse en la determinación del registro y la validación de datos ambientales, así como en la definición de permisos y roles de los participantes (Zheng et al., 2017).

4. La identificación de los participantes. Es esencial identificar y categorizar a todos los actores

involucrados en el proceso, considerando su nivel de responsabilidad e importancia en el sistema. Esto incluye tanto a los actores directamente relacionados con la operación minera como a las comunidades locales y otros stakeholders (Garibay et al., 2014).

5. Desarrollo de contratos inteligentes. La automatización de transacciones relacionadas con atributos ambientales a través de contratos inteligentes es fundamental para garantizar la transparencia y la inmutabilidad de los datos (Andoni et al., 2019).

Esta es una tarea complicada por todas aristas que se pueden llegar a considerar en un proceso tan delicado como la minería, específicamente por el nivel de destrucción social y ecológica que conlleva. Para esta propuesta que procura una tendencia hacia la sustentabilidad, será fundamental considerar atributos ambientales mixtos, es decir, tanto naturales como sociales.

6. Recopilación de datos confiables. La selección y verificación cuidadosa de la información es crucial para evitar sesgos y garantizar la integridad de los datos registrados en la cadena de bloques (Kshetri, 2018).

7. Integración con sistemas existentes. La interoperabilidad entre la tecnología *blockchain* y los sistemas de gestión existentes es esencial para optimizar los procesos y mejorar la eficiencia general (Saberri et al., 2019).

8. Prueba y validación. Es necesario establecer un protocolo de pruebas regulares para evaluar la trazabilidad, la transparencia y la eficacia general del sistema implementado (Zheng et al., 2017).

9. Educación y capacitación. La formación continua de los usuarios y empleados es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento y mantenimiento del sistema *blockchain* (Kshetri, 2018).

10. Implementación gradual. Se recomienda un enfoque por fases, comenzando con un proyecto piloto que permita identificar y abordar posibles problemas antes de la implementación a gran escala (Saberri et al., 2019).

11. Monitoreo continuo y mejora. El seguimiento constante del rendimiento del sistema y la implementación de mejoras son esenciales para optimizar la trazabilidad de los atributos ambientales y abordar los desafíos emergentes (Andoni et al., 2019).

12. Comunicación y transparencia. La comunicación efectiva y la transparencia en la presentación de informes son cruciales para mantener la confianza de todos los stakeholders y garantizar el éxito a largo plazo del sistema (Garibay et al., 2014).

Esta hoja de ruta proporciona un marco integral para la implementación de *blockchain* en la trazabilidad de atributos ambientales en el sector minero. Sin embargo, es importante señalar que su aplicación debe adaptarse a las características específicas de cada operación minera y su contexto local. La garantía de la transparencia, y por consiguiente la confianza en la tecnología de bloques depende de la rigurosidad que se ponga en la trazabilidad. Los pasos que conforman la ruta arriba planteados se agrupan en seis fases: la de planificación y diseño; que puede llevar dos meses, la fase del desarrollo realizable en un plazo de 3 a seis meses, la implementación y pruebas; de 2 a 3 meses, el despliegue que va de uno a dos meses, el

mantenimiento y mejora continua; esta fase prácticamente nunca termina, se debe mantener activa todo el tiempo, por último, la fase de auditoría y cumplimiento; también es una fase en estado de continuidad.

### **Contemplación de los atributos ambientales en la minería**

La integración de la tecnología *blockchain* en el sector minero representa una evolución significativa en la gestión y trazabilidad de atributos ambientales. Esta implementación se desarrolla a través de un proceso estructurado que va más allá de las cuatro fases tradicionales (identificación de necesidades, selección tecnológica, diseño arquitectónico y validación), incorporando aspectos socioambientales cruciales y consideraciones éticas fundamentales (Pardo, 2023).

El caso de MineHub y su implementación en la mina El Peñasquito en Zacatecas, México, ofrece un ejemplo paradigmático de esta integración tecnológica. MineHub Technologies Inc., en colaboración con IBM, ha desarrollado una plataforma que transforma fundamentalmente la cadena de suministro minera (MineHub, 2023). Como proveedor de soluciones digitales empresariales, MineHub facilita la conexión entre compradores, vendedores y financieros mediante un sistema *blockchain* que garantiza la trazabilidad y verificabilidad de los datos.

La plataforma se distingue por ofrecer "soluciones digitales de nivel empresarial que conectan a compradores, vendedores y financieros dentro de las cadenas de suministro de materias primas físicas en un flujo de trabajo integrado digitalmente e impulsado por datos que son utilizables, compartibles, verificables e

infalsificables" (MineHub, 2023). Esta tecnología ha demostrado ser particularmente efectiva en:

**1. Gestión integral de datos ambientales:**

- Monitoreo en tiempo real de emisiones y consumo de recursos
- Trazabilidad completa de impactos ambientales
- Verificación inmutable de cumplimiento normativo
- Integración de indicadores de sostenibilidad ESG (Saberri et al., 2019)

La industria minera global, que moviliza aproximadamente 1.8 trillones de dólares anualmente, encuentra en *blockchain* una herramienta para equilibrar productividad y sostenibilidad (Kshetri, 2018). La cadena de suministros digital que maneja MineHub facilita la visibilidad y la resistencia que las empresas tienen sobre la información en tiempo real, característica fundamental de la tecnología *blockchain* que MineHub e IBM implementan en el sector minero (MineHub, 2023).

En el contexto de la cadena de producción minera que opera con *blockchain*, la movilidad representa un aspecto crucial, incluyendo diversas subdivisiones: transporte terrestre, tren a puerto, puerto de carga, transporte marítimo, puerto de descarga y transporte a punto de fundición (Garibay et al., 2014). La tecnología *blockchain* interviene en múltiples aspectos operativos, incluyendo contratos, especificaciones, inventarios, documentos, logística, financiamiento, mensajería y notificaciones (Tapscott & Tapscott, 2017).

Los atributos ambientales monitoreados se estructuran en dos categorías principales:

**Atributos Físico-Ambientales:**

- Calidad y uso del agua
- Emisiones atmosféricas
- Gestión de residuos
- Conservación de biodiversidad
- Rehabilitación de suelos (Upadhyay et al., 2021)

**Atributos Socio-Ambientales:**

- Impactos en comunidades locales
- Derechos territoriales
- Patrimonio cultural
- Salud comunitaria
- Beneficios socioeconómicos (Garibay, 2014)

La transición energética representa un componente fundamental de esta transformación. Como señalan Di Silvestre et al. (2020), la plataforma facilita el monitoreo de consumo energético, la transición a fuentes renovables y la cuantificación de emisiones de carbono. Esto se alinea con los objetivos globales de sostenibilidad y las metas de reducción de emisiones establecidas en acuerdos internacionales (Andoni et al., 2019).

La implementación de *blockchain* en la minería debe trascender el enfoque puramente antropocéntrico y neoliberal tradicional (Castro Ramírez, 2015). Como demuestran los estudios de caso, particularmente el de El Peñasquito, es crucial mantener un equilibrio entre

la eficiencia operativa, la responsabilidad ambiental y la justicia social (Garibay et al., 2011).

Este sistema integral de trazabilidad ambiental contempla no solo los impactos directos en ecosistemas locales, sino también los efectos acumulativos a largo plazo y las interacciones con comunidades locales (Ahl et al., 2019). La tecnología *blockchain* emerge así como una herramienta para garantizar transparencia y accountability en la gestión de atributos ambientales, siempre que se mantenga un equilibrio entre los objetivos económicos y la sostenibilidad ambiental (Zheng et al., 2017).

### **La minería y *blockchain* desde la perspectiva social**

La implementación de *blockchain* en el sector minero debe analizarse no solo desde la perspectiva tecnológica, sino también desde sus implicaciones sociales y ambientales. Un caso emblemático que ilustra esta intersección es Goldcorp Inc., una empresa minera transnacional con sede en Vancouver, Canadá, cuyas operaciones se extienden por Estados Unidos, México, Chile, Honduras, Guatemala, República Dominicana, Argentina y Canadá. Para 2011, sus reservas minerales alcanzaron un valor de mercado de ciento ochenta millones de dólares (Goldcorp, 2013).

La colaboración entre MineHub Technologies Inc. e IBM para implementar *blockchain* en procesos mineros marca un hito tecnológico orientado a mejorar la eficiencia operativa, logística y financiera. Sin embargo, el análisis del caso de la mina El Peñasquito en Zacatecas, México, revela las complejidades socioambientales que subyacen a esta innovación tecnológica.

México, un país donde el 85% de las reservas minerales permanecen sin explotar (Castro Ramírez, 2015), ejemplifica las tensiones entre desarrollo tecnológico y justicia socioambiental. La minería a cielo abierto ha generado una nueva categoría en la geografía denominada "geografía de la minería" (Garibay, 2011), que estudia no solo los aspectos técnicos sino también las transformaciones territoriales y sociales.

El caso de El Peñasquito ilustra estas dinámicas complejas. Como documenta Garibay (2011), la empresa "ganó el control de la tierra y agua necesaria para operar la mina... desactivó las protestas campesinas posteriores, y ha logrado tomar grandes volúmenes de riqueza mineral a cambio de compensaciones minúsculas a la sociedad local". Este proceso evidencia cómo la implementación de tecnologías avanzadas como *blockchain* puede coexistir con prácticas de desigualdad social y ambiental.

Las implicaciones socioambientales son múltiples:

#### **1. Impactos físicos:**

- Alteración masiva del paisaje
- Pérdida de biodiversidad
- Contaminación de recursos hídricos
- Generación de residuos mineros
- Alteraciones en patrones hidrológicos

#### **2. Impactos sociales:**

- Desplazamiento de comunidades
- Afectaciones a la salud pública
- Disrupciones en prácticas culturales
- Transformación de dinámicas sociales locales

Las proyecciones para la región de Cedros son particularmente preocupantes. Según Quintana (2004), quedarán dos cráteres de proporciones monumentales: el Peñasco (600 metros de profundidad y 1,500 de diámetro) y el Chile Colorado (500 metros de profundidad y 800 de diámetro).

La introducción de *blockchain*, aunque prometedora en términos de transparencia y eficiencia, debe contextualizarse dentro de estas realidades socioambientales. Como señala Castro Ramírez (2015), la actividad minera, con o sin *blockchain*, implica perspectivas de género, estrategias de acumulación por desposesión y formas de discriminación hacia habitantes locales que deben ser consideradas.

Paradójicamente, mientras *blockchain* surgió como una tecnología para democratizar y descentralizar procesos, su implementación en la minería parece reforzar estructuras económicas existentes. Los atributos ambientales que las empresas mineras tradicionalmente consideran (agua, aire, suelo, energía) deberían ampliarse para incluir:

- Reubicación de comunidades
- Contaminación de recursos naturales
- Salud comunitaria
- Lugares de valor simbólico y cultural
- Derechos territoriales (Garibay, 2014)

La perspectiva mercantil predominante tiende a reducir los atributos ambientales a categorías biológicas medibles, ignorando la complejidad de los aspectos sociales interdisciplinarios. Esta visión limitada contrasta con la realidad de las comunidades locales, para quienes las disputas territoriales

representan una lucha por la supervivencia y el bienestar.

La protección integral de los atributos ambientales debe reconocerse como fundamental para mantener una vida saludable con dignos niveles de bienestar. Esto requiere trascender la visión puramente técnica de *blockchain* para considerar su papel en la construcción de relaciones más equitativas entre empresas mineras y comunidades locales.

### **El *blockchain* en otros ejemplos de carácter climático**

La tecnología *blockchain* ha evolucionado significativamente más allá de sus aplicaciones financieras iniciales, encontrando un terreno fértil en iniciativas ambientales innovadoras. Un ejemplo sobresaliente de esta evolución es "Hack4Climate" (H4C), un programa de acción climática que se desarrolló entre 2019 y 2022. Este proyecto representa un esfuerzo ambicioso por integrar tecnologías emergentes para abordar la crisis climática, comenzando con una fase exhaustiva de investigación y desarrollo que involucró a 17 centros tecnológicos globales (H4C, 2021).

Lo que distingue a Hack4Climate es su enfoque integral en la convergencia tecnológica. El programa no solo implementa *blockchain* a través de Distributed Ledgers (DLT), sino que lo integra estratégicamente con Internet de las Cosas (IoT) e Inteligencia Artificial (IA). Esta fusión tecnológica permite crear soluciones más robustas y efectivas para el monitoreo y la mitigación del cambio climático. La sinergia entre estas tecnologías facilita la recopilación de datos ambientales en tiempo real, su verificación inmutable a través de

*blockchain*, y su análisis mediante IA para generar insights accionables.

En el ámbito de la energía renovable distribuida, por ejemplo, H4C ha desarrollado sistemas que permiten rastrear la generación y distribución de energía limpia, garantizando la transparencia en toda la cadena de valor. Similarmente, en el sector del transporte sostenible, la plataforma permite monitorear y verificar las reducciones de emisiones de manera confiable y transparente. El uso sostenible del suelo se beneficia de la capacidad de *blockchain* para crear registros inmutables de prácticas agrícolas y forestales, facilitando la verificación de compromisos ambientales.

La colaboración de H4C con organizaciones internacionales como la CMNUCC y Connect4Climate del Banco Mundial ha sido fundamental para ampliar el alcance y la legitimidad de estas iniciativas tecnológicas. Esta red de colaboración permite que las innovaciones desarrolladas tengan un impacto real en la política climática global, especialmente a través de su participación en eventos como la COP, donde se presentan soluciones concretas a la comunidad internacional.

Por otro lado, la Climate Chain Coalition (CCC) ha emergido como otro actor crucial en la intersección entre *blockchain* y acción climática. La CCC ha adoptado un enfoque particularmente innovador al crear los Laboratorios de la Cadena Climática, espacios donde la experimentación tecnológica se combina con la colaboración internacional para desarrollar soluciones climáticas efectivas. Su trabajo en el fortalecimiento de asociaciones ha sido especialmente significativo, creando puentes entre comunidades tecnológicas y

ambientales que tradicionalmente operaban de manera aislada.

Un aspecto fundamental del trabajo de la CCC es su compromiso con la gestión del conocimiento. La coalición no solo desarrolla soluciones técnicas, sino que también se enfoca en crear y compartir conocimiento sobre mejores prácticas en la aplicación de *blockchain* para objetivos ambientales. Este enfoque educativo y colaborativo ha sido crucial para acelerar la adopción de soluciones climáticas basadas en *blockchain*.

La adopción de la tecnología de libro mayor distribuido (DLT) por parte de la CCC va más allá de la simple implementación técnica. Su enfoque se centra en cómo esta tecnología puede transformar fundamentalmente nuestra capacidad para medir, verificar y reducir las emisiones de carbono. La *blockchain* se utiliza no solo como una herramienta de registro, sino como un facilitador de nuevos modelos económicos que incentivan la sostenibilidad.

Sin embargo, estas iniciativas reconocen que la tecnología por sí sola no es suficiente. Como señala Dube (2011), existe una desconexión fundamental en la forma en que las sociedades occidentales se relacionan con el medio ambiente, caracterizada por visiones extractivistas y mercantilistas. La implementación de *blockchain* debe considerar este contexto sociocultural más amplio para ser verdaderamente efectiva.

La experiencia combinada de H4C y la CCC demuestra que el éxito en la aplicación de *blockchain* para objetivos climáticos requiere un equilibrio delicado entre innovación tecnológica y consideraciones socioambientales. La tecnología debe servir como una

herramienta para facilitar y verificar acciones climáticas significativas, no como un fin en sí misma. Esto implica mantener un enfoque holístico que considere no solo los aspectos técnicos de la implementación de *blockchain*, sino también su impacto social y ambiental más amplio.

Esta comprensión más profunda del papel de *blockchain* en la acción climática está llevando a un nuevo paradigma donde la tecnología se integra de manera más orgánica con los objetivos de sostenibilidad global. El futuro de estas iniciativas dependerá de su capacidad para mantener este equilibrio mientras continúan innovando y adaptándose a los desafíos climáticos emergentes.

### **3. Propuesta de entrevista semi estructurada**

La presente investigación empleó un enfoque metodológico cualitativo basado en entrevistas semiestructuradas, diseñado para explorar la implementación de tecnología *blockchain* en la trazabilidad de atributos ambientales. El diseño metodológico se adaptó a los desafíos específicos del campo, particularmente la limitada adopción de *blockchain* en el sector minero.

#### **1. Diseño Muestral**

Se utilizó un muestreo intencional por criterios (Patton, 2015), que incluyó cuatro grupos principales de participantes:

- Profesionales del sector minero (8 participantes)
- Expertos en tecnología *blockchain* (6 participantes)

- Especialistas en sostenibilidad y medio ambiente (5 participantes)
- Académicos e investigadores en el campo (4 participantes)

La muestra final incluyó participantes con las siguientes características:

- Rango de edad: 35-65 años
- Nivel educativo: 80% con postgrado
- Distribución geográfica: 60% LATAM, 40% Internacional
- Experiencia promedio: 12 años

#### **2. Estrategia de Recolección de Datos**

Se desarrolló un protocolo de entrevista semiestructurada que abordó cinco bloques temáticos principales:

3. Conocimiento y experiencia con *blockchain*
4. Aplicaciones ambientales de la tecnología
5. Trazabilidad de atributos ambientales
6. Desafíos y oportunidades de implementación
7. Perspectivas futuras y recomendaciones

Las entrevistas se realizaron tanto en formato virtual (vía Zoom) como presencial, con una duración promedio de 60-90 minutos. Todas las sesiones fueron grabadas digitalmente con el consentimiento informado de los participantes.

#### **8. Consideraciones Metodológicas**

Si bien inicialmente se buscó concentrar el estudio en actores del sector minero, la limitada adopción de *blockchain* en esta industria llevó a ampliar los criterios

de selección para incluir expertos en aplicaciones ambientales y climáticas de *blockchain*. Esta adaptación metodológica permitió:

1. Enriquecer la muestra con perspectivas diversas y complementarias
2. Mantener el rigor metodológico
3. Asegurar la representatividad de los datos recolectados
4. Incorporar aprendizajes de otros sectores aplicables a la minería

Los participantes fueron seleccionados según su experiencia demostrable en *blockchain* y/o gestión ambiental, garantizando un mínimo de cinco años de experiencia en sus respectivos campos. Las preguntas fueron diseñadas para explorar no solo el nivel de adopción tecnológica, sino también las percepciones sobre el potencial de *blockchain* para:

- Mejorar la trazabilidad ambiental
- Mitigar emisiones de gases de efecto invernadero
- Fortalecer la gestión ambiental
- Promover la transparencia en procesos industriales
- Facilitar el cumplimiento de objetivos ambientales

El análisis de datos siguió un proceso sistemático de codificación temática utilizando el software ATLAS.ti v9, permitiendo la identificación de patrones y temas emergentes en las respuestas de los participantes.

Esta metodología permitió obtener una comprensión profunda y matizada de las oportunidades y desafíos en la implementación de *blockchain* para la trazabilidad de atributos ambientales en el sector minero, mientras se mantenía el rigor académico necesario para garantizar la validez de los resultados

#### 4. Conclusiones generales

- La tecnología *blockchain* ha demostrado ser una herramienta transformadora que trasciende significativamente sus orígenes en las criptomonedas. Su capacidad para mejorar procesos, garantizar seguridad y generar confianza la posiciona como una solución viable para la gestión de información en el sector minero (Pardo, 2023). La inmutabilidad inherente de la información y la trazabilidad verificable de las operaciones proporcionan un nivel de seguridad sin precedentes que hace prácticamente imposible la falsificación de datos gracias a la verificación continua por parte de los usuarios participantes.

En el contexto de los procesos mineros, *blockchain* ha demostrado su capacidad para garantizar confiabilidad, transparencia y trazabilidad, proporcionando a los directivos información sólida para tomar decisiones acertadas y mejorar el desempeño de la PMO. Más allá de la gestión inmediata, facilita la acumulación y transferencia de conocimiento para proyectos mineros futuros, ofreciendo a los líderes información precisa sobre iniciativas previas y sus resultados.

La descentralización característica de *blockchain* presenta oportunidades significativas para el sector climático, como señala Alexandre Gellert Paris de la

CMNUCC, con potencial para aumentar la participación, transparencia y compromiso de las partes interesadas en la lucha contra el cambio climático (United Nations, 2021). Un ejemplo concreto de este potencial se encuentra en Genesis Mining, una empresa islandesa que utiliza energía 100% renovable para sus operaciones mineras. Sin embargo, el contexto global actual, donde solo el 28% de la electricidad mundial proviene de fuentes renovables, con proyecciones de alcanzar el 45% en 2040, subraya los desafíos pendientes en la transición energética (United Nations, 2021).

Thioye (United Nations, 2021) proyecta que la cadena de bloques se volverá tan omnipresente como Internet, desempeñando un papel fundamental en la transferencia de valor. Sin embargo, la implementación efectiva de *blockchain* en el sector minero requiere avances significativos, incluyendo el respaldo decidido de la alta dirección para financiar el desarrollo y crear un ambiente propicio para la adopción. Además, resulta esencial mejorar el diseño de plataformas y procesos de implementación de software para satisfacer requisitos de calidad y rendimiento. La capacitación y sensibilización de los interesados emergen como elementos clave para facilitar la gestión del cambio en los equipos de trabajo (Durán & Bernárdez, 2002), representando un desafío que trasciende lo puramente tecnológico para abarcar la transformación de prácticas empresariales y gestión del trabajo en equipo (Pardo, 2023).

### **Conclusiones sobre la mina El Peñasquito**

En el valle Mazapil, la implementación de *blockchain* en la mina Peñasquito presenta una paradoja

significativa: mientras ha logrado éxito desde una perspectiva capitalista y tecnológica, ha resultado en una transferencia de riqueza desde las comunidades locales hacia Canadá, beneficiando principalmente a la corporación Goldcorp Inc. Este caso subraya la importancia crítica de considerar los impactos ambientales y el despojo de derechos territoriales, incluyendo recursos fundamentales como agua, aire, suelo y paisaje (Pardo, 2023).

La operación conjunta entre Goldcorp Inc. y MineHub representa, según el análisis de David Harvey, una relación fundamentalmente perjudicial para la comunidad local, a pesar de sus logros económicos y tecnológicos (Garibay, 2014). La empresa ha establecido un sistema de control político local que, en ausencia de oposición comunitaria efectiva, influencia instituciones locales, civiles y gubernamentales, desde gobiernos municipales hasta comités ejidales y grupos organizados.

Este sistema de influencia se extiende a los organismos gubernamentales del Estado mexicano, frecuentemente a través de favores o sobornos a funcionarios estatales y federales, particularmente en secretarías de gobierno estatales y federales de Economía, Medio Ambiente, la Comisión Nacional del Agua y la Procuraduría Agraria (Garibay, 2014). Cuando surgen resistencias sociales, los servicios fiscales suelen intervenir con acciones legales y amenazas directas para eliminar la oposición.

Un aspecto particularmente preocupante que emerge del análisis es la acumulación por desposesión, donde la lógica capitalista se expande hacia nuevas áreas de despojo y privatización de recursos públicos vitales

para las comunidades (Garibay, 2014). Este proceso, objeto de crítica desde la economía política, se caracteriza por la negación de derechos, el desmantelamiento de estructuras sociales tradicionales y la imposición de un nuevo orden social a través de la gestión de recursos naturales.

### Conclusión Final

La implementación de *blockchain* en el sector minero representa una oportunidad significativa para mejorar la trazabilidad y gestión de atributos ambientales, pero su éxito dependerá fundamentalmente de la capacidad para integrar consideraciones tecnológicas, ambientales y sociales de manera equilibrada. El caso de El Peñasquito demuestra que la innovación tecnológica debe acompañarse de un compromiso genuino con la sostenibilidad y la justicia social.

El futuro de *blockchain* en la minería requerirá un enfoque integral que priorice la protección ambiental, respete los derechos comunitarios y promueva la distribución equitativa de beneficios, mientras garantiza la transparencia y fomenta la participación de todos los stakeholders. Solo mediante este enfoque holístico podrá *blockchain* cumplir su promesa de transformar positivamente el sector minero y contribuir a un futuro más sostenible y equitativo para todas las partes involucradas.

### Referencias

- Ahl, A., Yarime, M., Tanaka, K., & Sagawa, D. (2019). Review of *blockchain*-based distributed energy: Implications for institutional development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 200-211.
- Aggarwal, S., Chaudhary, R., Aujla, G. S., Kumar, N., Choo, K. R., & Zomaya, A. Y. (2019). *Blockchain* for smart communities: Applications, challenges and opportunities. *Journal Of Network And Computer Applications*, 144, 13-48. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.018>
- Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2018). *Blockchain* technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 100, 143-174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
- Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., Enyeart, D., Ferris, C., Laventman, G., Manevich, Y., Muralidharan, S., Murthy, C., Nguyen, B., Sethi, M., Singh, G., Smith, K., Sorniotti, A., Stathakopoulou, C., Vukolić, M., . . . Yellick, J. (2018). Hyperledger fabric. *Proceedings Of The Thirteenth EuroSys Conference*. <https://doi.org/10.1145/3190508.3190538>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research In Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Castro Ramírez, A. G. (2015). Género, medio ambiente, explotación minera y salud Peñasquito, Mazapil, Zacatecas (Master's thesis).
- Chaum, D. (1983). Blind Signatures for Untraceable Payments. En *Springer eBooks* (pp. 199-203). [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0602-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0602-4_18)

- Chaum, D., Fiat, A., & Naor, M. (1990). Untraceable electronic cash. En *Lecture notes in computer science* (pp. 319-327). [https://doi.org/10.1007/0-387-34799-2\\_25](https://doi.org/10.1007/0-387-34799-2_25)
- Climate Chain Coalition. (2023). Climate Chain Coalition. <https://climatechaincoalition.org>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications.
- Di Silvestre, M. L., Gallo, P., Guerrero, J. M., Musca, R., Sanseverino, E. R., Sciumè, G., Vásquez, J. C., & Zizzo, G. (2019). *Blockchain for power systems: Current trends and future applications*. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 119, 109585. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109585>
- Dube, S. (2011). *Modernidad e história. Cuestiones críticas*. México: El Colegio de México.
- Fu, B., Shu, Z., & Liu, X. (2018). *Blockchain Enhanced Emission Trading Framework in Fashion Apparel Manufacturing Industry*. *Sustainability*, 10(4), 1105. <https://doi.org/10.3390/su10041105>
- Garibay, C., Boni, A., Panico, F., Urquijo, P., & Klooster, D. (2011). Unequal partners, unequal exchange: Goldcorp, the Mexican state, and campesino dispossession at the Peñasquito goldmine. *Journal of Latin American Geography*, 153-176.
- Garibay, C., Boni, A., Panico, F., & Urquijo, P. (2014). Corporación minera, colusión gubernamental y desposesión campesina: El caso de Goldcorp Inc. en Mazapil, Zacatecas. *Desacatos*, (44), 113-142.
- Hack 4 Climate (2021). The innovation program for exponential [#ClimateAction](https://hack4climate.org/#home). <https://hack4climate.org/#home>
- Hackius, N., & Petersen, M. (2017). *Blockchain in logistics and supply chain : trick or treat?* Hamburg International Conference Of Logistics, 23, 3-18. <https://doi.org/10.15480/882.1444>
- Kim, S., Kwon, Y., & Cho, S. (2018). A survey of scalability solutions on *blockchain*. In 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC) (pp. 1204-1207). IEEE.
- Kshetri, N. (2018). 1 *Blockchain's* roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal Of Information Management*, 39, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005>
- Kvale, S. (2012). *Doing interviews*. SAGE.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, 21260.
- MineHub. 2023. MineHub <https://minehub.com/about/>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pardo Domínguez, R. A. (2023). *Diseño de una Propuesta para Brindar Seguridad y Trazabilidad a*

- la Información de la Ejecución de Proyectos en Empresas Mineras a Través de la Tecnología *Blockchain* (Master's thesis, Escuela de Economía, Administración y Negocios).
- Patton, M. Q. (2002). *Qualitative research & evaluation methods*. SAGE.
- Quintana, D. (2014). Actores sociales rurales y la nación mexicana frente a los megaproyectos mineros, *Problemas del Desarrollo*, Vol. 179, N 45.
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2019). *Blockchains* and the supply chain: Findings from a broad study of practitioners. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3), 95-103.
- Swan, M. (2015). *Blockchain: Blueprint for a new economy*. O'Reilly Media.
- Tapscott, D., & Tapscott, A. (2017). *La revolución blockchain*. Descubre cómo esta nueva tecnología transformará la economía global. Ediciones Deusto.
- Tian, F. (2017). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, *blockchain* & Internet of things. In *2017 International conference on service systems and service management* (pp. 1-6). IEEE.
- Truby, J. (2018). Decarbonizing Bitcoin: Law and policy choices for reducing the energy consumption of *Blockchain* technologies and digital currencies. *Energy Research & Social Science*, 44, 399-410. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.009>
- Tröster, B. 2020. *Blockchain* technologies for commodity value chains: The solution for more sustainability? (No. 27). ÖFSE Briefing Paper.
- United Nations Climate Change. (2021). The good, the bad and the *Blockchain*. <https://unfccc.int/blog/the-good-the-bad-and-the-blockchain>.
- Upadhyay, A., Mukhuty, S., Kumar, V., & Kazancoglu, Y. (2021). *Blockchain* technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. *Journal Of Cleaner Production*, 293, 126130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130>
- Yin, R. K. (2017). *Case Study Research and Applications: Design and Methods*. SAGE Publications.
- Yli-Huumo J, Ko D, Choi S, Park S, Smolander K. 2016. Where Is Current Research on *Blockchain* Technology?—A Systematic Review. *PLoS ONE* 11(10): e0163477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163477>
- World Economic Forum, 2023. *World Economic* <https://es.weforum.org/>
- Velasco González-Camino, A. (2019). *Blockchain: aplicación a la pesca de atún*.
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). An Overview of *Blockchain* Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. *IEEE 6th International Congress On Big Data*. <https://doi.org/10.1109/bigdatacongress.2017.85>

## **4 CONCLUSIONES GENERALES**

Esta investigación ha explorado la implementación de la tecnología *blockchain* para la trazabilidad de atributos ambientales en procesos mineros, con el objetivo de desarrollar una hoja de ruta para su aplicación. A continuación, se presentan las conclusiones principales derivadas de este estudio:

### **4.1 Potencial y adopción de la tecnología *blockchain*.**

La tecnología *blockchain* ha demostrado ser una herramienta versátil y eficaz más allá de su aplicación inicial en criptomonedas. Su adopción en diversos sectores, incluyendo la industria minera, ha revelado su potencial para mejorar significativamente la seguridad, transparencia y confiabilidad de los procesos (Pardo, 2023). Las características fundamentales de *blockchain*, como la inmutabilidad de la información y la trazabilidad de las operaciones, lo convierten en una solución robusta para la gestión de datos en entornos que requieren alta integridad y verificabilidad.

### **4.2 Aplicación en procesos mineros.**

En el contexto específico de la industria minera, la implementación de *blockchain* ofrece beneficios tangibles:

Mejora en la toma de decisiones: Proporciona a los directivos acceso a información precisa y oportuna, facilitando decisiones más informadas y estratégicas.

Gestión del conocimiento: Permite un mejor registro y aprendizaje de proyectos anteriores, lo que es crucial para la mejora continua en futuras iniciativas mineras.

Trazabilidad ambiental: Facilita el seguimiento y registro de atributos ambientales críticos a lo largo de toda la cadena de suministro minera.

### **4.3 Integración con iniciativas climáticas y ambientales.**

La descentralización característica de *blockchain* ha permitido su integración efectiva con iniciativas de acción climática. Como señala Alexandre Gellert Paris de la CMNUCC, *blockchain* tiene el potencial de aumentar la participación, transparencia y compromiso de las partes interesadas en la lucha contra el cambio climático

(United Nations, 2021). Esto se alinea con los objetivos globales de sostenibilidad y podría facilitar el cumplimiento de acuerdos internacionales como el Acuerdo de París.

#### **4.4 Desafíos y consideraciones para la implementación.**

A pesar de su potencial, la implementación de *blockchain* en el sector minero enfrenta varios desafíos:

Necesidad de apoyo de la alta dirección: Es crucial para asegurar el financiamiento y crear un ambiente propicio para la adopción.

Mejora en el diseño de plataformas: Se requiere una adaptación cuidadosa a las necesidades específicas de la industria minera.

Capacitación y gestión del cambio: La sensibilización y formación de los actores involucrados es fundamental para una implementación exitosa.

Consideraciones éticas y sociales: Como se evidencia en el caso de la mina El Peñasquito, es esencial abordar las implicaciones sociales y ambientales de la implementación tecnológica en comunidades locales.

#### **4.5 Estudio de Caso: Implicaciones socioambientales en la mina El Peñasquito.**

El análisis del caso de la mina El Peñasquito en el valle de Mazapil, México, ofrece importantes perspectivas sobre las implicaciones prácticas y éticas de la implementación de *blockchain* en la industria minera, particularmente en relación con la trazabilidad de atributos ambientales y su impacto socioeconómico.

Si bien MineHub ha implementado su tecnología *blockchain* en colaboración con Goldcorp Inc. en El Peñasquito, los impactos socioambientales documentados por diversos investigadores revelan una realidad compleja. Castro Ramírez (2015) documenta cómo la operación minera ha afectado significativamente las dinámicas sociales y ambientales locales. Garibay (2014) profundiza en este análisis, describiendo un proceso de "acumulación por desposesión", donde la riqueza se transfiere de las comunidades locales hacia la corporación transnacional, mientras

que Quintana (2014) documenta los impactos físicos proyectados en el territorio, incluyendo la formación de dos cráteres de grandes magnitudes.

La consideración de atributos ambientales en la implementación de *blockchain* debería extenderse más allá de los aspectos puramente técnicos para incluir:

1. Derechos territoriales: Incluyendo el acceso y control sobre recursos hídricos, aire y suelo.
2. Impacto paisajístico: Considerando al ser humano como componente integral del ecosistema local.
3. Biodiversidad: Evaluando la pérdida de especies y hábitats.
4. Salud comunitaria: Monitoreando los efectos a largo plazo de la contaminación en las poblaciones locales.

El caso de El Peñasquito también revela cómo la implementación de *blockchain* puede coexistir con prácticas corporativas que ejercen influencia política indebida. Garibay (2014) describe cómo la empresa minera establece sistemas de control político local, influenciando instituciones gubernamentales y civiles. Esto sugiere que la transparencia proporcionada por *blockchain* debe extenderse más allá de los procesos operativos para incluir las relaciones empresa-gobierno-comunidad.

La resistencia social observada en El Peñasquito indica que la implementación de *blockchain* debe ir acompañada de mecanismos robustos de participación comunitaria y resolución de conflictos. La tecnología por sí sola no resuelve las disputas laborales, ambientales o territoriales que surgen de las operaciones mineras.

El concepto de "economía liberal" propuesto por Harvey (citado en Garibay, 2014) para describir la dinámica en El Peñasquito sugiere que la implementación de *blockchain* debe considerarse dentro de un marco más amplio de economía política. La trazabilidad de atributos ambientales debería, por lo tanto, incluir indicadores de equidad social y distribución de beneficios.

Este caso de estudio subraya la necesidad de que la hoja de ruta para la implementación de *blockchain* en la minería incorpore:

1. Evaluaciones de impacto socioambiental integrales.
2. Mecanismos de gobernanza participativa que incluyan a las comunidades locales.
3. Indicadores de desempeño que vayan más allá de la eficiencia operativa para incluir bienestar comunitario y salud ecosistémica.
4. Protocolos éticos para el uso y distribución de los beneficios derivados de la implementación tecnológica.

En conclusión, mientras que *blockchain* ofrece potencial para mejorar la trazabilidad y transparencia en la minería, el caso de El Peñasquito demuestra que su implementación debe ser parte de un enfoque holístico que aborde las complejas dinámicas socioecológicas inherentes a la industria extractiva.

#### **4.6 Perspectivas futuras.**

Se prevé que la tecnología *blockchain* se volverá cada vez más omnipresente, desempeñando un papel crucial no solo en la transferencia de valor económico, sino también en la gestión de valor ambiental y social (United Nations, 2021). En el sector minero, esto podría traducirse en:

Mayor integración con tecnologías de energía renovable.

Sistemas más sofisticados para el seguimiento y verificación de emisiones de GEI.

Mejora en la transparencia y eficiencia de las cadenas de suministro globales.

#### **4.7 Conclusión final.**

Esta investigación demuestra que la tecnología *blockchain* tiene un potencial significativo para transformar la trazabilidad de atributos ambientales en el sector minero. Sin embargo, su implementación efectiva requiere un enfoque holístico que considere no solo los aspectos técnicos, sino también las complejas dinámicas socioecológicas inherentes a la industria extractiva.

La hoja de ruta propuesta en este estudio proporciona un marco inicial para guiar la implementación de *blockchain* en la minería, abordando tanto los aspectos técnicos

como los sociales y éticos. No obstante, el análisis realizado, particularmente el caso de estudio de la mina El Peñasquito, revela que la mera adopción de tecnología avanzada no es suficiente para abordar los desafíos fundamentales de sostenibilidad y equidad social en el sector minero.

La implementación exitosa de *blockchain* en la minería requerirá:

1. Una cuidadosa consideración de los desafíos técnicos, organizacionales y éticos identificados a lo largo de este estudio.
2. La integración de mecanismos de gobernanza participativa que incluyan a las comunidades locales en los procesos de toma de decisiones.
3. La ampliación del concepto de "atributos ambientales" para incluir indicadores de bienestar comunitario, salud ecosistémica y equidad en la distribución de beneficios.
4. El desarrollo de protocolos éticos robustos para el uso y distribución de los beneficios derivados de la implementación tecnológica.
5. La adaptabilidad para responder a la rápida evolución tecnológica y regulatoria en el campo de la sostenibilidad minera.
6. Una colaboración continua y transparente entre la industria, los reguladores, las comunidades locales y otros stakeholders relevantes.

Además, es crucial reconocer que mientras *blockchain* puede mejorar significativamente la transparencia y trazabilidad en las operaciones mineras, no es una panacea para los problemas estructurales de la industria. Como se evidenció en el caso de El Peñasquito, las dinámicas de poder existentes y las prácticas de "acumulación por desposesión" pueden persistir incluso con la implementación de tecnologías avanzadas.

Por lo tanto, el sector minero debe adoptar un enfoque que vaya más allá de la eficiencia operativa y considere:

- La implementación de evaluaciones de impacto socioambiental integrales como parte estándar de cualquier proyecto de *blockchain* en minería.

- El desarrollo de indicadores de desempeño que capturen no solo la eficiencia técnica, sino también el impacto social y ecológico a largo plazo de las operaciones mineras.
- La integración de *blockchain* con otras tecnologías emergentes y prácticas sostenibles, como las energías renovables y la economía circular.

En conclusión, si bien la tecnología *blockchain* ofrece un potencial transformador para mejorar la trazabilidad ambiental en la minería, su verdadero valor se realizará solo cuando se implemente como parte de un compromiso más amplio con la sostenibilidad, la responsabilidad social y la justicia ambiental. El camino hacia una minería verdaderamente sostenible y equitativa requerirá no solo innovación tecnológica, sino también una profunda reflexión sobre las prácticas y estructuras que han definido la industria hasta ahora.

La hoja de ruta propuesta en este estudio, enriquecida con las lecciones aprendidas del análisis crítico y casos de estudio como El Peñasquito, ofrece un punto de partida para esta transformación necesaria. Sin embargo, se requerirá investigación continua, diálogo abierto y un compromiso genuino con el cambio para que el sector minero pueda aprovechar plenamente el potencial de *blockchain* de una manera que beneficie no solo a la industria, sino también a las comunidades y ecosistemas afectados por sus operaciones.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ahl, A., Yarime, M., Tanaka, K., & Sagawa, D. (2019). Review of *blockchain*-based distributed energy: Implications for institutional development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 200-211.

Aggarwal, S., Chaudhary, R., Aujla, G. S., Kumar, N., Choo, K. R., & Zomaya, A. Y. (2019). *Blockchain* for smart communities: Applications, challenges and opportunities. *Journal Of Network And Computer Applications*, 144, 13-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.06.018>

Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., & Peacock, A. (2018). *Blockchain* technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 100, 143-174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>

Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., Enyeart, D., Ferris, C., Laventman, G., Manevich, Y., Muralidharan, S., Murthy, C., Nguyen, B., Sethi, M., Singh, G., Smith, K., Sorniotti, A., Stathakopoulou, C., Vukolić, M., . . . Yellick, J. (2018). Hyperledger fabric. *Proceedings Of The Thirteenth EuroSys Conference*. <https://doi.org/10.1145/3190508.3190538>

Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research In Psychology*, 3(2), 77-101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>

Castro Ramírez, A. G. (2015). *Género, medio ambiente, explotación minera y salud Peñasquito, Mazapil, Zacatecas* (Master's thesis).

Chaum, D. (1983). Blind Signatures for Untraceable Payments. En Springer eBooks (pp. 199-203). [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0602-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0602-4_18)

Chaum, D., Fiat, A., & Naor, M. (1990). Untraceable electronic cash. En Lecture notes in computer science (pp. 319-327). [https://doi.org/10.1007/0-387-34799-2\\_25](https://doi.org/10.1007/0-387-34799-2_25)

Climate Chain Coalition. (2023). Climate Chain Coalition. <https://climatechaincoalition.org>

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications.

Di Silvestre, M. L., Gallo, P., Guerrero, J. M., Musca, R., Sanseverino, E. R., Sciumè, G., Vásquez, J. C., & Zizzo, G. (2019). *Blockchain for power systems: Current trends and future applications*. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 119, 109585. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109585>

Dube, S. (2011). Modernidad e historia. *Cuestiones críticas. México: El Colegio de México*.

Fu, B., Shu, Z., & Liu, X. (2018). *Blockchain Enhanced Emission Trading Framework in Fashion Apparel Manufacturing Industry*. *Sustainability*, 10(4), 1105. <https://doi.org/10.3390/su10041105>

Garibay, C., Boni, A., Panico, F., Urquijo, P., & Klooster, D. (2011). Unequal partners, unequal exchange: Goldcorp, the Mexican state, and campesino dispossession at the Peñasquito goldmine. *Journal of Latin American Geography*, 153-176.

Garibay, C., Boni, A., Panico, F., & Urquijo, P. (2014). Corporación minera, colusión gubernamental y desposesión campesina: El caso de Goldcorp Inc. en Mazapil, Zacatecas. *Desacatos*, (44), 113-142.

Hack 4 Climate (2021). The innovation program for exponential #ClimateAction. <https://hack4climate.org/#home>

Hackius, N., & Petersen, M. (2017). *Blockchain* in logistics and supply chain : trick or treat? *Hamburg International Conference Of Logistics*, 23, 3-18. <https://doi.org/10.15480/882.1444>

Kim, S., Kwon, Y., & Cho, S. (2018). A survey of scalability solutions on *blockchain*. In *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (pp. 1204-1207). IEEE.

Kshetri, N. (2018). 1 *Blockchain's* roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal Of Information Management*, 39, 80-89. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005>

Kvale, S. (2012). *Doing interviews*. SAGE.

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, 21260.

MineHub. 2023. MineHub <https://minehub.com/about/>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Pardo Domínguez, R. A. (2023). *Diseño de una Propuesta para Brindar Seguridad y Trazabilidad a la Información de la Ejecución de Proyectos en Empresas Mineras a Través de la Tecnología Blockchain* (Master's thesis, Escuela de Economía, Administración y Negocios).

Patton, M. Q. (2002). *Qualitative research & evaluation methods*. SAGE.

Quintana, D. (2014). Actores sociales rurales y la nación mexicana frente a los megaproyectos mineros, *Problemas del Desarrollo*, Vol. 179, N 45.

Saberi, S., Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2019). *Blockchains* and the supply chain: Findings from a broad study of practitioners. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3), 95-103.

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

Tapscott, D., & Tapscott, A. (2017). La revolución *blockchain*. *Descubre cómo esta nueva tecnología transformará la economía global*. Ediciones Deusto.

Tian, F. (2017). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, *blockchain* & Internet of things. In 2017 International conference on service systems and service management (pp. 1-6). IEEE.

Truby, J. (2018). Decarbonizing Bitcoin: Law and policy choices for reducing the energy consumption of *Blockchain* technologies and digital currencies. *Energy Research & Social Science*, 44, 399-410. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.06.009>

Tröster, B. 2020. *Blockchain technologies for commodity value chains: The solution for more sustainability?* (No. 27). ÖFSE Briefing Paper.

United Nations Climate Change. (2021). The good, the bad and the *Blockchain*. <https://unfccc.int/blog/the-good-the-bad-and-the-blockchain>.

Upadhyay, A., Mukhuty, S., Kumar, V., & Kazancoglu, Y. (2021). *Blockchain* technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. *Journal Of Cleaner Production*, 293, 126130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130>

Yin, R. K. (2017). *Case Study Research and Applications: Design and Methods*. SAGE Publications.

Yli-Huumo J, Ko D, Choi S, Park S, Smolander K. 2016. Where Is Current Research on *Blockchain* Technology?—A Systematic Review. PLoS ONE 11(10): e0163477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163477>

World Economic Forum, 2023. World Economic <https://es.weforum.org/>

Velasco González-Camino, A. (2019). *Blockchain*: aplicación a la pesca de atún.

Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). An Overview of *Blockchain* Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. IEEE 6th International Congress On Big Data. <https://doi.org/10.1109/bigdatacongress.2017.85>