

## 6. De la extracción a la regeneración: La transformación innovadora y sostenible en la minería a través de la economía circular



EDGAR JAVIER MÉNDEZ-ROSALES<sup>1</sup>

DENISE MARGARITA RIVERA-RIVERA<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.365.06>

### Resumen

La minería ha desempeñado un rol fundamental en el progreso económico y tecnológico a lo largo de la historia, impulsando la modernización y desarrollo en numerosos países. Sin embargo, su práctica convencional genera impactos ambientales considerables, como alteración de recursos hídricos, degradación del suelo y emisión de contaminantes que afectan la calidad del aire. Este escenario resalta la urgencia de adoptar un enfoque orientado a mitigar dichos efectos. Desde finales de los años 70, el paradigma de economía circular ha cuestionado los modelos lineales, que conciben los recursos naturales como simples insumos y los residuos como subproductos inevitables. En este contexto, la minería circular redefine los desechos como recursos valiosos, promoviendo el diseño de productos para su reutilización y reciclaje, y desvinculando el crecimiento económico del consumo intensivo. El presente capítulo tiene por objetivo examinar el estado actual de la minería circular mediante ejemplos de remediación de vertederos, reciclaje de metales y minerales, aprovechamiento de relaves, cierres regenerativos de minas, uso de energías renovables y diseño de productos reciclables. A través de una revisión de casos de éxito, tendencias emergentes, desafíos y direcciones futuras a nivel global y de la integración del análisis de marcos

<sup>1</sup> Maestro en Ciencias Administrativas en el Área Recursos Humanos. Docente de tiempo completo asociado A en la Universidad Autónoma de Nayarit, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2212-7542>

<sup>2</sup> Doctora en Ciencias en Conservación del Patrimonio Paisajístico. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0877-2390>

normativos, esquemas de infraestructura y modelos de colaboración intersectorial, se identifican estrategias clave para superar barreras tecnológicas, operacionales y económicas.

Adoptar este enfoque maximizará la recuperación de materiales, aumentará la eficiencia en el uso de recursos y reducirá la huella ecológica del sector, promoviendo la regeneración de ecosistemas y el bienestar ambiental a largo plazo.

**Palabras clave:** *industria minera, impactos ambientales, economía circular, reciclaje, relaves, regeneración de minas.*

## Introducción

La minería es la actividad industrial dedicada a la prospección, extracción y procesamiento de minerales. Desde el Paleolítico, el aprovechamiento de materiales como sílex y metales nativos permitió la confección de herramientas y construcciones rudimentarias. Con la Revolución Industrial, la explotación intensiva del hierro y carbón impulsó la producción de acero y el desarrollo de motores de combustión, detonando profundas transformaciones tecnológicas y socioeconómicas (Fodor, 2024). Hoy en día, la minería suministra insumos imprescindibles para infraestructura de vanguardia: semiconductores, baterías de iones de litio, turbinas eólicas y sistemas de transporte electrificado, manteniéndose como motor esencial del progreso técnico y de la mejora continua de la calidad de vida. Asimismo, genera empleo local y facilita la construcción de infraestructura básica como energía eléctrica y agua potable, cimentando el desarrollo de sectores tan diversos como el agroindustrial, el automotriz y el farmacéutico (Pons et al., 2021).

Como proveedor de materias primas, este sector minero también se refleja en las “rentas minerales” que muestran su aporte al PIB global. Según el Banco Mundial, las rentas minerales representaron en 2021 el 0.8% del PIB mundial, un indicador de la relevancia económica del subsector (World Bank, 2023). Para atender la creciente demanda de minerales críticos en energías renovables, baterías y electrónica avanzada, la Agencia In-

ternacional de la Energía estima que harán falta inversiones por 590 mil millones de USD en nuevos yacimientos hasta 2040 bajo el ‘Escenario de Promesas Anunciadas’ (*Announced Pledges Scenario-APS*) y hasta 800 mil millones USD en el ‘Escenario de Cero Emisiones Netas para 2050’ (*Net Zero Emissions by 2050 Scenario-NZE*) (IEA, 2024a). En México, la minería aporta cerca del 2.5% del PIB nacional, figura como tercera fuente de divisas, lidera la producción mundial de plata y se ubica entre los diez principales productores de dieciséis minerales estratégicos, incluyendo oro, cobre, zinc y molibdeno (Secretaría de Economía, 2024).

Pese a su relevancia económica y social, la minería ha sido objeto de críticas por sus impactos ambientales, entre los que destacan la degradación de paisajes, el consumo intensivo de agua y la generación de residuos. En 2018, se calculó que la extracción y procesamiento primario de minerales y metales fueron responsables del 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) asociados al sector energético (Azadi et al., 2020) y de aproximadamente el 7% de la deforestación mundial, situándose como la cuarta causa principal de pérdida de hábitat forestal y de su consiguiente impacto climático (World Bank, 2019). Gran parte de estos efectos se explica por la ausencia histórica de marcos regulatorios y tecnologías de mitigación capaces de proteger ecosistemas y comunidades locales (Lèbre et al., 2020). No obstante, ante la creciente presión social y la necesidad imperiosa de responder a los retos ambientales y sociales, la hipótesis central del presente trabajo sostiene que la adopción de prácticas de minería circular (que integren la reducción, reutilización, reciclaje y valorización de subproductos a lo largo de toda la cadena de valor) tiene el potencial de transformar los procesos mineros convencionales, minimizando sus impactos ambientales y, simultáneamente, generando beneficios socioeconómicos que impulsen un desarrollo verdaderamente sostenible.

El objetivo de este estudio es examinar el estado actual de la minería circular mediante ejemplos de remediación de vertederos, reciclaje de metales y minerales, aprovechamiento de relaves, cierres regenerativos de minas, uso de energías renovables y diseño de productos reciclables. Combina la revisión de casos de éxito, tendencias emergentes y direcciones futuras con un análisis de esquemas de infraestructura y modelos colaborativos. A partir de esta revisión, se han identificado tecnologías clave y agrupado

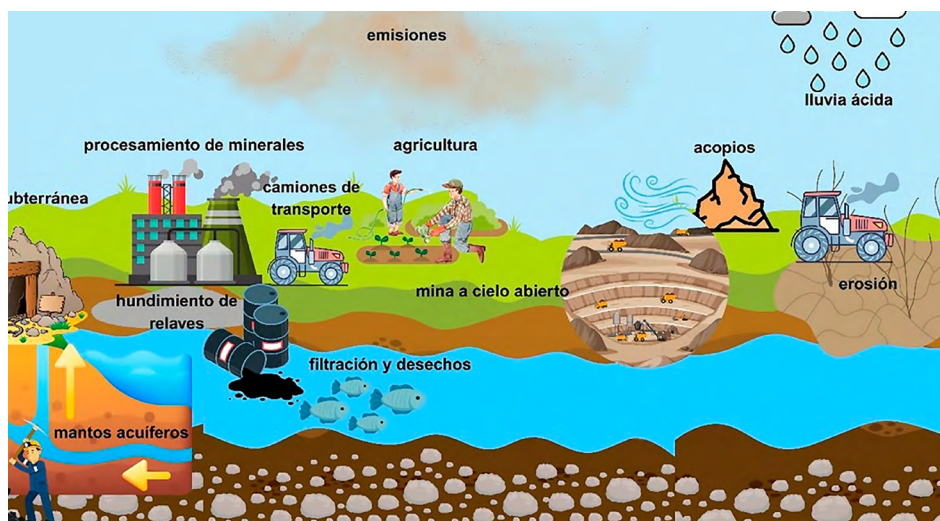
los principales retos técnicos, operativos y financieros junto a estrategias recomendadas para abordarlos.

Enmarcado en *Economía circular mexicana*, este capítulo aporta una perspectiva práctica y crítica que refuerza las rutas de acción para políticas públicas y prácticas empresariales centradas en el cierre de ciclos y la restauración ambiental.

## Impactos generados por la minería

La industria minera es un sector con gran exposición pública debido a los impactos ambientales que genera en cada fase del ciclo extractivo y de procesamiento (Rodriguez y Mendes, 2018) (figura 6.1).

Figura 6.1. Impactos ambientales generados por la minería



Fuente: elaboración propia.

En términos hídricos, las operaciones mineras suelen requerir bombeo continuo para extraer agua de los tajos, lo que altera acuíferos y modifica la hidrología local; además, el contacto del agua con sulfuros expuestos da lugar al drenaje ácido de minas, cuyos efluentes de pH bajo y elevada carga de metales pesados contaminan ríos y mantos acuíferos, comprometiendo

la disponibilidad y calidad del agua para comunidades y ecosistemas aguas abajo (Ramana et al., 2025). En el suelo, los relaves y escombreras, cargados de residuos químicos y metales tóxicos, se infiltran en él, alteran su estructura y reducen su fertilidad, mientras que las fugas accidentales o la lixiviación al aire libre perpetúan la contaminación del terreno (Ali et al., 2021). Por su parte, la trituración, el transporte de rocas y las explosiones controladas generan nubes de polvo con partículas  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  que deterioran la calidad del aire, mientras que las plantas de beneficio y fundiciones emiten gases como dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), contribuyendo a la formación de lluvia ácida y a afecciones respiratorias en las poblaciones cercanas (Moghimi Dehkordi et al., 2024). A escala paisajística, la remoción masiva de material, la deforestación y la fragmentación de hábitats provocan cambios irreversibles en el relieve, aumentando la erosión y la inestabilidad de suelos, y ocasionando pérdidas significativas de biodiversidad (Sonter et al., 2020).

Estos impactos ambientales se traducen en efectos sociales que han intensificado los conflictos en las zonas mineras. Las comunidades locales suelen asociar la minería con la contaminación de fuentes hídricas, emisiones tóxicas y problemas de salud, al tiempo que perciben una escasa generación de empleo estable y compensaciones insuficientes por los daños sufridos. Esta sensación de exclusión y falta de retribución ha dado lugar a protestas y bloqueos, pues los habitantes consideran que la actividad extractiva deteriora sus recursos y calidad de vida sin aportar un desarrollo local sostenible (Cotrina-Teatino y Marquina-Araujo, 2025).

Frente a este panorama, la minería circular surge como un enfoque integral que no solo busca minimizar los impactos descritos, sino también transformar los pasivos ambientales en recursos valiosos para la regeneración de paisajes y ecosistemas. Al mismo tiempo, el fortalecimiento de los marcos normativos y la exigencia de planes de cierres y rehabilitación obligatorios están consolidando un nuevo estándar: ya no basta con extraer, sino que es imprescindible devolver al territorio condiciones que garanticen su sostenibilidad a largo plazo (Born, 2025a). En la siguiente sección se abordará las generalidades de este paradigma, sus principios operativos y cómo sienta las bases para casos de éxito en minería circular.

## Generalidades de la minería circular

El concepto de *economía circular* surge como un paradigma capaz de reemplazar el modelo lineal basado en extraer-producir-desechar, por un sistema profundo y regenerativo que prioriza la eficiencia de materiales y la minimización de residuos de máximo nivel (De Jesus y Mendonça, 2018). Según la Comisión Europea (European Commission, 2020), la economía circular se define como un sistema económico de producción y consumo que amplía el horizonte del “fin de vida útil” de los productos, incentivando la reducción, la reutilización, el reciclaje y la recuperación de materiales en todas las etapas de los ciclos productivos y de consumo (Kirchherr y Van Santen, 2019). Su propósito central es cerrar dichos ciclos: mantener los productos y materiales en uso el mayor tiempo posible, regenerar los sistemas naturales y reducir drásticamente los flujos de desechos y contaminación, apoyándose en recursos renovables, mejores prácticas de diseño (ecodiseño) y una planificación transparente y resiliente (Botelho Junior et al., 2023). Originado conceptualmente en la década de 1960 y consolidado en las últimas décadas en países de Europa, Asia y América, este modelo ha demostrado su capacidad para impulsar la equidad social, la prosperidad económica y la calidad ambiental de manera simultánea (Liu et al., 2019).

Aplicado al sector minero, este mismo marco permite un contraste nítido con el modelo tradicional (figura 6.2), en el cual la extracción del mineral, su procesamiento y disposición de relaves generan elevados consumos de agua y energía, enormes volúmenes de residuos y pasivos ambientales difíciles de mitigar (Acordi et al., 2023; Oliveira et al., 2023). La minería circular propone, en cambio, replantear cada fase del proceso: desde el ecodiseño de las instalaciones para facilitar el desmontaje y reutilización de equipos, hasta la implantación de flotas optimizadas alimentadas con energías renovables que reduzcan pérdidas operativas (Vilaça et al., 2022). Mediante tecnologías de recuperación de metalúrgica avanzada y enfoques de simbiosis industrial, se valoriza el material residual, mientras que los ciclos de agua se cierran mediante tratamiento *in situ* y reúso continuo de efluentes. Estas prácticas no solo potencian la eficiencia en el uso de recursos, sino que también contribuyen de manera significativa a la miti-

Figura 6.2. Flujo lineal de la minería tradicional



Fuente: elaboración propia.

gación del cambio climático, al reducir emisiones y la huella hídrica del sector (ICMM, 2022). La figura 6.3 ilustra la transformación, oponiendo el flujo lineal convencional al ciclo regenerativo de la minería circular, en el que los pasivos ambientales se convierten en insumos valiosos para nuevas etapas de producción.

Figura 6.3. Ciclo regenerativo de la minería circular



Fuente: elaboración propia.

Existen diversas estrategias de economía circular en la minería que han demostrado reducir significativamente la huella ambiental, el consumo de materiales y los volúmenes de residuos (tabla 6.1). Entre ellas se encuentran la optimización del uso de agua dulce mediante circuitos hidráulicos cerrados y tecnologías de recirculación (Hamraoui et al., 2024; Jamett et al., 2022), la valorización de relaves como materias primas secundarias para otras industrias (Kinnunen et al., 2022) y la remanufactura de componentes de maquinaria pesada para prolongar su vida útil (Cister-

nas et al., 2022). Este impulso hacia modelos regenerativos no sólo está presente en la academia, donde el debate sobre la economía circular ha crecido exponencialmente en los últimos años (Kalmykova et al., 2018) sino también en el ámbito político y empresarial, donde cada vez más compañías exploran esquemas de negocio basados en la circularidad (Hernández-Chea et al., 2021).

Tabla 6.1. *Prácticas de minería circular: Mitigación de impactos ambientales y beneficios socioeconómicos*

| <i>Práctica circular</i>                | <i>Reducción de consumo de agua</i>                       | <i>Mejora de la calidad del suelo</i>             | <i>Disminución de emisiones atmosféricas</i>                                              | <i>Restauración paisajística</i>                    | <i>Beneficios socioeconómicos</i>                                                                                                   |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Circuitos hidráulicos cerrados          | Evitan extracción externa y sobreexplotación de acuíferos |                                                   |                                                                                           |                                                     | Reducción de costos en compra y tratamiento de agua: menor riesgo de conflictos por recurso hídrico                                 |
| Valorización de relaves                 |                                                           | Reduce depósitos de químicos en escombreras       |                                                                                           |                                                     | Ingresos adicionales por venta de subproductos; diversificación de materias primas; generación de empleo en plantas de recuperación |
| Ecodiseño y remanufactura de maquinaria |                                                           |                                                   | Menor uso de combustibles fósiles al optimizar flotas y prolongar la vida útil de equipos |                                                     | Ahorro en inversión de nuevos equipos; creación de empleos verdes en reparación y refabricación                                     |
| Relleno de tajos con materiales inertes |                                                           | Recupera relieve original y facilita revegetación |                                                                                           | Favorece la recuperación del paisaje tras el cierre | Disminución de pasivos ambientales y de gastos futuros de remediación; potencial para desarrollo de usos recreativos o turísticos   |

Fuente: elaboración propia.

Los residuos mineros pueden provenir de insumos primarios (relaves, desechos de roca y escorias generados en la extracción y beneficio) y de insumos secundarios (maquinaria antigua, piezas, productos químicos,



aceites y lubricantes) que, al finalizar su vida útil, se convierten en desechos (Born, 2025). La recuperación de estos materiales se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 (consumo y producción responsables) de la ONU, pues no solo disminuye la extracción de materias primas vírgenes, sino que a menudo mejora la eficiencia de los procesos metalúrgicos al reintroducir componentes valiosos en el circuito productivo (Aro-ra et al., 2021). Incluso en sectores paralelos, como el manejo de residuos electrónicos, la recuperación avanzada de metales compite ya con la minería tradicional en términos de rendimiento y pureza (Zeng et al., 2018).

Una vez concluida la fase productiva, muchas minas quedan abandonadas con paisajes degradados y pasivos ambientales difíciles de restaurar. Para revertirlo, se han desarrollado estrategias que incluyen el relleno de tajos con materiales inertes, el tratamiento químico de efluentes (por ejemplo, neutralización de cianuros), el control de drenaje ácido, el confinamiento de residuos peligrosos y el uso de agentes biológicos para inmovilizar metales pesados. Estas prácticas, reflejo de la conciencia ambiental iniciada con el Informe Brundtland (1987) y del fortalecimiento normativo posterior, han desembocado en legislaciones que exigen planes de cierre y rehabilitación obligatorios. En muchos países desarrollados, ya es norma reconvertir sitios mineros para usos alternativos (como áreas recreativas o turísticas), pues la competitividad global incorpora cada vez más criterios de desempeño ambiental y social. La contribución sustancial de las prácticas de EC a la recuperación de estos sitios abandonados del sector minero hace hincapié en la utilización colaborativa de los recursos y las reformas de políticas como componentes esenciales (Okoye, 2025).

El manejo eficiente del agua es quizás la práctica más crítica en la minería circular. La adopción de circuitos hidráulicos completamente cerrados permite recircular el agua del proceso, supliendo únicamente las pérdidas por evaporación o las demandas de riego en viveros y uso domiciliario, mientras que la construcción de depósitos impermeables facilita la captura de agua de lluvia y su reinyección al sistema. Este diseño evita derrames accidentales hacia cauces superficiales o acuíferos, reduce la extracción de fuentes externas y garantiza un suministro estable para las operaciones y para la restauración postcierre. De este modo, la industria no solo minimiza su consumo de agua dulce, sino que se integra de manera

más armónica con los ciclos hidrológicos locales (Mishra et al., 2025). ¿Cómo se traducen en la práctica estos principios de economía circular dentro de la minería? En el siguiente apartado se exploran casos reales que ejemplifican estrategias innovadoras de minería circular.

## Casos de aplicación de Minería Circular

En esta sección se analizan seis técnicas fundamentales de minería circular, cada una ilustrada con una tabla que resume sus resultados más relevantes: remediación de vertederos (tabla 6.2), reciclaje de metales y minerales (tabla 6.3), aprovechamiento de relaves (tabla 6.4), cierres regenerativos de minas (tabla 6.5), uso de energías renovables (tabla 6.6) y diseño de productos reciclables (tabla 6.7). Cada tabla sintetiza los datos clave para mostrar cómo estas iniciativas han logrado cerrar ciclos de materiales, reducir pasivos ambientales y generar valor local. Así, se muestra la evidencia práctica que respalda el potencial transformador de la minería circular en distintos contextos internacionales.

### Remediación de vertederos

En Perú, el Ministerio de Energía y Minas identificó 8949 pasivos ambientales mineros (PAM), de los cuales cerca de 1200 ya están siendo remediados; en La Oroya, por ejemplo, se encapsularon relaves con alta concentración de plomo y arsénico bajo suelos tratados con enmiendas orgánicas, logrando una reducción del 60% de la biodisponibilidad de estos metales y ahorros en infraestructura pública de hasta 15 millones de USD al año gracias a la reutilización de esos mismos relaves (Quispe, 2024). En Chile, líder mundial de cobre, la estrategia de minería urbana prioriza depósitos de relaves (hoy más del 95% del mineral procesado) almacenándolas en presas cercanas y aprovechando su potencial futuro de recuperación, un enfoque que anticipa el aumento de la generación de relaves en 3.25 veces para 2035 y abre nuevas vías de valorización (Monardes y Sepúlveda, 2023). Por su parte, en Polonia la firma SRK S.A. ha convertido una antigua mina de carbón en un

centro de energía renovable: las aguas ácidas que antes representaban un pasivo se usan ahora en electrólisis para producir hidrógeno verde, cubriendo el 80% de la demanda energética del sitio y reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> en 12 mil toneladas al año, un prototipo replicable en otras regiones carboníferas (Magdziarczyk et al., 2024) (tabla 6.2).

Tabla 6.2. *Remediación de vertederos*

| <i>Caso</i>                   | <i>País</i> | <i>Enfoque principal</i>                     | <i>Tecnología/Método</i>                              | <i>Resultado cuantificable</i>                            | <i>Escalabilidad</i>                          |
|-------------------------------|-------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Gestión de PAM                | Perú        | Encapsulación de relaves con metales tóxicos | Cobertura con suelos tratados con enmiendas orgánicas | Reducción del 60% en biodisponibilidad de metales tóxicos | 8,949 PAM identificados, 1,200 en remediación |
| Depósitos mineros             | Chile       | Caracterización de relaves                   | No especificado en detalle                            | Proyección de aumento 3.25 veces para 2035                | Representa el 95% del mineral procesado       |
| Transición en minas de carbón | Polonia     | Reconversión a centro de energía renovable   | Granjas fotovoltaicas y sistemas de hidrógeno         | Reducción de 12,000 ton anuales de CO <sub>2</sub>        | Replicable en regiones carboníferas           |

Fuente: elaboración propia con información de Quispe (2024), Monardes y Sepúlveda (2023) y Magdziarczyk et al. (2024).

## Reciclaje de minerales

En Chile, la División el Teniente de Codelco, la mayor mina subterránea de cobre del mundo creó en 2022 una unidad de economía circular enfocada en la simbiosis industrial; recicla acero, ropa usada y neumáticos provenientes de sus operaciones, cerrando el ciclo de materiales desde la extracción y minimizando la dependencia de recursos vírgenes. Finalmente, en esa misma región, la siderúrgica AZA aprovecha más de 600 000 toneladas anuales de chatarra ferrosa (bolas de molienda estructuras y maquinaria minera) para producir hasta 520 000 toneladas de acero, que retorna a la mina en forma de pernos y componentes, demostrando que el acero es 100% circular y reduciendo significativamente el consumo de agua, energía y emisiones de CO<sub>2</sub> (Soler Alvarado, 2024) (tabla 6.3).

Tabla 6.3. *Reciclaje de metales y minerales*

| Caso                  | País  | Tipo de operación         | Materiales reciclados                          | Sistema implementado                      | Logros destacados                                      |
|-----------------------|-------|---------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| División El Teniente  | Chile | Mina subterránea de cobre | Residuos industriales, acero, ropa, neumáticos | Unidad de economía circular               | Valorización de residuos mediante simbiosis industrial |
| Acero vuelve al acero | Chile | Fabricación de acero      | Chatarra ferrosa                               | Sistema eficiente de retiro y disposición | 60 mil toneladas de chatarra recicladas                |

Fuente: elaboración propia con información de Soler Alvarado (2024).

Aprovechamiento de relaves

En Brasil, la Mina Morro Agudo (Nexa Resources) ha alcanzado la condición de “residuo cero” al transformar sus relaves polimetálicos (subproductos de la extracción de 17 300 toneladas de zinc y 4 700 toneladas de plomo en 2021) en Zincal 200, un enmiende para el control de la acidez de los suelos agrícolas locales que prolongan la vida fértil de la tierra y cierra el ciclo de materiales (Soler Alvarado, 2024). En la región andina de Perú, estudios técnicos confirmaron que los relaves cumplen con los estándares nacionales de resistencia y durabilidad para agregados de pavimento, permitiendo aprovechar hasta el 25% de los desechos mineros en la construcción de carreteras bajo un enfoque de economía circular (Torres Gonzales et al., 2024) (tabla 6.4).

Tabla 6.4. *Aprovechamiento de relaves*

| Caso                   | País   | Recurso reutilizado | Aplicación                                                    | Beneficios principales                       | Innovación destacada                                               |
|------------------------|--------|---------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Mina Morro Agudo       | Brasil | Relaves mineros     | Transformación en Zincal 200 para control de acidez en suelos | Operación “residuo cero”                     | Transformación completa de residuos en insumo agrícola             |
| Región Andina del Perú | Perú   | Relaves mineros     | Agregado para construcción de carreteras                      | Aprovechamiento del 25% de relaves generados | Uso de relaves como material de construcción cumpliendo estándares |

Fuente: elaboración propia con información de Soler Alvarado (2024) y Torres Gonzales et al. (2024).

## Cierres regenerativos de minas

En Kenia, el Haller Park demuestra cómo un paisaje calizo devastado por casi dos décadas de extracción se convirtió en un ecosistema florido y rentable: mediante bioacondicionamiento de suelos, creación de humedales y reintroducción de fauna, este proyecto no sólo logró la supervivencia del 94% de las especies reimplantadas y la atracción de 181 000 visitantes anuales, sino que también generó ingresos turísticos equivalente al 7% del PIB local (Musando y Cáceres, 2023). En Australia Occidental, el plan de rehabilitación del Proyecto Beenup puso énfasis en la estabilización química de relaves ácidos y la coestión con la comunidad Noongar, elevando el pH de 3 a más de 6.2 y reduciendo en un 89% la sedimentación en el río Blawood, al tiempo que sentó las bases para un fideicomiso indígena de turismo sostenible (Norrish et al., 2019). Por su parte, la reconversión de la mina a cielo abierto de As Pontes (España) combinó humedales pasivos, modelado de taludes y vigilancia ciudadana para neutralizar aguas ácidas (pH 2.8 → neutral), restablecer poblaciones de anguila europea y trucha, y generar 22 MW de energía hidroeléctrica reversible, siendo percibido por el 68% de los vecinos como motor de desarrollo local (Lopez, 2020) (tabla 6.5).

Tabla 6.5. Cierres regenerativos de minas

| Caso                | País      | Tipo de minería                | Problema inicial                                   | Solución implementada                            | Resultados clave                                                     | Característica distintiva                                          |
|---------------------|-----------|--------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Bamburi Haller Park | Kenia     | Cantera de caliza              | Paisaje devastado de 1,200 ha con suelos alcalinos | Proceso de regeneración en cuatro fases          | 29 especies de mamíferos reintroducidos, 181,000 visitantes anuales  | Bioacondicionamiento con <i>Casuarina equisetifolia</i> y moluscos |
| Proyecto Beenup     | Australia | Extracción de ilmenita         | Área de 566 ha con lagunas ácidas                  | Plan de rehabilitación en tres etapas            | pH elevado de 3 a 6.2-6.84, recolonización de 167 especies vegetales | Monitoreo comunitario mediante drones y sensores IoT               |
| Lago As Pontes      | España    | Mina de carbón a cielo abierto | Hueco de 175 m de profundidad con agua acidificada | Humedales artificiales y participación ciudadana | Recuperación de especies indicadoras, 22 MW de energía               | Co-diseño con comunidad para usos recreativos                      |

Fuente: elaboración propia con información de Musando y Cáceres (2023), Norrish et al. (2019) y López, 2020.

Uso de energías renovables

En Chile, Codelco, Antofagasta Minerals y Collahuasi han apostado por la generación solar para descarbonizar sus operaciones a cielo abierto. Codelco lidera con la termosolar Pampa Elvira solar en Gabriela Mistral, que entrega 56 000 MWh térmicos anuales y cubre el 80% de la electroobtención, ahorrando 15 000 t CO<sub>2</sub> y limitando el uso de diésel al 20% por un investimento de 33 MUSD; además ha asegurado 375 GWh anuales de energía solar con baterías desde 2026 y 1.5 TWh renovables para 2026-2040, garantizando una matriz 100% limpia hacia 2030. Antofagasta Minerals y Collahuasi, por su parte, aprovechan la elevada radiación del desierto de Atacama para sus propios proyectos solares y de almacenamiento, reduciendo su huella de carbono y estabilizando costos energéticos. En Bolivia, la planta de concentrados de Pb-Ag-Zn implementa un modelo circular que comienza con la separación selectiva de desmontes según su riesgo de generar drenaje ácido, continúa con la desulfurización de relaves por espirales para producir un recubrimiento seco de cierre ambiental y culmina en la creación de un topsoil artificial (mezcla de ese recubrimiento con compost de residuos orgánicos y lodos de aguas tratadas), reutilizando finalmente el agua residual en la flotación y reduciendo tanto el consumo de agua dulce como los costos de cierre de minas (Solar Alvarado, 2024) (tabla 6.6).

Tabla 6.6. *Uso de energías renovables*

| <i>Caso</i>                  | <i>País</i> | <i>Tipo de solución</i> | <i>Tecnología implementada</i>                             | <i>Capacidad/Generación</i> | <i>Beneficios medibles</i>                                    |
|------------------------------|-------------|-------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Codelco y otras              | Chile       | Energía solar           | Planta termosolar Pampa Elvira (2,952 paneles)             | 56,000 MWh térmicos anuales | Reducción de 15,000 ton anuales CO2, 80% consumo cubierto     |
| Producción minera en Bolivia | Bolivia     | Sistema integral        | Separación selectiva, desulfurización, top soil artificial | No especificada             | Reducción de consumo de agua y energía, menor costo de cierre |

Fuente: elaboración propia con información de Soler Alvarado (2024).

## Diseño de productos reciclables

En Perú, un proyecto piloto en la región de Marañón demostró que los relaves auríferos pueden reemplazar el 70% de la arcilla en la fabricación de ladrillos estructurales, combinándose con 25% de cemento y 5% de silicato de sodio para producir piezas con resistencia a la compresión de 12.3 MPa (por encima del mínimo de 10 MPa de la norma NTP 399.6045) y concentraciones de arsénico lixiviado inferiores a 0.5 mg/L; este enfoque redujo los costos de producción en un 34% y recuperó 2.5 toneladas de oro residual anuales, mitigando al mismo tiempo el riesgo de drenaje ácido (Castromonte et al., 2024). En la provincia de Mpumalanga (Sudáfrica), investigadores convirtieron 50 millones de toneladas anuales de cenizas de carbón en geopolímeros mediante activación alcalina (8 M NaOH y silicato sódico) y curado a 75 °C durante 24 horas; el material alcanzó una resistencia a la flexión de 6.8 MPa, adecuada para la mampostería no estructural, con una huella de carbono de 0.23 kg CO<sub>2</sub>/kg frente a 0.89 kg CO<sub>2</sub>/kg del cemento Portland (Ekolu, 2022). De nuevo en Perú, se validó el uso de relaves cupríferos como sustituto del 25% de los áridos naturales en capas base de carreteras: tras trituración secundaria para ajustar la granulometría, los ensayos mostraron valores CBR de 98% y una estabilidad Marshall de 877 kg, superando los requisitos de tráfico medio; su aplicación a lo largo de 15 km de vías rurales permitió reducir en un 32% los costos materiales (Torres Gonzales et al., 2024) (tabla 6.7).

Tabla 6.7. *Diseño de productos reciclables*

| <i>Caso</i>             | <i>País</i> | <i>Material reutilizado</i> | <i>Producto desarrollado</i>                      | <i>Especificaciones técnicas</i>       | <i>Ventaja económica</i>                    | <i>Impacto ambiental</i>                                                    |
|-------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Ladrillos Estructurales | Perú        | Relaves auríferos           | Ladrillos (70% relaves, 25% cemento, 5% silicato) | Resistencia: 12.3 MPa                  | 34% menos costo que ladrillos tradicionales | Recuperación de 2.5 ton de oro residual anual                               |
| Geopolímeros            | Sudáfrica   | Cenizas de carbón           | Geopolímeros para construcción                    | Resistencia a flexión: 6.8 MPa         | No especificada                             | Huella de carbono: 0.23 kgCO <sub>2</sub> /kg vs. 0.89 del cemento Portland |
| Áridos para Carreteras  | Perú        | Relaves cupríferos          | Sustituto de áridos naturales                     | CBR: 98%, Estabilidad Marshall: 877 kg | Reducción del 32% en costos de materiales   | Aprovechamiento del 25% de relaves                                          |

Fuente: elaboración propia con datos de Castromonte et al. (2024), Ekolu (2022) y Torres Gonzales et al. (2024).

## Desafíos y tendencias de la minería circular

A pesar de los avances en la implementación de la minería circular, persisten diversos desafíos que limitan su expansión. En el plano técnico, la variabilidad en la calidad de los relaves y la heterogeneidad de los minerales implican que muchas tecnologías de valorización o tratamiento (como la biolixiviación o la separación avanzada) no siempre alcancen rendimientos económicos o ambientales aceptables, mientras que los costos de inversión y operación de plantas de tratamiento pueden ser prohibitivos para proyectos de menor escala (Born, 2025). Desde la perspectiva económica, la viabilidad financiera de estas iniciativas depende de nuevos modelos de negocios circulares, por ejemplo minería como servicio o economías de plataforma orientadas a la simbiosis industrial, que aún están en fase experimental y requieren marcos de financiamiento e incentivos fiscales claros para escalar (Bianchi y Cordella, 2023). En el ámbito regulatorio y social, la ausencia de normativas específicas para esquemas circulares, los procesos de obtención de permisos y la resistencia o desconfianza de las comunidades locales frente a las innovaciones técnicas pueden demorar años la puesta en marcha de proyectos, como lo refleja la suspensión de grandes iniciativas mineras tras conflictos ambientales y sociales recientes (IEA, 2024; Watari et al., 2019).

A estos factores se suman retos de infraestructura y espacio. La eficacia de la economía circular depende de redes de transporte y sistemas de agua y energía diseñados para el intercambio de materiales y subproductos entre diferentes actores regionales; sin ello, los ciclos de retorno de insumos difícilmente se concretan (Henrysson y Nuur, 2021). Además, las normas culturales del sector, con su tradicional aversión al riesgo y enfoque en la eficiencia interna, y la dependencia de grandes multinacionales con proveedores exclusivos dificultan la colaboración intersectorial y la innovación local (Pietrobelli et al., 2018). En consecuencia, aunque la creciente presión por reducir la extracción primaria podría ser objetivo último de la economía circular, las actuales limitaciones de reservas, los ciclos de uso prolongados de muchos metales y las pérdidas inevitables en cada etapa de reciclaje aseguran que la minería primaria seguirá siendo indispensable en el futuro previsible (Charpentier Poncelet et al., 2022).



Frente a estos desafíos, emergen tendencias que prometen impulsar la transición circular en minería. La digitalización, con Internet de las Cosas (IoT), gemelos digitales y análisis avanzados, mejora el monitoreo de operaciones, optimiza la gestión de relaves y permite modelos predictivos de mantenimiento. La hidrometalurgia verde y la biolixiviación abren rutas más limpias para la recuperación de metales críticos, reduciendo el consumo de reactivos tóxicos. Finalmente, la economía de plataforma facilita la simbiosis industrial al conectar en tiempo real a generadores de subproductos con posibles usuarios, minimizando desechos y fomentando nuevos esquemas colaborativos. Estas innovaciones, junto con el fortalecimiento de políticas públicas y la formación de capital humano especializado, serán esenciales para superar las barreras técnicas, económicas y sociales de la minería circular (Watari y McLellan, 2024).

## Conclusiones

La minería ha sido y sigue siendo un pilar fundamental del desarrollo económico y social en múltiples regiones del mundo, aportando materias primas esenciales y generando empleo e ingresos para comunidades enteras. Sin embargo, su impacto ambiental y social ha generado conflictos crecientes cuando no se atienden adecuadamente la degradación de paisajes, la contaminación de agua y suelos, y las tensiones con las poblaciones locales. Reconocer esta realidad y actuar sobre ella es ya una exigencia tanto legal como social.

En respuesta, la transición hacia modelos de minería circular y regenerativa aparece no sólo como una oportunidad, sino como una necesidad imperiosa. Al cerrar ciclos de materiales, mediante la reducción, reutilización, reciclaje y valorización de relaves, aguas y equipos, y al restaurar ecosistemas dañados, la industria puede minimizar sus impactos y, al mismo tiempo, reforzar su licencia social para operar. Para lograrlo, es imprescindible el desarrollo de nuevas tecnologías, el fortalecimiento de marcos normativos claros y colaborativos, y la formación de capital humano especializado. Sólo así la minería podrá integrarse en un modelo de coexistente armónica con el entorno natural, contribuyendo de manera sostenible al bienestar presente y futuro de las comunidades y del planeta.

## Referencias

- Acordi, J., Simão, L., Faraco, M. N. S., Borgert, C. H., Olivo, E., Montedo, O. R. K. y Raupp-Pereira, F. (2023). Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physico-chemical features. *Resources Policy*, 80, 103243. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103243>
- Ali, B., Loubna, B. y Leila, B. (2021). Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites. *Soil Science Annual*, 71(4), 395-407. <https://doi.org/10.37501/soilsa/133011>
- Arora, M., Raspall, F., Fearnley, L. y Silva, A. (2021). Urban mining in buildings for a circular economy: Planning, process and feasibility prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105754. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105754>
- Azadi, M., Northey, S. A., Ali, S. H. y Edraki, M. (2020). Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 13(2), 100-104. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3>
- Bianchi, M. y Cordella, M. (2023). Does circular economy mitigate the extraction of natural resources? Empirical evidence based on analysis of 28 European economies over the past decade. *Ecological Economics*, 203, 107607. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107607>
- Born, K. (2025). Adoption of circular economy practices in the mining sector: Evidence from Chile. *Resources Policy*, 102, 105514. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105514>
- Botelho Junior, A. B., Martins, F. P., Cezarino, L. O., Liboni, L. B., Tenório, J. A. S. y Espinosa, D. C. R. (2023). The sustainable development goals, urban mining, and the circular economy. *The Extractive Industries and Society*, 16, 101367. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101367>
- Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Thorenz, A., Tuma, A. y Sonnemann, G. (2022). Losses and lifetimes of metals in the economy. *Nature Sustainability*, 5(8), 717-726. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00895-8>
- Cisternas, L. A., Ordóñez, J. I., Jeldres, R. I. y Serna-Guerrero, R. (2022). Toward the implementation of circular economy strategies: An overview of the current situation in mineral processing. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(6), 775-797. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1946690>
- Cotrina-Teatino, M. A. y Marquina-Araujo, J. J. (2025). Circular economy in the mining industry: A bibliometric and systematic literature review. *Resources Policy*, 102, 105513. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105513>
- De Jesus, A. y Mendonça, S. (2018). Lost in transition? Drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy. *Ecological Economics*, 145, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.001>
- Ekolu, S. O. , S. F. , y N. A. (2022). Abandoned mine tailings and coal ash industrial

- wastes for sustainable production of geopolymer brick masonry: South African case study. *Key Engineering Materials*, 916.
- European Commission. (2020). *Circular economy action plan*.
- Fodor, D. (2024). *History of mining* (pp. 23-38). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39393-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39393-8_3)
- Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., Neculita, C. M. y Benzaazoua, M. (2024). Towards a circular economy in the mining industry: Possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, 14(3), 319. <https://doi.org/10.3390/min14030319>
- Henrysson, M. y Nuur, C. (2021). The role of institutions in creating circular economy pathways for regional development. *The Journal of Environment & Development*, 30(2), 149-171. <https://doi.org/10.1177/1070496521991876>
- Hernández-Chea, R., Jain, A., Bocken, N. M. P. y Gurtoo, A. (2021). The business model in sustainability transitions: A conceptualization. *Sustainability*, 13(11), 5763. <https://doi.org/10.3390/su13115763>
- International Council on Mining and Metals (ICMM). (2022). *Position statement: Climate change*. <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/position-statements/climate-change>
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Global critical minerals outlook 2024*. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
- Jamett, I., Santibáñez González, E. D. R., Jiménez, Y. y Carrasco, P. (2022). Toward a circular economy in the copper mining industry. In *Handbook of smart materials, technologies, and devices* (pp. 1831-1851). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-84205-5\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-030-84205-5_59)
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M. y Rosado, L. (2018). Circular economy: From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
- Kinnunen, P., Karhu, M. yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen, P. y Mäkinen, J. (2022). A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100499. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499>
- Kirchherr, J. y Van Santen, R. (2019). Research on the circular economy: A critique of the field. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104480. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104480>
- Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A. y Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11(1), 4823. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>
- Liu, X., Guo, P. y Guo, S. (2019). Assessing the eco-efficiency of a circular economy system in China's coal mining areas: Energy and data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, 206, 1101-1109. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.218>
- Lopez, X. P. S., B. M. L. (2020). Mine water and the environment. *Journal of the International Mine Water Association (IMWA)*.
- Magdziarczyk, M., Chmiela, A., Su, W. y Smolinski, A. (2024). Green transformation of

- mining towards energy self-sufficiency in a circular economy: A case study. *Energies*, 17(15). <https://doi.org/10.3390/en17153771>
- Mishra, P. P., Sravan, Ch. y Shivali, R. (2025). Circular economy in the Indian extractive industry: A preliminary analytical assessment of the major mining companies. *Cleaner Waste Systems*, 11, 100287. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100287>
- Moghimidehkhordi, M., Pournuroz Nodeh, Z., Soleimani Dehkordi, K., salmanvandi, H., Rasouli Khorjistan, R. y Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, 23, 102729. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102729>
- Monardes, V. y Sepúlveda, J. M. (2023). Multi-criteria analysis for circular economy promotion in the management of tailings dams: A case study. *Minerals*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/min13040486>
- Musando, A. A. y Cáceres, F. (2023). Best practices in mine closure: A case study of cultural ecosystem services in the Kenyan mining sector. *The School of Public Policy Publications*, 16(1). <https://doi.org/10.55016/ojs/sppp.v16i1.75925>
- Norrish, R., Lyon, B., Russell, W. y Price, G. (2019). *Engaging stakeholders to achieve rehabilitation completion: A case study of the BHP Beenup Project*. 1423-1436. [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1915\\_111\\_Norrish](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_111_Norrish)
- Okoye, O. N. N. (2025). Circular economy in construction: Brownfield redevelopment of a mining site in Ebonyi State, Nigeria. En *Recent developments and innovations in the sustainable production of concrete* (pp. 461-500). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23895-6.00017-0>
- Oliveira, K. A., Simão, L., Rebouças, L. B., Hotza, D., Montedo, O. R. K., Novaes de Oliveira, A. P. y Raupp-Pereira, F. (2023). Ceramic shell waste valorization: A new approach to increase the sustainability of the precision casting industry from a circular economy perspective. *Waste Management*, 157, 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.033>
- Pietrobelli, C., Marin, A. y Olivari, J. (2018). Innovation in mining value chains: New evidence from Latin America. *Resources Policy*, 58, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.010>
- Pons, A., Vintrò, C., Rius, J. y Vilaplana, J. (2021). Impact of corporate social responsibility in mining industries. *Resources Policy*, 72, 102117. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102117>
- Quispe Quispe, A. (2024). Evolution in the management of mining environmental liabilities in Peru. *Arth Institute Journal*.
- Ramana, K. V., Srinivas, T. y Rao, S. E. (2025). A study of environmental parameters influencing sustainable mining. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 106(1), 705-716. <https://doi.org/10.1007/s40033-024-00842-1>
- Rodrigues, M. y Mendes, L. (2018). Mapping of the literature on social responsibility in the mining industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 181, 88-101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.163>

- Secretaría de Economía. (2024). *Minería*. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Soler Alvarado, F. A. (2024). *Sostenibilidad y circularidad en la industria minera, de la teoría a la práctica*.
- Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M. y Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11(1), 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
- Torres Gonzales, Y., Gonzales Cabrera, R., Cotería Nuñez, I. A. y Arana Ruedas, D. P. R. (2024). Valorización de residuos mineros como áridos para la construcción de carreteras: Economía circular en la región andina del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 26(2), 71-78. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.605>
- Vilaça, A. S. I., Simão, L., Montedo, O. R. K., Novaes de Oliveira, A. P. y Raupp-Pereira, F. (2022). Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. *Resources Policy*, 75, 102477. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102477>
- Watari, T. y McLellan, B. (2024). Global demand for green hydrogen-based steel: Insights from 28 scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 79, 630-635. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.423>
- Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K., McLellan, B. C., Dominish, E. y Giurco, D. (2019). Integrating circular economy strategies with low-carbon scenarios: Lithium use in electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 53(20), 11657-11665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02872>
- World Bank. (2019). *Forest-smart mining: Identifying factors associated with the impacts of large-scale mining on forests*.
- World Bank. (2023). *Mineral rents*.
- Zeng, X., Mathews, J. A. y Li, J. (2018). Urban mining of e-waste is becoming more cost-effective than virgin mining. *Environmental Science & Technology*, 52(8), 4835-4841. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04909>