

RECUPERACIÓN DE MATERIALES SEMICONDUCTORES PARA UNA ECONOMÍA SOSTENIBLE

RECOVERY OF SEMICONDUCTOR MATERIALS FOR A SUSTAINABLE ECONOMY

Brucelee Alexander Noguera Manzanilla¹

 <https://orcid.org/0009-0000-5980-0609>

María Celeste Marín González²

 <https://orcid.org/0009-0006-0272-2885>

Recibido: 10-05-2025

Aceptado: 05-06-2025

Resumen

Este artículo investiga la aplicación de la recuperación de semiconductores y materiales críticos presentes en residuos urbanos, integrando un enfoque técnico y sostenible. Se analizan tres etapas fundamentales: en la fase de recuperación se evalúan métodos de extracción y se presentan casos de estudio que ilustran tanto los desafíos técnicos como las oportunidades para optimizar el proceso; en el procesamiento se detallan las técnicas de purificación que transforman residuos en materiales de alto valor; y en la re inserción se propone la reincorporación de estos semiconductores en la cadena productiva, fomentando la economía circular. La investigación se sustenta en un diseño exploratorio con un enfoque cualitativo. Se aplicó una metodología basada en la revisión documental de estudios de caso y cuadros comparativos, integrando perspectivas técnicas, ambientales y socioeconómicas. Además, se enfatizan objetivos sostenibles clave: reducir la huella de carbono mediante procesos energéticamente eficientes, minimizar los residuos valorizando subproductos y conservar los recursos naturales al disminuir la dependencia de la minería primaria. Los hallazgos ofrecen un modelo integral que fortalece la sostenibilidad ambiental y promueve políticas y estrategias innovadoras para un desarrollo responsable.

Palabras clave: semiconductores, economía circular, minería, sostenibilidad ambiental, recursos críticos.

Abstract

This article investigates the application of the recovery of semiconductors and critical materials present in urban waste, integrating a technical and sustainable approach. Three fundamental stages are analyzed: in the recovery phase, extraction methods are evaluated, and case studies are presented that illustrate both the technical challenges and the opportunities to optimize the process; in the processing phase, purification techniques that transform waste into high-value materials are detailed; and in the reinsertion phase, the reintegration of these semiconductors into the production chain is proposed, promoting the circular economy. The research is based on an exploratory design with a qualitative approach complemented by secondary quantitative analysis. A methodology based on document review, case studies, and comparative tables was applied, integrating technical, environmental, and socioeconomic perspectives. In addition, key sustainable objectives are emphasized: reducing the carbon footprint through energy-efficient processes, minimizing waste by valuing by-products, and conserving natural resources by decreasing dependence on primary mining. The findings offer a comprehensive model

¹ Universidad Yacambú. Venezuela. Correo: y-27397025@micorreo.uny.edu.ve

² Universidad Yacambú. Venezuela. Correo: y-30025956@micorreo.uny.edu.ve

that strengthens environmental sustainability and promotes innovative policies and strategies for responsible development

Keywords: Semiconductors, circular economy, mining, environmental sustainability, critical resources.

Introducción

El acelerado avance de la tecnología y la digitalización han transformado de manera profunda la producción y el consumo de dispositivos electrónicos a nivel global. El incremento exponencial en la fabricación de aparatos, desde computadoras y teléfonos móviles, hasta paneles solares y sistemas de comunicación, han dado lugar a una acumulación sostenida de residuos electrónicos, denominados RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos). Estos residuos, objeto de preocupación tanto ambiental como económica, poseen en su composición una concentración significativa de materiales de alto valor y componentes críticos, en particular semiconductores, que resultan esenciales para la fabricación de microchips y otros dispositivos de alta tecnología. Al mismo tiempo, la extracción de dichos insumos a partir de minerales vírgenes, mediante minería primaria, ha demostrado ser costosa y altamente contaminante, generando impactos negativos sobre los ecosistemas, contribuyendo a la degradación de suelos y a la emisión de gases de efecto invernadero.

Ante este escenario, la recuperación de materiales surge como una estrategia innovadora y sostenible, orientada a la recuperación de materiales valiosos a partir de desechos electrónicos. Esta solución técnica permite extraer y acondicionar insumos primarios de alta calidad, sin recurrir a la explotación de nuevos yacimientos. La transformación de RAEE en recursos útiles no solo fortalece la economía circular, sino que también contribuye a reducir la presión sobre el medio ambiente, al disminuir la dependencia de los procesos extractivos tradicionales. Por esto, se realizará un análisis de manera integral sobre el proceso de minería urbana aplicado a semiconductores y materiales críticos, abordando sus etapas, retos y beneficios en el marco de modelos teóricos que favorecen la sostenibilidad.

Para analizar de forma integral el proceso de recuperación, procesamiento y reinserción de semiconductores, este estudio emplea una metodología exploratoria de enfoque cualitativo, complementada con análisis cuantitativos secundarios. Se realizó una revisión documental de fuentes académicas, informes institucionales y casos de implementación práctica, lo que permitió contrastar marcos teóricos como la economía circular, el metabolismo y la ecología industrial con experiencias reales en la transformación de RAEE.

El presente estudio reconoce que la problemática asociada al manejo de los RAEE no se limita a la mera disposición final de residuos, sino que abarca cuestiones profundas relacionadas con el diseño, la producción y el ciclo de vida de los dispositivos electrónicos. La corta duración de muchos aparatos, y la

práctica de la obsolescencia programada, han llevado a que estos equipos terminen en vertederos o sean dispuestos de forma inadecuada, implicando un riesgo importante para la salud ambiental y pública. La minería urbana se define, por tanto, como el conjunto de procesos y tecnologías orientadas a convertir el residuo electrónico en materias primas, mediante la aplicación de métodos de separación, purificación y reciclaje que, en última instancia, permiten incorporar estos materiales en nuevos ciclos productivos. En contraposición a la minería primaria, la minería urbana aprovecha lo que ya ha sido extraído del medio ambiente en ciclos de producción anteriores, contribuyendo a cerrar el ciclo de vida de los productos. de esta manera, se logra una doble función. Por un lado, se extrae valor de lo que tradicionalmente se consideraba “desperdicio”; por otro, se mitigan los efectos negativos asociados con la explotación incesante de recursos naturales vírgenes.

Dentro de los materiales tratados en la minería urbana, se encuentran los semiconductores, que constituyen uno de los pilares esenciales en la industria tecnológica moderna. Su relevancia radica en la capacidad de estos materiales para controlar de forma precisa el flujo de la corriente eléctrica debido a sus propiedades de conductividad intermedia entre conductores y aislantes, lo que los hace indispensables en la fabricación de circuitos integrados y microprocesadores. Históricamente, el silicio ha sido el semiconductor predominante debido a su abundancia, sus propiedades físicas y su relativa estabilidad química. Sin embargo, el creciente requerimiento de dispositivos más rápidos y eficientes ha llevado a la introducción de otros materiales críticos en el campo de la electrónica, tales como el germanio, el galio y, en aplicaciones de alta potencia y frecuencia, compuestos basados en el arseniuro de galio (GaAs), el nitruro de galio (GaN) y el carburo de silicio (SiC).

El silicio, por ejemplo, se utiliza de manera extensiva en la fabricación de obleas para microchips, paneles solares y diversos sistemas de procesamiento. Sin embargo, las limitaciones inherentes al silicio en términos de velocidad y eficiencia energética han impulsado el desarrollo y la integración de otros materiales semiconductores. El germanio, aunque menos abundante, posee una movilidad electrónica mayor que la del silicio, lo que permite fabricar dispositivos capaces de operar a velocidades superiores, especialmente en aplicaciones de comunicación y en sensores infrarrojos. Por otro lado, el galio es fundamental para la tecnología de semiconductores compuestos; se emplea en la producción de dispositivos LED, en la fabricación de diodos emisores de luz y en aplicaciones de alta frecuencia y eficiencia energética, como en amplificadores y sistemas de radar. Asimismo, los compuestos avanzados como GaN y SiC se han consolidado en nichos especializados, donde sus propiedades, como la resistencia a altas temperaturas y la capacidad para operar a elevada tensión, ofrecen ventajas significativas en industrias como la automotriz y la energética.

La importancia de estos semiconductores y materiales críticos no solo se circunscribe a la fabricación de dispositivos electrónicos, sino que también incide en aspectos estratégicos y geopolíticos, ya que la dependencia de materias primas vírgenes para su obtención genera vulnerabilidades en la cadena de suministro. La extracción de estos elementos a partir de depósitos naturales requiere inversiones masivas y, en muchos casos, se desarrolla en zonas donde los estándares ambientales y laborales son cuestionables. En contraste, la recuperación de semiconductores a partir de RAEE, a través de la minería urbana, permite diversificar las fuentes de insumos, reducir la presión sobre los recursos naturales y favorecer una distribución más equitativa y sostenible de estos materiales. Además, este enfoque reduce el impacto ambiental inherente a la minería convencional, al disminuir la huella de carbono y minimizar la generación de desechos tóxicos.

En paralelo, la integración de la minería urbana se orienta a alcanzar objetivos ambientales y sociales estratégicos, en particular la reducción de la huella de carbono, la minimización de residuos y la conservación de los recursos naturales. La reducción de la huella de carbono se consigue, en gran medida, al reemplazar los procesos extractivos tradicionales, altamente intensivos en consumo energético y producidos con emisiones elevadas de CO₂, por técnicas de recuperación basadas en el reciclaje de materiales ya existentes. Esta transformación contribuye a una disminución notable en las emisiones asociadas a la extracción y el procesamiento de materias primas vírgenes. Por otro lado, la minimización de residuos se logra a través de la valorización de subproductos, dentro del paradigma del “residuo cero”, en el que cada componente es considerado potencialmente útil. Finalmente, la conservación de recursos naturales se fortalece al extender el ciclo de vida de los semiconductores y otros materiales críticos, reduciendo la necesidad de intervenciones extractivas sobre ecosistemas frágiles.

El marco teórico que sustenta la investigación se apoya en conceptos que han redefinido los sistemas de producción en las últimas décadas. La economía circular, por ejemplo, promueve una transformación del modelo de producción lineal basado en la extracción, utilización y descarte de recursos; hacia un modelo en el que los residuos se convierten en insumos, cerrando estos ciclos y maximizando la eficiencia en el uso de los recursos (figura 1). De forma complementaria, el concepto de metabolismo industrial permite analizar los flujos de energía y materiales en las actividades productivas, identificando ineficiencias que pueden ser optimizadas para lograr una mayor sostenibilidad.

Figura 1

Ventajas de un proceso circular y sostenible de materiales

El reciclaje ofrece la perspectiva de una cadena de valor minera más circular y sostenible

Las ventajas del ciclo de reciclado se indican con un signo +. Las desventajas se indican con un signo -.



Nota. Prepararse para el impacto. Tomado de: Análisis PwC (p.1). por Millán G y Rossouw A, 2024.

Por último, la ecología industrial y el concepto de simbiosis industrial fomentan la colaboración entre sectores para aprovechar los subproductos de una industria como materia prima para otra, impulsando la integración de procesos y la reducción de impactos ambientales globales. La aplicación conjunta de estos marcos teóricos no sólo justifica la viabilidad técnica y económica de la minería urbana, sino que además destaca las ventajas ambientales y sociales que se derivan de su implementación.

El análisis de casos internacionales resulta fundamental para evidenciar la factibilidad y el impacto de la recuperación de metales aplicada a semiconductores. Diversos proyectos ejecutados en países de América Latina y Asia demuestran que la aplicación de técnicas avanzadas de recuperación y reciclaje puede transformar la gestión de RAEE en una fuente de recursos estratégicos. En Brasil, por ejemplo, la iniciativa liderada por Ambipar ha conseguido extraer semiconductores y otros elementos críticos de los residuos electrónicos a través de sistemas de segregación y tratamiento especializado, reduciendo así la carga contaminante asociada con la acumulación de estos desechos y disminuyendo la presión sobre los recursos naturales (Ambipar, 2024).

De igual forma, el proyecto “Rodrigo Scrap Reciclaje Ecología”, desarrollado en Venezuela, ha convertido el manejo de residuos electrónicos en una oportunidad económica y ambiental, a través de la

recolección, reutilización y transformación de componentes dispuestos como desecho en insumos de valor (Márquez, 2022). Estos ejemplos no solo evidencian el carácter innovador de la minería urbana, sino que también resaltan su potencial para generar beneficios económicos y para promover el desarrollo sostenible.

El alineamiento de las iniciativas de minería urbana con el marco normativo y las políticas globales es otro aspecto relevante de la investigación. Diversos países han comenzado a establecer regulaciones y políticas que incentiven la recuperación de materiales críticos a partir de RAEE, en un esfuerzo por reducir la dependencia de la minería tradicional. Por ejemplo, en Estados Unidos y en la Unión Europea, se han instaurado normativas que obligan a la implementación de sistemas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), con el fin de promover la reutilización y el reciclaje de componentes electrónicos. En particular, la Unión Europea ha impulsado el Circular Economy Action Plan, una iniciativa que establece metas ambiciosas de reciclaje y una reducción en el consumo de materias primas, respaldada por incentivos económicos y regulaciones estrictas (European Commission, 2020). Además, Baldé, et al. (2024) ha proporcionado datos relevantes sobre la magnitud del problema y las oportunidades que ofrece la minería urbana a escala mundial. Estos marcos regulatorios y políticas públicas son esenciales para fomentar la inversión en tecnologías verdes y para garantizar que la transición hacia modelos de producción sostenibles se lleve a cabo de manera sistemática y coordinada.

La relevancia de la minería urbana se extiende también al ámbito socioeconómico. La implementación de proyectos que integren esta práctica tiene el potencial de generar nuevas fuentes de empleo y de impulsar el desarrollo de modelos de negocio innovadores, especialmente en zonas urbanas con altos índices de generación de RAEE. La consolidación de redes de simbiosis industrial entre el sector público, privado y académico puede favorecer la creación de grupos de reciclaje tecnológico, en los que los residuos son convertidos en recursos que alimenten nuevamente el ciclo productivo de industrias de alta tecnología. Estas iniciativas, además de generar beneficios económicos, contribuyen a la reducción de riesgos asociados con conflictos geopolíticos y a la diversificación del suministro de materiales críticos, elementos esenciales en un contexto de globalización y de alta volatilidad en los mercados internacionales de materias primas.

El propósito del presente artículo consiste en analizar de forma exhaustiva los procesos, desafíos y oportunidades inherentes a la minería urbana de semiconductores y materiales críticos, identificando los elementos técnicos y normativos que sustentan su viabilidad y su impacto positivo en el medio ambiente. La investigación se orienta a responder interrogantes fundamentales: ¿cuáles son las etapas clave que permiten optimizar la recuperación, el procesamiento y la reinserción de insumos extraídos de

los RAEE? ¿De qué manera contribuye la implementación de estas técnicas a la reducción de la huella de carbono y a la mitigación de la contaminación generada por la minería primaria? ¿Cómo es posible integrar de manera eficaz los marcos teóricos de la economía circular, el metabolismo y la ecología industrial en los modelos de gestión de residuos?

La respuesta a estas interrogantes se espera que sirvan de base para la formulación de recomendaciones específicas orientadas a la implementación de tecnologías limpias y a la promoción de la simbiosis industrial entre sectores, favoreciendo un manejo integral de los residuos electrónicos en beneficio tanto del medio ambiente como de la economía. De esta forma, se busca demostrar que la minería urbana de semiconductores presenta un potencial considerable para transformar el manejo de los RAEE y para contribuir al desarrollo sostenible de la industria tecnológica. La utilización de materiales recuperados a través de procesos eficientes y sostenibles posibilita no sólo la reducción de efectos ambientales adversos, sino también el fomento de nuevos modelos de negocio y de colaboración intersectorial. Este enfoque integral, fundamentado en marcos teóricos y en la evidencia empírica de proyectos exitosos, es una herramienta indispensable para la planificación de políticas públicas y para la reestructuración de la cadena de suministro de materiales críticos en un mundo cada vez más interconectado y exigente en términos de sostenibilidad.

Materiales y Métodos

Diseño de la Investigación

El estudio se estructuró bajo un diseño exploratorio con un enfoque cualitativo, complementado con análisis de estudios de casos. Asimismo, la investigación se estructuró integrando perspectivas técnicas, ambientales y socioeconómicas. Se adoptó la técnica de revisión documental, centrado en el análisis de fuentes secundarias que abarcan estudios científicos, informes institucionales y casos de implementación práctica. Este modelo permitió evaluar la coherencia entre los marcos teóricos y las experiencias aplicadas, sin requerir la recolección de datos primarios.

La investigación se situó en un escenario donde los RAEE representan el flujo de residuos de más rápido crecimiento a nivel global, con 53.6 millones de toneladas generadas en 2024 y una tasa de reciclaje inferior al 20% (Baldé, et al. 2024). En otras palabras, el contexto de estudio se delimitó a la gestión de residuos electrónicos (RAEE), con énfasis en la recuperación de semiconductores como silicio, galio, germanio y compuestos avanzados (GaN, SiC). La población analizada incluyó:

- Ambipar Group (Brasil): Procesó 80,000 toneladas/año de RAEE mediante trituración mecánica y separación magnética, recuperando 1.2 toneladas de oro y 8.5 toneladas de plata anualmente (Ambipar Group, 2024).
- Midas (Chile): Especializada en hidrometalurgia, logró concentraciones de cobre del 20% en placas de circuitos, superando la eficiencia de yacimientos naturales (Cerda, 2023).
- Plantas en la UE: Implementan refinación por solventes para extraer tierras raras de paneles solares, reduciendo importaciones en un 15% (Millán & Rossouw, 2024).
- Iniciativas en Venezuela, Estado Lara como Rodrigo Scrap.
- Normativas globales, entre ellas el *Circular Economy Action Plan* de la Unión Europea y el *Global E-Waste Monitor* (Forti, et al. 2020).

Por otro lado, el marco teórico combinó tres pilares:

Economía Circular

Para evaluar cómo la minería urbana cierra ciclos de materiales, reduciendo la dependencia de recursos vírgenes. Se analizaron casos como el de Intel, que incorporó un 40% de silicio reciclado en sus chips.

Ecología Industrial

Para examinar interacciones entre actores (empresas, gobiernos, comunidades) en la gestión de RAEE, destacando proyectos como el "Rodrigo Scrap Reciclaje Ecología" en Venezuela.

Sostenibilidad Tecnológica

Basado en informes de la OECD (2020), se evaluó el impacto de innovaciones como la electrólisis de alta eficiencia (85% en recuperación de metales) y la integración de energías renovables en procesos térmicos.

Instrumentos de Recolección de Datos

Se revisaron fuentes académicas, institucionales, corporativas y legales, estructurados organizado en tres categorías:

- Documentación técnica: Artículos sobre procesos de recuperación de semiconductores, especificando métodos de extracción (separación magnética, hidrometalurgia) y técnicas de purificación (electroquímica).
- Casos de estudio: Se seleccionaron proyectos que demostraran la escalabilidad de la minería urbana.
- Marco normativo: Se revisaron políticas públicas vinculadas a la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y estándares de reciclaje de RAEE.

Análisis de Datos

Se construyeron tablas comparativas para evaluar técnicas de recuperación

Tabla 1

Técnicas de Recuperación

Método	Ventajas	Limitaciones	Caso Ejemplo
Mecánico	Bajo costo, rápida implementación	Contaminación cruzada, baja pureza	Ambipar (Brasil): 80,000 t/año
Químico	Alta pureza (ej.: 20% Cu en Midas)	Uso de ácidos tóxicos, residuos peligrosos	Midas (Chile): 6,000-7,000 t/año
Térmico	Recuperación de metales y carbono	Alto consumo energético (ej.: pirólisis)	Plantas UE: Captura de calor residual

Nota. Elaboración propia.

Asimismo, se realizó un cuadro comparativo entre la minería tradicional y la “nueva minería”.

Tabla 2

Comparativa entre minería tradicional y la nueva minería

	Minería tradicional	Nueva minería
Proceso de extracción	Extracción a cielo abierto o subterránea mediante técnicas convencionales como el uso de explosivos.	Extracción a través de técnicas más eficientes y menos invasivas, como la lixiviación y la flotación.
Impacto ambiental	Genera un alto impacto ambiental debido a la remoción de grandes cantidades de tierra y la contaminación de suelos y cuerpos de agua cercanos.	Reduce significativamente el impacto ambiental al utilizar técnicas más limpias y eficientes en el uso de recursos naturales.
Costos operativos	Alto: exploración, maquinaria pesada y manejo de residuos	13 veces más rentable que la minería tradicional según estudios en China (Medina G, 2018)
Inversión inicial	Millones de dólares en infraestructura y permisos	Microfábricas con costos desde USD 370,000 y retorno en 2-3 años (Woollacott, 2018)

Nota. Elaboración propia.

Se lograron identificar las 3 etapas de la minería urbana:

- Recuperación (Recovery).
- Beneficiado/Procesamiento (Processing).
- Reinserción (Reintegration).

Recuperación (Recovery)

La primera fase de la minería urbana en semiconductores se centra en la recuperación de materiales mediante la extracción y separación de componentes valiosos de los residuos electrónicos. Este proceso implica la aplicación de técnicas mecánicas, químicas y térmicas que permiten la separación de elementos críticos presentes en tarjetas madre, circuitos integrados y otros dispositivos electrónicos. La Tabla 1 resume las técnicas de recuperación aplicables en minería urbana, destacando sus ventajas, limitaciones y casos representativos. Estos métodos incluyen:

Métodos Mecánicos

Se basan en la trituración y el cribado de los residuos electrónicos para reducir su tamaño y facilitar la separación física de los componentes. Según Ambipar (2024), su planta en Brasil procesa 80,000 toneladas anuales de residuos electrónicos, recuperando oro, plata y cobre mediante métodos mecánicos como trituración y separación magnética.

Métodos Químicos

La lixiviación ácida es uno de los procesos químicos más utilizados en la recuperación de metales de alta pureza. Este método consiste en la disolución de metales mediante soluciones ácidas, facilitando la posterior separación y refinación. En Chile, empresas como Midas emplean procesos hidrometalúrgicos para extraer cobre de placas de circuitos, donde la concentración alcanza hasta un 20%, superando ampliamente los yacimientos naturales (Cerda, 2023).

Métodos Térmicos

Los procesos térmicos, como el pirólisis, implican la descomposición de los materiales orgánicos y la separación de metales a través de la aplicación de altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Este tipo de métodos son eficaces para la recuperación de metales y carbono, pero su escalabilidad se ve limitada por el alto consumo energético, tal como se detalla en la Tabla 1.

Beneficiado/Procesamiento (Processing)

Una vez recuperados los materiales, el siguiente paso es su procesamiento, que abarca la purificación y refinación de los elementos extraídos para obtener materias primas de alta calidad que puedan ser reintroducidas en la cadena de valor de la industria de semiconductores.

Electrólisis

Es una técnica ampliamente utilizada para la purificación de metales. En este proceso, la

aplicación de una corriente eléctrica a una solución que contiene iones metálicos permite la deposición selectiva de metales sobre un cátodo. Según Fernández (2013), la electrólisis se emplea para recuperar metales preciosos como oro y plata de circuitos integrados, logrando eficiencias superiores al 85% en ambientes controlados.

Refinación por Solventes

Técnica que emplea solventes orgánicos para separar y purificar metales mediante extracción líquido-líquido. Destaca en la recuperación de metales raros y críticos, pero requiere inversión en infraestructura y manejo seguro de solventes para minimizar impactos ambientales.

Fundición (Smelting)

Método tradicional que funde materiales para separar metales por puntos de fusión. Modernizado con captura de emisiones y recuperación de calor, permite obtener metales puros, aunque consume mucha energía y exige control estricto de gases tóxicos generados.

Reinserción (Reintegration)

La última etapa en la cadena de la minería urbana es la reinserción de los materiales procesados en la cadena productiva, cerrando el ciclo de la economía circular y reduciendo la dependencia de fuentes primarias de recursos. Los materiales recuperados y procesados encuentran aplicaciones directas en la fabricación de nuevos semiconductores y componentes electrónicos. Empresas líderes en la industria, como Intel y TSMC, han mostrado interés en la utilización de metales recuperados para la elaboración de chips y otros dispositivos de alta tecnología.

La alta pureza de los metales obtenidos mediante procesos de recuperación y refinación permite mantener los estándares de calidad exigidos en la fabricación de dispositivos críticos, lo que a su vez favorece la reducción de la huella ecológica asociada a la extracción minera tradicional. Además, estos materiales también se utilizan en la producción de componentes para energías renovables, como sistemas fotovoltaicos y turbinas eólicas. La reinserción de materiales en estos sectores no solo contribuye a la reducción de residuos electrónicos, sino que también impulsa la sostenibilidad y la eficiencia en la generación de energía limpia.

Resultados o Hallazgos

Los hallazgos de esta investigación evidencian que la minería urbana de semiconductores y materiales críticos ofrece ventajas técnicas, económicas y ambientales significativas frente a los métodos tradicionales de extracción. A continuación, se sintetizan los resultados clave:

Eficiencia en la Recuperación de Materiales

Métodos Mecánicos. La trituración y separación magnética, aplicada en casos como la planta de Ambipar (Brasil), permite procesar 80,000 toneladas anuales de RAEE, recuperando 1.2 toneladas de oro y 8.5 toneladas de plata. Sin embargo, presenta limitaciones como la contaminación cruzada y la baja pureza de materiales.

Métodos Químicos. La hidrometalurgia, empleada por Midas (Chile), logra concentraciones de cobre del 20% en placas de circuitos, superando la eficiencia de yacimientos naturales. No obstante, requiere manejo de ácidos tóxicos.

Métodos Térmicos. El pirólisis permite recuperar metales y carbono, pero su alto consumo energético (ej: 85% en procesos térmicos sin captura de calor residual) limita su escalabilidad.

Reducción de la Huella de Carbono

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) demuestra que la minería urbana reduce hasta un 85% el consumo energético en comparación con la extracción primaria, especialmente en metales como el cobre. Además, proyectos como las plantas de la UE, que integran refinación por solventes, disminuyen las importaciones de tierras raras en un 15%, mitigando emisiones de CO₂ asociadas al transporte y procesamiento de minerales vírgenes.

Impacto Económico y Rentabilidad

La Tabla 2 demuestra que la minería urbana es 13 veces más rentable que la tradicional, con inversiones iniciales desde USD 370,000 y retornos en 2-3 años (Woollacott, 2018). La recuperación de una tonelada de RAEE proporciona concentraciones de metales 50 veces superiores a las minas convencionales, reduciendo costos operativos a largo plazo al internalizar externalidades ambientales (OECD, 2020).

Contribución a la Economía Circular

Empresas como Intel incorporan un 40% de silicio reciclado en sus chips, mientras iniciativas como el Circular Economy Action Plan de la UE exigen un 15% de materiales reciclados en baterías para 2031. La reinserción de materiales en sectores como la automoción y energías renovables reduce la demanda de recursos vírgenes en un 30-40%, según proyecciones de la OECD (2020).

Tendencias Futuras

La integración de inteligencia artificial (IA) en la cadena de recuperación optimiza la clasificación de metales (mediante visión por computadora) y predice fluctuaciones en la demanda de materiales. Proyectos piloto en la UE ya utilizan IA para mejorar la precisión en la separación de componentes, reduciendo errores en un 25% (Millán & Rossouw, 2024).

Discusión

Los resultados planteados evidencian que la minería urbana de semiconductores y materiales críticos constituye una alternativa viable y, en muchos aspectos, superior a los métodos tradicionales de extracción. Los hallazgos obtenidos a partir del análisis de procesos—incluyendo técnicas mecánicas, químicas y térmicas—permiten interpretar que, si bien los métodos convencionales presentan eficiencia en la obtención de insumos, las tecnologías aplicadas en la minería urbana ofrecen ventajas sustanciales en términos ambientales, de seguridad y de economía circular.

Los procesos implementados en la minería urbana (Tabla 1), tales como la trituración combinada con separación magnética (ejemplificada en la planta de Ambipar en Brasil) y la lixiviación ácida para la recuperación de metales de alta pureza (utilizada por Midas en Chile), han demostrado que es posible obtener concentraciones de materiales críticos—como el silicio, germanio, galio y tierras raras—con niveles de pureza comparables a aquellos extraídos de yacimientos primarios. Estudios previos indican que, en algunas situaciones, la minería urbana puede alcanzar eficiencias de recuperación que superan en hasta 50 veces la concentración obtenida en minas tradicionales (Esteve, 2020; Woollacott, 2018), evidenciado en la Tabla 2. Además, las técnicas adoptadas, en general, permiten reducir la contaminación por materiales tóxicos, siempre y cuando se implementen sistemas de control ambiental adecuados.

La minería urbana enfrenta desafíos económicos derivados de procesos complejos, como la separación de materiales en dispositivos electrónicos. Sin embargo, estudios indican que los costos pueden compensarse al considerar las externalidades ambientales de la minería tradicional. Al comparar ambas aproximaciones, es evidente que, aunque las técnicas tradicionales, como la extracción a cielo abierto o la minería subterránea, tienen la ventaja de operar a gran escala, generan un alto impacto ambiental y requieren de inversiones significativas en infraestructuras que, además, implican costos externos no contabilizados (como la contaminación de suelos y agua). En contraste, la minería urbana no solo aprovecha materiales que ya han sido extraídos previamente del medio ambiente, sino que también disminuye la necesidad de nuevas operaciones mineras, reduciendo así la emisión de gases de efecto invernadero y el consumo energético (de Vera, 2024; Baldé, 2024).

En términos de seguridad, la minería urbana reduce la vulnerabilidad de la cadena de suministro ante fluctuaciones del mercado internacional y conflictos geopolíticos. Al diversificar las fuentes de insumos críticos y depender menos de extracciones a gran escala, los países pueden mitigar riesgos asociados a la escasez y a la dependencia de importaciones. Así, los datos económicos y de seguridad analizados confirman que la minería urbana se posiciona como un componente estratégico dentro de las políticas globales de sostenibilidad.

Uno de los aspectos más destacados de la investigación es la evaluación de la minería urbana desde la óptica de la reducción de la huella de carbono. Se encontró que, al utilizar RAEE para recuperar materiales críticos, se disminuye la necesidad de procesos extractivos intensivos en energía y, por ende, se reducen las emisiones de CO₂ en comparación con la minería primaria. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) aplicado a semiconductores recuperados demuestra que los procesos basados en la economía circular reducen significativamente el consumo energético y mejoran la eficiencia de la cadena productiva (European Commission, 2020; Baldé, 2024).

Asimismo, la implementación de estrategias para la valorización de subproductos—por ejemplo, la recuperación de oro de contactos eléctricos mediante técnicas innovadoras que utilizan esponjas de fibrillas de proteína (como se ha reportado en estudios de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, 2025)—representa un avance importante en la minimización de residuos. La adopción de tecnologías de "residuo cero", mediante el uso combinado de técnicas mecánicas, químicas y térmicas, permite una recuperación máxima de insumos y reduce la cantidad de desechos enviados a vertederos, evidenciando la sinergia entre innovación tecnológica y sustentabilidad ambiental.

La recuperación de semiconductores y materiales críticos a partir de RAEE se alinea perfectamente con los objetivos de conservación de recursos naturales. La minería urbana contribuye a preservar reservas limitadas de insumos esenciales, como el galio y ciertos elementos de tierras raras, prolongando su vida útil y disminuyendo la necesidad de recurrir a la minería primaria, la cual suele tener un impacto ambiental severo (OECD, 2020). Además, la estrategia de reinserción de materiales recuperados en la fabricación de nuevos dispositivos fortalece la cadena de suministro y garantiza un suministro más seguro y sostenible, reduciendo a la vez la dependencia de métodos extractivos que implican alta contaminación y degradación del medio ambiente.

A pesar de las evidentes ventajas en términos de eficiencia, sostenibilidad y seguridad del suministro, la presente investigación reconoce ciertas limitaciones que deben ser abordadas en futuros estudios:

- La heterogeneidad de los residuos electrónicos y la posible contaminación cruzada entre componentes representan desafíos que pueden limitar la eficiencia de las técnicas de separación y recuperación. Además, la inversión inicial en tecnologías avanzadas (como sistemas de clasificación por IA, métodos de lixiviación controlada o instalaciones de captura de emisiones) es significativa, lo que puede dificultar la escalabilidad de los procesos, especialmente en países con infraestructura limitada (OECD, 2020; Fernández, 2013).

- Aun cuando la minería urbana reduce significativamente la huella de carbono y la contaminación en comparación con la minería primaria, existen impactos residuales asociados a los procesos térmicos y químicos, tales como la generación de subproductos tóxicos y residuos peligrosos. La investigación futura deberá centrarse en desarrollar e integrar tecnologías que minimicen o neutralicen estos residuos, por ejemplo, mediante la reutilización de subproductos en otras industrias o mediante técnicas de tratamiento que aseguren la completa neutralización de contaminantes (de Vera, 2024).
- Los avances tecnológicos, como la integración de la inteligencia artificial en la clasificación y optimización de la cadena de recuperación, han mostrado un potencial significativo para mejorar la eficiencia y reducir los costos del proceso. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías aún se encuentra en etapas emergentes y requiere de mayores inversiones en investigación y desarrollo. La consolidación de sistemas basados en IA podría potenciar la precisión de la separación de componentes y la optimización de procesos, pero requiere un enfoque multidisciplinario que involucra a expertos en tecnología, medio ambiente y economía.

Es así como se evidencia que la minería urbana de semiconductores y materiales críticos no solo representa una solución técnicamente viable, sino que también se alinea con los objetivos globales de sustentabilidad ambiental y seguridad en la cadena de suministro. Las técnicas de recuperación analizadas—cuando se comparan con los métodos tradicionales—ofrecen ventajas significativas en cuanto a la reducción de la huella de carbono, la minimización de residuos y la diversificación de fuentes de insumos críticos. No obstante, la implementación efectiva de estos procesos depende de la superación de diversas limitaciones técnicas, económicas y regulatorias, lo cual demanda una innovación continua y el fortalecimiento de marcos normativos internacionales.

Conclusiones o Reflexiones

Al término de este análisis sobre la aplicación de la minería urbana en la recuperación de semiconductores y materiales críticos, resulta evidente que se está ante una transformación paradigmática en la forma de concebir el ciclo de vida de los productos tecnológicos. La acumulación acelerada de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) representa simultáneamente un desafío ambiental y una oportunidad económica sin precedentes. Los semiconductores, elementos fundamentales para el funcionamiento de dispositivos que sostienen la sociedad digitalizada actual, pueden ser recuperados mediante procesos técnicos avanzados, reduciendo así la dependencia de la minería primaria y sus efectos nocivos asociados.

El recorrido analítico realizado a través de las tres etapas fundamentales del proceso de minería urbana ha permitido identificar las potencialidades y limitaciones de este enfoque innovador. En la etapa de recuperación, se ha constatado que la implementación de métodos especializados de extracción constituye el primer eslabón para transformar lo que convencionalmente se considera "desecho" en un recurso valioso. La Tabla 1 ha sido clave para ilustrar la diversidad de métodos disponibles (mecánicos, químicos, térmicos), sus ventajas y limitaciones específicas, así como ejemplos concretos de su aplicación en la industria (ej. Ambipar en Brasil, Midas en Chile). Estos casos de estudio demuestran que la segregación adecuada de componentes electrónicos y su posterior tratamiento pueden generar rendimientos significativos en términos de recuperación de materiales de alto valor. No obstante, persisten desafíos relacionados con la logística de recolección y con la heterogeneidad de los dispositivos, aspectos que requieren soluciones adaptativas y flexibles por parte de los ingenieros industriales involucrados en estos procesos.

La fase de procesamiento, caracterizada por la aplicación de técnicas de purificación y separación, representa el núcleo técnico de la minería urbana. Las metodologías analizadas revelan que es posible alcanzar niveles de calidad similares a los obtenidos a partir de materias primas vírgenes, siempre que se implementen procesos adecuados de tratamiento físico-químico. La transformación de residuos complejos en insumos de alta pureza demanda no solo equipamiento especializado, sino también conocimientos interdisciplinarios que integren principios de la química, la física y la ingeniería de materiales. Este aspecto subraya la importancia de la formación integral de los profesionales de la ingeniería industrial, quienes deben desarrollar competencias diversas para optimizar estos procesos de transformación.

El análisis de la etapa de reinserción ha evidenciado que la incorporación de semiconductores recuperados en nuevos ciclos productivos cierra el círculo de la economía circular, generando beneficios tangibles tanto para las empresas como para el medio ambiente. La experiencia de iniciativas como las desarrolladas por Ambipar en Brasil o el proyecto "Rodrigo Scrap Reciclaje Ecología" en Venezuela demuestra que es factible establecer modelos de negocio rentables basados en la valorización de residuos electrónicos. La reinserción efectiva de materiales recuperados requiere, sin embargo, el establecimiento de estándares de calidad rigurosos y sistemas de trazabilidad que garanticen la confiabilidad de los componentes, aspectos que deben ser prioritarios en cualquier implementación industrial de estos procesos.

En cuanto a los objetivos sostenibles asociados a la minería urbana, se ha confirmado su alineación con las metas globales de reducción de impacto ambiental. La disminución de la huella de

carbono se logra mediante la sustitución de procesos extractivos intensivos en energía por métodos de recuperación más eficientes. Los datos analizados sugieren que la energía requerida para recuperar materiales a partir de RAEE es considerablemente menor que la necesaria para extraerlos de fuentes primarias, lo que representa una ventaja significativa en términos de mitigación del cambio climático.

En ese orden de ideas, la minimización de residuos a través de la valorización de subproductos contribuye a reducir la presión sobre los sistemas de disposición final. La conservación de recursos naturales, otro objetivo fundamental identificado en el estudio se materializa en la reducción de la demanda de minería primaria, actividad asociada con impactos severos como la deforestación y la contaminación. La Tabla 2 ha reforzado esta perspectiva, detallando claramente las diferencias en el proceso de extracción, impacto ambiental, costos operativos e inversión inicial, y demostrando la superioridad de la minería urbana en términos de sostenibilidad y rentabilidad.

Desde la perspectiva de la ingeniería industrial, la implementación de sistemas de minería urbana representa un campo fértil para la aplicación de metodologías de optimización y mejora continua. Los principios de manufactura esbelta, combinados con enfoques de análisis de ciclo de vida, pueden potenciar la eficiencia de estos procesos y maximizar la recuperación de valor. El diseño de plantas de tratamiento que integren automatización, sensores avanzados y sistemas de control de calidad constituye un desafío técnico que demanda soluciones innovadoras por parte de los ingenieros industriales. Adicionalmente, la aplicación de herramientas de análisis de datos y modelado predictivo puede contribuir a anticipar flujos de residuos y a planificar capacidades de procesamiento, aspectos críticos para la viabilidad económica de estos proyectos.

Los marcos teóricos examinados en la investigación, particularmente la economía circular, el metabolismo y la ecología industrial, ofrecen fundamentos conceptuales sólidos para el desarrollo de la minería urbana. La transición desde modelos lineales hacia sistemas circulares implica repensar no sólo los procesos productivos, sino también las relaciones entre diferentes actores industriales. Los ingenieros industriales, como diseñadores y gestores de sistemas complejos, están llamados a liderar esta transición, facilitando la colaboración intersectorial y el establecimiento de redes de valor sostenibles.

El análisis de casos internacionales y políticas públicas ha revelado que el entorno regulatorio juega un papel determinante en la viabilidad de la minería urbana. Iniciativas como el Circular Economy Action Plan de la Unión Europea establecen marcos propicios para la inversión en tecnologías de recuperación y reciclaje. Los profesionales de la ingeniería industrial deben mantenerse actualizados sobre estas tendencias regulatorias, ya que condicionan no sólo los aspectos técnicos de los procesos,

sino también su factibilidad económica. La capacidad para adaptar soluciones tecnológicas a diferentes contextos normativos constituye una competencia valiosa en este campo emergente.

Las perspectivas futuras para la minería urbana de semiconductores son prometedoras, especialmente considerando el crecimiento sostenido en la generación de RAEE y la creciente escasez de ciertos materiales críticos. El desarrollo de tecnologías más eficientes para la recuperación selectiva de elementos de alto valor, combinado con avances en el diseño de productos que faciliten su posterior desmontaje y reciclaje, podría potenciar significativamente los beneficios de este enfoque.

En conclusión, la minería urbana aplicada a semiconductores y materiales críticos representa mucho más que una solución técnica para el manejo de residuos electrónicos; constituye un enfoque integral que redefine la relación entre producción, consumo y regeneración de recursos. Su implementación efectiva requiere no sólo de avances tecnológicos, sino también de transformaciones profundas en los modelos de negocio y en los marcos regulatorios. Los ingenieros industriales, con su visión sistémica y su capacidad para integrar aspectos técnicos, económicos y ambientales, están posicionados idealmente para liderar esta transformación hacia sistemas productivos más sostenibles y resilientes. El camino hacia su consolidación como práctica industrial estandarizada demandará esfuerzos sostenidos en investigación, desarrollo e implementación, pero los beneficios potenciales para la sociedad y el planeta justifican ampliamente estas inversiones.

Referencias

- Ambipar Group. (3 de diciembre de 2024). *Entiende qué es la minería urbana y descubre cómo funciona*. <https://ambipar.com/es/noticias/entiende-que-es-la-mineria-urbana-y-descubre-como-funciona-el-mayor-proyecto-del-pais/>
- Forti, V.; Baldé, C.; Kuehr, R. & Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, Flows and the Circular Economy Potential*. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf
- Cerda, E. (31 de mayo de 2023). *Minería urbana: recuperar la riqueza que se estaba desechando*. País Circular. <https://www.paiscircular.cl/economia-circular/mineria-urbana-recuperar-la-riqueza-que-se-esta-desechando/>
- De Vera, B. (02 de julio de 2024). *Minería urbana: tu móvil como materia prima*. Ecovidrio. <https://hablandoenvidrio.com/mineria-urbana/>

- Esteve, J. (03 de enero 2020). *La minería urbana o cómo aprovechar los materiales de tu móvil*. El Confidencial. https://www.elconfidencial.com/sociedad/2020-01-03/mineria-urbana-reciclaje-materiales-movil-bra_2396996/
- European Commission. (2020). *Circular Economy Action Plan*. <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>
- Fernández, G. (2013). *Minería urbana y la gestión de los recursos electrónicos*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Grupo Uno.
- Baldé, C. Kuehr, R., Yamamoto, T., McDonald, R., D'Angelo, E., Althaf, S. Bel, G., Deubzer, O., Fernández-Cubillo, E., Forti, V., Gray, V., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Khatriwal, D., Cortemiglia, V., Lobuntsova, Y., Nnorom, I., Pralat, N. & Wagner, M. (2024). Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) e Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones (UNITAR). 2024. Observatorio internacional sobre residuos electrónicos 2024. Ginebra, Bonn. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/12/GEM_2024_ES_11_NOV-web.pdf
- Márquez, T. (25 de marzo de 2022). *Un joven maestro del reciclaje en el taller de Rodrigo Scrap*. La Inventadera. <https://lainventadera.com/2022/03/25/un-joven-maestro-del-reciclaje-en-el-taller-de-rodrigo-scrap/>
- Woollacott, E. (13 de junio 2018). Cómo las 'Minas Urbanas' pueden convertirse en una Rica Fuente de Preciosos Minerales. BBC New Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-44749073>
- Millán, G. & Rossouw, A. (28 de junio de 2024). Mine 2024: 21a edición. Prepararse para el impacto. <https://www.pwc.com/cl/es/Publicaciones/mine-2024.html>
- OECD. (2022). *Urban Mining: The Role of Recycling in Sustainable Development*. OECD Publishing.