

Reciclaje sostenible de pilas: Recuperación de materiales críticos para un futuro más verde

Sustainable Battery Recycling: Recovery of Critical Materials for a Greener Future

Airam Estefanía Núñez Rodríguez¹, Karen Ximena Ortiz Maciel¹, Amanda Enriqueta Violante Gavira¹, Wilma Betzabe Rojas Salinas¹

¹ Ingeniería Mecánica, División de Ciencias e Ingenierías.
ae.nunezrodriguez@ugto.mx, kx.ortizmaciel@ugto.mx, amanda@ugto.mx, wilma.rojas@ugto.mx

Resumen

El uso masivo de pilas alcalinas representa un riesgo ambiental creciente debido a su corta vida útil, manejo inadecuado al ser desechadas y la presencia de materiales tóxicos como óxidos metálicos, metales pesados y electrolitos corrosivos. La incorrecta gestión de estos residuos provoca filtraciones al suelo y al agua subterránea provocando una contaminación persistente que afecta los ecosistemas, dañando la biodiversidad y la calidad del agua, con potencial riesgo para la salud humana. Este estudio tiene como objetivo analizar y recuperar los principales componentes de las pilas alcalinas (óxido de manganeso, zinc, grafito y aluminio), con el fin de promover su reuso didáctico en laboratorios universitarios de Química y reducir su impacto ambiental. Se contextualiza el marco legal mexicano vigente, el cual clasifica las pilas como residuos peligrosos o de manejo especial. Se recolectaron 100 pilas alcalinas, de las cuales se seleccionaron 46 sin carga residual, clasificadas en 10 grupos según marca, tamaño y modelo. Se aplicó un procedimiento sistemático de desmantelamiento, separación, gravimetría y purificación. Los resultados muestran que el óxido de manganeso fue el componente predominante, mientras que el grafito presentó mayor pérdida en la etapa de purificación. Se evidenció que el reciclaje permite obtener materiales reutilizables para fines educativos, favoreciendo la sostenibilidad institucional y fortaleciendo la conciencia ambiental en la comunidad universitaria. Finalmente, el estudio propone consolidar protocolos para replicar esta práctica en otros entornos académicos, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en lo referente al manejo responsable de residuos y uso eficiente de recursos.

Palabras clave: pilas alcalinas; reciclaje; Zinc; Aluminio; Oxido de manganeso; Grafito.

Introducción

Hoy en día el uso masivo de pilas alcalinas en la vida cotidiana representa potencial daño para los seres vivos. La sociedad moderna enfrenta un desafío más para tratar de reducir los impactos negativos al medio ambiente. La elevada demanda de estos dispositivos, corta vida útil y manejo inadecuado manejo hacen tras su desecho son factores que desatan una severa contaminación del suelo, del agua superficial y del agua subterránea.

Estas pilas, ampliamente utilizadas en dispositivos portátiles como controles remotos, juguetes, dispositivos electrónicos y relojes, contienen materiales como zinc, manganeso, grafito y electrolitos alcalinos, que al ser desechados sin control pueden representar riesgos significativos para el entorno natural y la salud pública (Balde, 2017).

Uno de los principales problemas ambientales es la disposición inadecuada de las pilas en la basura común, denominada residuos sólidos urbanos. Esto es común en muchos países, especialmente en regiones donde no existen sistemas eficientes de recolección y reciclaje y una falta de cultura y educación ambiental. Una vez en vertederos, las pilas pueden corroerse y liberar compuestos tóxicos al suelo y al agua, afectando ecosistemas y contaminando cuerpos de agua (Pérez & Rivas, 2019). El óxido de manganeso y otros metales pesados presentes en las pilas pueden tener efectos acumulativos en organismos vivos, incluyendo alteraciones en el sistema nervioso y daños a órganos vitales (Ramírez & Ortega, 2019). A pesar de que algunos países han implementado leyes para fomentar el reciclaje y el acopio responsable de estos residuos, la tasa de recolección sigue siendo baja en muchas regiones, lo que agrava el impacto ambiental de este tipo

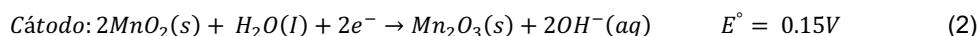
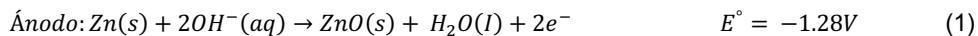
de residuos peligrosos. Por ello, es fundamental promover programas educativos, campañas de concientización y soluciones tecnológicas que permitan reducir, reutilizar y reciclar los materiales de las pilas, en especial en entornos universitarios y académicos donde pueden ser aprovechados en prácticas experimentales (Pardo *et al.*, 2020). Reconocer el problema ambiental de las pilas alcalinas permite avanzar hacia una gestión responsable de residuos peligrosos, contribuyendo a una cultura de sustentabilidad y economía circular.

Funcionamiento de pilas

Las pilas, también conocidas como baterías electroquímicas, son dispositivos capaces de transformar energía química en energía eléctrica mediante reacciones simultáneas de oxidación y reducción. Estos procesos modifican químicamente los componentes internos, generando cambios reversibles o irreversibles, dependiendo de la naturaleza del sistema electroquímico involucrado (INTI, 2022).

Cada pila se compone de celdas electroquímicas interconectadas, que pueden disponerse en serie o en paralelo para alcanzar la tensión o capacidad requerida. Estas celdas contienen dos electrodos: ánodo (negativo) y cátodo (positivo) y un electrolito que permite el flujo iónico. La oxidación ocurre en el ánodo y la reducción en el cátodo, reacciones que ocurren de forma simultánea y se describen mediante semirreacciones. La fuerza electromotriz (FEM) es la diferencia de potencial generada entre ambos electrodos y define la eficiencia del sistema. Esta FEM es la suma de los potenciales estándar de cada celda. Un ejemplo común es la pila alcalina de zinc (Zn) y dióxido de manganeso (MnO_2), cuya FEM estándar se calcula como 1.43 V.

Las Ecuaciones (1) y (2) corresponden a las semirreacciones del ánodo y cátodo respectivamente. Mientras que la Ecuación (3) representa la reacción global del proceso electroquímico.



$$E = E^\circ_{\text{cátodo}} - E^\circ_{\text{ánodo}} = 0.15 - (-1.28 V) = 1.43 V \quad (3)$$

Las pilas alcalinas son una fuente significativa de materiales valiosos que, tras su vida útil, pueden ser recuperados mediante procesos de reciclaje para su reutilización en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas. Entre los componentes más importantes extraídos de estas pilas destacan el aluminio, el zinc, el óxido de manganeso y el grafito, cada uno con propiedades específicas que permiten su aprovechamiento eficiente y sustentable.

El **aluminio** es uno de los metales más utilizados en la fabricación de la carcasa exterior de las pilas alcalinas. Este metal ligero se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión, buena conductividad térmica y eléctrica, y excelente relación resistencia-peso, lo que lo hace ideal para aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz, y construcción, así como en la manufactura de componentes electrónicos y envases. La recuperación de aluminio de pilas usadas contribuye a la reducción del consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, dado que el reciclaje de aluminio requiere hasta un 95% menos de energía que la producción primaria (García-Sánchez *et al.*, 2021).

Por otro lado, el zinc desempeña un papel importante como ánodo en las pilas alcalinas. Este metal posee una alta reactividad química y capacidad reductora, lo que lo convierte en un material esencial para la producción de nuevas baterías, además de su uso en galvanoplastia, protección anticorrosiva y como catalizador en procesos químicos. La extracción y reciclaje del zinc no solo ayuda a mitigar la contaminación ambiental provocada por la acumulación de pilas usadas, sino que también asegura una fuente sustentable para la industria metalúrgica (González *et al.*, 2020).

El óxido de manganeso (MnO_2) es un componente fundamental que actúa como material catódico en las pilas alcalinas, gracias a sus propiedades electroquímicas que permiten una transferencia eficiente de electrones durante la descarga de la batería. Este compuesto es ampliamente empleado en la fabricación de baterías recargables, también es usado como catalizadore en procesos químicos y en sistemas de almacenamiento de energía. La recuperación de óxido de manganeso a partir de pilas gastadas ofrece una fuente económica

para la producción de estos materiales y, además contribuye a la gestión responsable de residuos electrónicos (Ramírez & Ortega, 2019).

Finalmente, el grafito, que es el electrodo conductor central dentro de la pila, se caracteriza por su elevada conductividad eléctrica, resistencia térmica y estructura laminar, propiedades que lo hace muy útil en aplicaciones en la industria metalúrgica, así como en la producción de materiales compuestos y de componentes electroquímicos. La reutilización del grafito recuperado de pilas alcalinas ayuda a reducir la extracción de recursos naturales y con ello se fomenta la economía circular en la industria de los materiales (López-Morales, Suárez, & Rentería, 2022).

La recuperación y valorización de dichos materiales a partir de pilas alcalinas desechadas representan una oportunidad estratégica para promover la sustentabilidad, reducir el impacto ambiental y apoyar el desarrollo tecnológico e industrial. Además, el aprovechamiento eficiente de estos recursos contribuye a la economía circular, fomentando prácticas responsables y sostenibles en el manejo de residuos de manejo especial, al que pertenecen estos dispositivos.

Las pilas se clasifican según su capacidad de recarga en dos tipos principales: primarias (no recargables) y secundarias (recargables). También se diferencian por su composición química: alcalinas, de litio, de níquel-cadmio, entre otras. En la Figura 1, se representan los componentes de una pila alcalina.

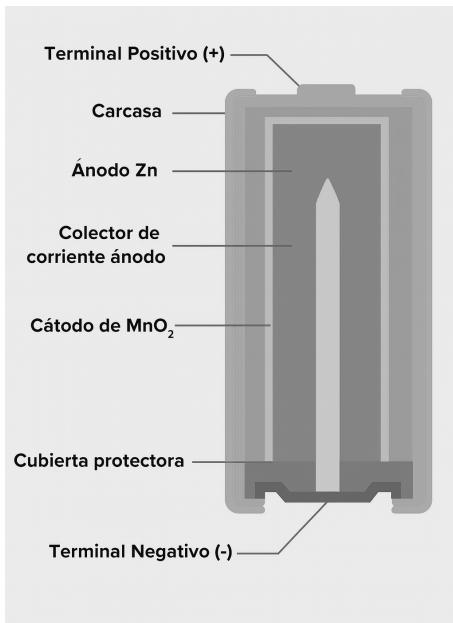


Figura 1. Esquema de una pila primaria alcalina (INTI, 2022).

El ciclo de vida de una pila alcalina comprende una secuencia de etapas que van desde la obtención de materias primas hasta su disposición final o reutilización. Comprender este ciclo es fundamental para evaluar su impacto ambiental y fomentar prácticas sostenibles en su manejo.

Las etapas clave son: producción, distribución, uso, recolección posconsumo, tratamiento y reciclaje. Producción. Es la etapa que inicia con la extracción de materias primas, como zinc, manganeso, grafito y aluminio, obtenidas principalmente mediante minería. Posteriormente, estos elementos son procesados y ensamblados en forma de pilas alcalinas. Esta fase tiene una elevada huella ambiental, debido al consumo de energía requerida, la generación de residuos industriales y las emisiones producidas (Balde, 2017).

Distribución. Una vez fabricadas, las pilas son transportadas y distribuidas a los puntos de venta para su comercialización. Este proceso involucra logística, embalaje y consumo de combustibles fósiles, contribuyendo a la huella de carbono (González *et al.*, 2020).

Uso. Las pilas alcalinas se utilizan ampliamente en dispositivos electrónicos de uso doméstico, educativo y comercial, debido a su bajo costo, buena duración y estabilidad electroquímica. Durante esta fase, la energía química almacenada se transforma en energía eléctrica hasta agotarse su capacidad (Pérez & Rivas, 2019).

Recolección Posconsumo. Al finalizar su vida útil, una enorme cantidad de pilas son desechadas como si se tratara de residuos sólidos urbanos. Sin embargo, el manejo adecuado en centros de acopio o campañas de recolección permite separar estos residuos peligrosos y canalizarlos hacia un tratamiento especializado. La educación ambiental y la infraestructura adecuada son esenciales para hacer más eficiente esta etapa (Ramírez & Ortega, 2019).

Tratamiento. El tratamiento incluye procesos físicos y químicos para separar los materiales componentes de las pilas usadas. En algunos casos, estas etapas permiten neutralizar compuestos tóxicos y recuperar materiales aprovechables, reduciendo el impacto al ambiente (López-Morales *et al.*, 2022).

Reciclaje. En esta última etapa, los metales como zinc, óxidos de manganeso, aluminio y grafito pueden ser reutilizados en nuevos procesos industriales o incluso en prácticas de laboratorio escolar universitario, como es nuestro caso. El reciclaje reduce la necesidad de extraer nuevos recursos naturales, disminuye la cantidad de residuos peligrosos y promueve una economía circular más sustentable (Pardo *et al.*, 2020). Ver Figura 2.



Figura 2. Ciclo de vida de las pilas.
Fuente: Adaptado de SEMARNAT (2020).

Importancia del reciclaje y los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El crecimiento exponencial en el consumo de dispositivos electrónicos ha derivado en una generación masiva de residuos, entre ellos las pilas, cuyos componentes metálicos pueden generar impactos severos si no se manejan adecuadamente. En este contexto, el reciclaje se posiciona como una estrategia clave dentro de la economía circular, al reducir la extracción de materias primas y mitigar los efectos ambientales negativos.

Este esfuerzo se vincula directamente con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 7 de la Agenda 2030, que plantea garantizar el acceso universal a energía asequible, segura, sostenible y moderna. El acceso equitativo a la energía impulsa el desarrollo humano, económico y social, siempre que se asegure su sostenibilidad para generaciones futuras (Naciones Unidas, 2015).

Balance comercial de pilas en México

Durante 2024, el comercio total de pilas y baterías en México ascendió a 438 millones de dólares, incluyendo importaciones y exportaciones. Las entidades con mayores compras fueron Chihuahua, Jalisco y Ciudad de México, mientras que los principales destinos de exportación fueron Estados Unidos, Malasia y Honduras (Secretaría de Economía, 2025). Ver Figura 3.

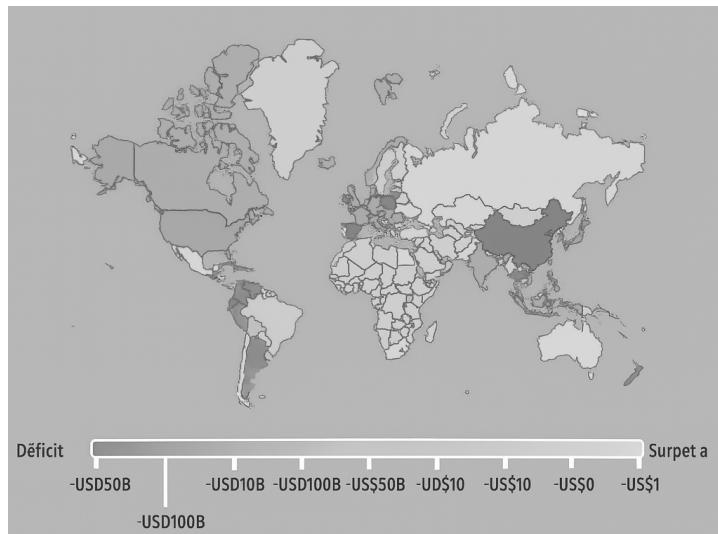


Figura 3. Balance comercial neto de México y el mundo (2024). Secretaría de Economía (2025).

En el ámbito económico, en marzo de 2025, el déficit comercial fue de -22.7 millones USD, resultado de exportaciones por 1.98 millones y compras internacionales por 24.6 millones de dólares. Estos datos muestran la urgente necesidad de fortalecer estrategias de reciclaje interno en los estados y reducción de dependencia externa (Secretaría de Economía, 2025). En la Figura 4 se ilustra este fenómeno.



Figura 4. Balance comercial neto según entidad federativa (2024). Secretaría de Economía (2025).

A continuación, se indican las principales entidades federativas de la República Mexicana que más aportan al reciclaje de pilas y por ello destacan por una mayor conciencia ambiental.

Ciudad de México, que cuenta con el programa “Ponte Pilas con tu Ciudad”, que dispone de más de 400 centros de acopio distribuidos en 13 alcaldías. Una empresa privada (IMU) recoge las pilas quincenalmente y las envía a una planta de reciclaje en Irapuato, Guanajuato, donde se clasifican y procesan (Gobierno de la Ciudad de México, 2025).

Estado de México. Esta entidad tiene el centro de acopio temporal de la CDMX, ubicado en Naucalpan, participa activamente en la acumulación de toneladas de pilas recolectadas antes de enviarlas a Guanajuato (Gobierno de la Ciudad de México, 2025).

Guanajuato. En el municipio de Irapuato se encuentra la planta de SITRASA, la primera y única en Latinoamérica especializada en el tratamiento industrial de pilas alcalinas. En ella se logra la recuperación del 100 % de los materiales útiles (hierro, zinc, manganeso y carbono), contribuyendo significativamente a la economía circular y con ello a la reducción de impacto ambiental al suelo y al agua (SITRASA, 2025).

Nuevo León. Monterrey participa en programas municipales e institucionales liderados por universidades como el Tecnológico de Monterrey y el Instituto Politécnico Nacional. Además, colabora con empresas especializadas como RIMSA, enfocadas en la recolección y reciclaje de pilas usadas (Pérez & Rivas, 2019).

Baja California Sur. El municipio de Loreto trabaja activamente el reciclaje de pilas a través de alianzas con empresas privadas, centros de acopio y campañas de concientización ambiental, destacando como ejemplo en la región noroeste (El Sudcaliforniano, 2021).

Marco legal en México sobre residuos de pilas

Desde 2001, México suspendió la producción nacional de pilas, dependiendo completamente de la importación. México ha ratificado el Convenio de Minamata sobre mercurio, comprometiéndose a limitar el uso de este metal pesado en pilas, salvo en casos excepcionales (por ejemplo, pilas botón de óxido de plata o zinc-aire con menos del 2% de mercurio).

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y la NOM-052-SEMARNAT-2005 establecen que las pilas pueden clasificarse como residuos peligrosos o de manejo especial, dependiendo de su contenido de metales pesados. Las pilas con óxido de mercurio (Zn-HgO) o níquel-cadmio (Ni-Cd) son consideradas peligrosas, mientras que aquellas con menor concentración de metales como litio, zinc o manganeso se catalogan como residuos de manejo especial (SEMARNAT, 2020).

Facultades de los gobiernos federal, estatal y municipal

El marco jurídico mexicano asigna competencias específicas a los tres niveles de gobierno para garantizar un manejo adecuado de los residuos de pilas. A nivel federal, la autoridad se encarga del registro de planes de manejo para residuos peligrosos, la autorización de prestadores de servicios y la supervisión de planes ejecutados por grandes generadores y comercializadores de pilas con contenido de mercurio o níquel-cadmio, conforme a lo dispuesto en el artículo 31 de la LGPGIR y la NOM-052-SEMARNAT-2005.

Por su parte, los gobiernos estatales y municipales deben integrar estos residuos en sus programas locales de gestión, con especial atención en aquellos residuos considerados de manejo especial. Además, tienen la responsabilidad de registrar los planes de manejo de grandes generadores que excedan las 10 toneladas anuales y establecer y gestionar esquemas de separación y tratamiento adecuados, según el artículo 23 de la LGPGIR (SEMARNAT, 2025).

Beneficios ambientales del reciclaje de pilas

El reciclaje de pilas y baterías ofrece importantes beneficios ambientales que justifican su implementación sistemática. En primer lugar, permite minimizar la acumulación de residuos tóxicos en vertederos, reduciendo así el riesgo de filtraciones contaminantes. Asimismo, evita la contaminación de suelos y cuerpos de agua, al contener sustancias químicas peligrosas como metales pesados y electrolitos corrosivos. Otro beneficio clave es la posibilidad de recuperar metales valiosos como litio, zinc y níquel, lo que disminuye la presión sobre los recursos naturales y reduce la necesidad de minería primaria, una actividad que suele tener un alto impacto ecológico. Además, este proceso contribuye activamente a la economía circular, al permitir que los materiales extraídos de las pilas sean reincorporados a nuevos ciclos productivos, prolongando su vida útil y reduciendo la generación de desechos (Recycling, 2025).

Reciclaje de materiales de pilas alcalinas en laboratorios escolares universitarios

El reciclaje de materiales provenientes de pilas alcalinas en laboratorios escolares universitarios representa una estrategia educativa y ambiental muy importante para promover la sustentabilidad y el aprovechamiento eficiente de recursos. Componentes como el aluminio, zinc, óxido de manganeso y grafito, recuperados tras la disposición adecuada de pilas usadas, pueden ser reutilizados en diversas prácticas de laboratorio, fomentando el aprendizaje práctico y consciente del ciclo de vida de los materiales.

Esta reutilización contribuye a reducir la generación de residuos electrónicos, que representan un problema ambiental significativo debido a la presencia de sustancias tóxicas y metales pesados (Balde, 2017). Al incorporar estos materiales reciclados en actividades académicas, los estudiantes no solo desarrollan habilidades técnicas, sino que también adquieren conciencia sobre la importancia del manejo responsable de residuos y la economía circular (Pardo *et al.*, 2020). Además, el uso de materiales recuperados en el laboratorio permite disminuir costos operativos y la dependencia de insumos nuevos, facilitando la continuidad de prácticas experimentales sin comprometer la calidad educativa (Smith & Johnson, 2018). Esto es especialmente relevante en instituciones con recursos limitados, donde la reutilización representa una alternativa viable y sostenible. Por otra parte, la integración del reciclaje en el currículo universitario promueve el compromiso social y ambiental entre los futuros profesionistas, quienes estarán mejor preparados para enfrentar los retos de un mundo que demanda prácticas responsables y sostenibles en todos los sectores productivos (Fernández & Ruiz, 2019).

Finalmente, el reciclaje de materiales de pilas alcalinas en laboratorios escolares universitarios es una práctica multidimensional que combina educación, economía y ecología, generando múltiples beneficios para el entorno académico y el medio ambiente.

En este contexto el objetivo de este artículo es analizar y recuperar los principales componentes de las pilas alcalinas con el propósito de promover su reúso con fines didácticos en el laboratorio de Química de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, de la Universidad de Guanajuato, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental sobre el suelo y los cuerpos de agua ocasionado por las sustancias químicas peligrosas que contienen.

Desarrollo

La parte experimental del presente estudio se desarrolló en varias etapas conforme a la metodología (Dubois & Falco, 2021) como se muestra en la Figura 5, estas garantizaron la recuperación eficiente de materiales como: óxido de manganeso, grafito, zinc y aluminio, y la minimización del impacto ambiental.

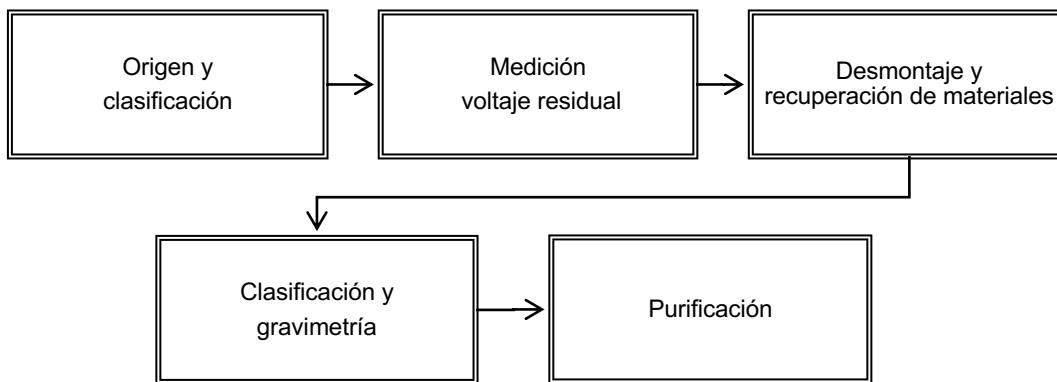


Figura 5. Etapas del proceso de recuperación.

Estas etapas del proceso de recuperación de los componentes de las pilas se describen a continuación:

1. Origen y clasificación

Se dispuso de 100 pilas que se recolectaron en la Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato – Salamanca (DICIS), por parte del grupo organizado DIVE en 2024; se clasificaron por marca y clase en alcalinas y no alcalinas (Dubois & Falco, 2021).

2. Medición del voltaje residual

Antes de proceder a la separación de materiales, se midió el voltaje de cada pila utilizando un multímetro digital (Truper MUT - 105, 0.2 - 1000 V) sobre una superficie aislada y libre de materiales conductores, ajustado en la escala de voltaje corriente continua para asegurar que no tenían carga residual. Este proceso se realizó de manera segura para todas las pilas, logrando con ello la identificación de 46 pilas alcalinas sin carga residual (Energizer, 2022).

3. Seguridad y equipo de protección personal

Para el proceso de desmontaje de las pilas alcalinas, se emplearon medidas de seguridad básicas para proteger la integridad del equipo y de los participantes, como se muestra en la Figura 6. Se utilizó bata de laboratorio, guantes de nitrilo, lentes de seguridad y cubrebocas para evitar el contacto directo con los residuos metálicos y el polvo generado durante el desencapsulado.

El área de trabajo se mantuvo ventilada y se contó con recipientes de contención para almacenar temporalmente los residuos metálicos y no metálicos. Estas precauciones garantizaron la manipulación segura de los componentes y el cumplimiento de las buenas prácticas ambientales establecidas por la División de Ingenierías.



Figura 6. Aplicación de medidas de seguridad durante montaje de pilas.

4. Desmontaje y recuperación de materiales

Se emplearon métodos físicos (Hernández et al., 2024) para desmontar y separar componentes de las pilas alcalinas (Rentería & Plata, 2022). Ver Figura 7. El proceso incluye el retiro del plástico protector, la separación de la cubierta metálica de aluminio, la separación del óxido de manganeso y, finalmente, la separación exhaustiva del grafito o zinc (Hernández, 2019).



Figura 7. Separación de materiales recuperados de las pilas alcalinas.

5. Clasificación y gravimetría

Una vez completado el proceso de separación y clasificación de los materiales extraídos de las pilas alcalinas, se procedió a realizar la gravimetría de las 46 pilas organizadas en 10 grupos (G1-G10). El pesaje de las muestras obtenidas se realizó con una balanza semi analítica (BEL LW203I) en condiciones controladas para evitar errores en la medición y garantizar la exactitud de los resultados. Se procedió a realizar el registro de pesos para cada grupo de estudio, con la finalidad de establecer patrones en la composición. Para ello se calcularon los respectivos promedios de pesos para cada grupo, empleando estadística descriptiva.

En la Tabla 1 y Tabla 2 se indican las especificaciones de cada grupo de pilas.

Tabla 1. Primeros cinco grupos de pilas de trabajo (G1-G5).

Especificaciones	G1	G2	G3	G4	G5
Número de pilas	3	8	7	3	6
Marca	MAXEL L	YOLBAJ O	HW	ROCKE T	DURAC ELL
Modelo	AA	AAA	AA	AAA	AA
Voltaje	1.5 V	1.5 V	1.5 V	1.5 V	1.5 V

Tabla 2. Segundos cinco grupos de pilas de trabajo (G6-G10).

Especificaciones	G6	G7	G8	G9	G10
Número de pilas	4	6	2	2	3
Marca	EVEREADY	DEFIANT	DURACELL	POLCE SECURITY	GP
Modelo	AAA	AA	AAA	AAA	AA
Voltaje	1.5 V	1.5 V	1.5	1.5 V	1.5 V

6. Purificación

Para garantizar la pureza de los materiales obtenidos durante la fase de separación, se llevó a cabo un proceso hidrometalúrgico de lavado individual para el zinc, el óxido de manganeso, el aluminio y el grafito, siguiendo protocolos diferenciados según la naturaleza de cada sustancia (Rentería & Plata, 2022).

Para el tratamiento de limpieza del zinc, se aplicaron lavados con ácido oxálico a temperaturas controladas y lavados con agua destilada para neutralizar el pH a temperatura ambiente, posteriormente fue secado y cepillado vigorosamente, para su almacenamiento. Al óxido de manganeso recuperado, se aplicaron técnicas de molienda, trituración y filtración, finalmente fue sometido a la etapa de secado para su disposición final (Dubois & Falco, 2021). El grafito recolectado fue lavado en una mezcla de agua destilada con ácido oxálico y posteriormente con agua destilada para equilibrar su pH y a la vez para eliminar residuos de manganeso, se procedió a secarlo y reservarlo para su almacenamiento (Chernyaev, et al., 2024). Finalmente, el aluminio recuperado de las pilas alcalinas fue sometido a la lixiviación con ácido oxálico, con técnicas complementarias de secado.

Los residuos de los lavados fueron guardados y etiquetados para su futura disposición conforme a la normativa ambiental vigente como actividad de las buenas prácticas ambientales que se desarrollan en la División de Ingenierías.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados de los procesos mecánicos, físicos y químicos aplicados para la recuperación de los componentes de los 10 grupos de las pilas alcalinas con las que se trabajó en este estudio.

En la Tabla 3 se muestran los pesos promedio determinados por gravimetría para el óxido de manganeso, aluminio, zinc y grafito. Nótese que los grupos: 1, 2, 3, 4 y 6 no contenían aluminio, mientras que los grupos 5 al 10 no contenían grafito.

Tabla 3. Pesos de las muestras en gramos de los materiales recuperados.

Componente	Masas (g) de los grupos de pilas alcalinas									
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
Óxido de manganeso	6.559	7.420	8.798	5.048	13.728	4.886	13.133	6.945	5.588	12.204
Aluminio	0	0	0	0	4.320	0	4.022	2.575	3.370	3.670
Zinc	6.289	2.509	4.575	2.294	4.709	2.918	4.865	1.818	2.481	4.144
Grafito	1.359	1.814	1.454	1.101	0	1.396	0	0	0	0

De manera sintética en la Figura 8 se indica el comportamiento de la masa del óxido de manganeso con relación al zinc recuperados para todos los grupos de pilas trabajados. Lo que demuestra que el óxido de manganeso es el componente predominante.

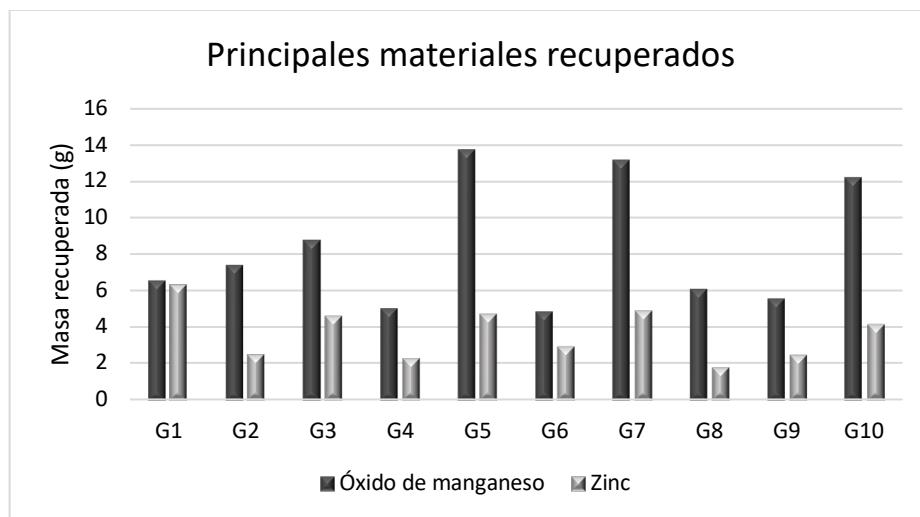


Figura 8. Masa total de óxido de manganeso y zinc para los 10 grupos de pilas.

A continuación, en las Figuras: 9, 10, 11 y 12 se muestran imágenes de los materiales recuperados a partir de las pilas alcalinas. En la parte izquierda se observan dichos materiales antes del tratamiento de limpieza y en la parte derecha se aprecian los resultados de este proceso.



Figura 9. Zinc recuperado.



Figura 10. Óxido de manganeso recuperado.



Figura 11. Grafito recuperado.



Figura 12. Aluminio recuperado.

En la Tabla 4 se observan los registros del total de las masas de Óxido de manganeso, Aluminio, Zinc y grafito con y sin impurezas.

En el caso del zinc, tras el tratamiento se presentó perdida menor en comparación con la cantidad total recuperada, indicando una buena eficiencia del tratamiento, por último, para el grafito, la masa se redujo significativamente, lo que sugiere que el grafito recuperado inicialmente contenía una porción considerable de óxido de manganeso.

Tabla 4. Masas de los materiales recuperados en este estudio.

Componente	Masa total (g) recuperada con impurezas	Masa total (g) recuperada con tratamiento de purificación
Óxido de manganeso	84.309	78.699
Aluminio	17.957	17.020
Zinc	34.093	32.960
Grafito	7.124	5.274

Los datos obtenidos permiten identificar tendencias en la cantidad de materiales recuperables según la marca y el modelo de la pila. Esta información es clave para evaluar la viabilidad del reciclaje y su impacto en la recuperación de materiales críticos.

Con relación al óxido de manganeso y al zinc recuperados, los resultados son semejantes a los obtenidos por Celikler & Kara (2015) y Yesiltepe, Bugdayci, Yucel, & Sesen (2019).

En la Figura 13 se observan los promedios de masa total antes y después del proceso de limpieza de los materiales recuperados de a partir de los grupos de las pilas.

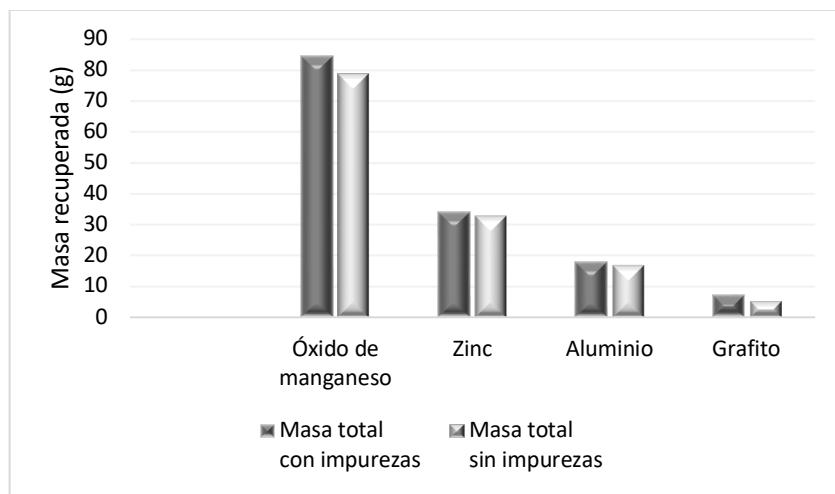


Figura 13. Massas de los materiales recuperados con el reciclaje.

Estas sustancias fueron almacenadas y etiquetadas para ser reutilizadas en prácticas del laboratorio de Química.

En la Figura 14 se indica el porcentaje de recuperación de los materiales trabajados. Se observa que prácticamente no hubo pérdidas en la recuperación del óxido de manganeso, zinc y aluminio, situación que no ocurrió con el grafito, esto podría deberse a su estructura laminar suave y, por lo tanto, más vulnerable a su manipulación.

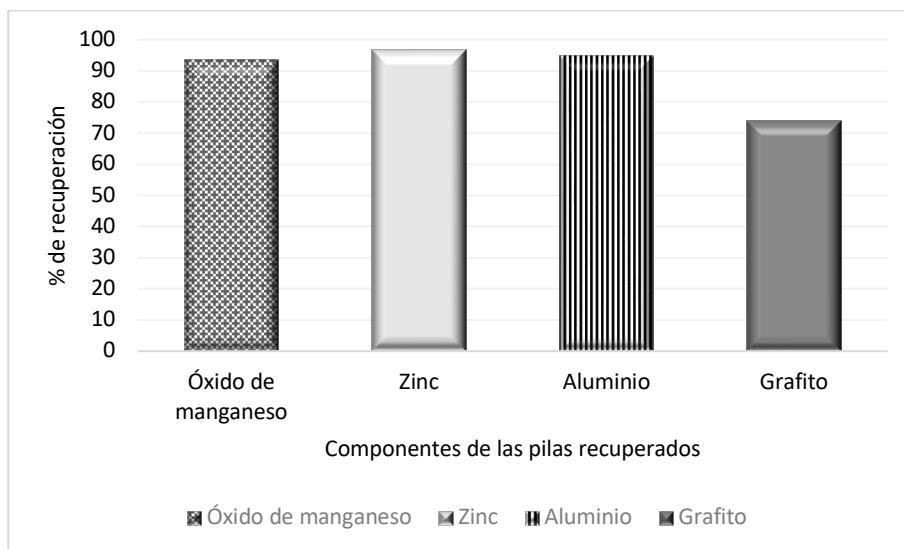


Figura 14. Eficiencia de recuperación de los materiales recuperados.

Conclusiones

El presente estudio demostró la viabilidad técnica y académica del reciclaje de pilas alcalinas a pequeña escala dentro de un entorno universitario. A través de procesos mecánicos y fisicoquímicos, se logró recuperar de forma eficiente materiales críticos como óxido de manganeso, zinc, grafito y aluminio, cuya reutilización en prácticas de laboratorio representa una estrategia sustentable y educativa.

Los resultados obtenidos muestran que el óxido de manganeso fue el componente predominante en la mayoría de los grupos de pilas, mientras que el grafito presentó mayor pérdida durante el proceso de purificación, lo que evidencia la importancia de perfeccionar los métodos de limpieza. La correcta clasificación, desmantelamiento, medición y tratamiento de los materiales permitió obtener productos con potencial de reúso experimental, favoreciendo el aprendizaje activo y la conciencia ambiental de los estudiantes.

Desde el punto de vista ambiental, esta práctica reduce la cantidad de residuos peligrosos que se disponen de forma inadecuada, disminuye la explotación de los recursos naturales y fortalece la cultura de economía circular en instituciones educativas. Además, este tipo de iniciativas contribuyen a cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente en lo referente al manejo responsable de residuos y el uso eficiente de los recursos.

Finalmente, se recomienda ampliar esta práctica hacia otras áreas del conocimiento, consolidar campañas de recolección y crear protocolos estandarizados que permitan la réplica del proceso en distintas instituciones educativas.

Bibliografía/Referencias

- Balde, C. (2017). The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows, and resources. Boon: United Nations University.
- Celikler, D., & Kara, F. (2015). An Educational approach to the recycling and disposal of waste batteries. *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 4(1), 16-18.
- Chernyaev, A., Kobets, A., Liviand, K., Tesaye, F., & Hupa, L. (2024). Graphite recovery from waste Li-ion battery black mass for direct re-use. *Minerals Engineering*, 1-12.
- Dubois, M., & Falco, L. (2021). Un problema ambiental serio: el reciclado de pilas y baterías. *Ambiente en Diálogo*, 37-51.
- El Sudcaliforniano. (8 de julio de 2021). Obtenido de Puerto Escondido. Impulsan reciclaje de pilas alcalinas: <https://oem.com.mx/elsudcaliforniano/local/puerto-escondido-impulsan-reciclaje-de-pilas-alcalinas-24049926>
- Energizer. (2022). Ficha de información del artículo/Hoja de datos de seguridad (AIS/SDS). Energizer.
- Fernández, M., & Ruiz, C. (2019). Integración de la Sustentabilidad en la Educación Superior: Desafíos y Oportunidades. *Educación y Desarrollo Sostenible*, 23-38.
- García-Sánchez, A., Ríos, M., & Calderón, J. (2021). Recuperación y caracterización de metales en pilas alcalinas usadas. *Revista de Materiales Reciclables*, 45-53.
- Gobierno de la Ciudad de México. (30 de junio de 2025). Obtenido de Ponte las pilas en tu ciudad: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/ponte-pilas-con-tu-ciudad>
- González, E., Méndez, R., & Vargas, P. (2020). Reaprovechamiento del zinc en pilas usadas para aplicaciones electroquímicas. *Ciencia y Energía*, 67-74.
- Hernández, F., García, E., & Miranda, C. (2024). Buenas prácticas de los residuos químicos peligrosos del laboratorio de química. Salamanca, Gto.
- Hernández, O. E. (2019). Reciclaje de pilas alcalinas y ion litio para recuperación de materiales. de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

INTI. (2022). Manual de procesos industriales sostenibles. Buenos Aires. Ministerio de Economía Argentina.

López-Morales, D., Suárez, M., & Rentería, F. (2022). Usos industriales del grafito recuperado en residuos electrónicos. *Revista Latinoamericana de Materiales*, 45-60.

Naciones Unidas. (25 de Septiembre de 2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

Pardo, M., López, A., & García, J. (2020). Educación ambiental y economía circular en la formación universitaria. *Revista de Innovación Educativa*, 46-60.

Pérez, J., & Rivas, M. (2019). Impacto ambiental de pilas desechadas y su gestión adecuada. *Revista de Tecnología y Medio Ambiente*, 33-42.

Ramírez, A., & Ortega, C. (2019). Propiedades del óxido de manganeso y su aplicación en baterías. *Avances en Ingeniería Química*, 21-30.

Recycling, A. (2025). Reciclaje de residuos electrónicos.

Rentería, H., & Plata, C. (2022). Los desechos tecnológicos y su impacto en el medio ambiente y salud de la comunidad. Ecuador: Casa editora del polo.

Secretaría de Economía. (12 de junio de 2025). Obtenido de Pilas y Pilas Eléctricas:

<https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/batteries-and-batteries-electric#:~:text=Balance%20comercial%20neto&text=En%202024%2C%20el%20intercambio%20comercial%20total%20de%20Pilas%20y%20Pilas,de%20entidades%20federativas%20y%20pa%C3%ADses.>

SEMARNAT. (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos. Ciudad de México: BID.

SEMARNAT. (8 de junio de 2025). Obtenido de Guía para el consumo y manejo sustentable de las pilas: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/7384/seeco11_C/seeco11_C.html

SITRASA. (29 de junio de 2025). Obtenido de Tratamiento Ambiental: <https://www.sitrasa.com/>

Smith, R., & Johnson, L. (2018). Cost-effective laboratory practices: Reuse of materials in academic settings. *Journal of Chemical Education*, 456-462

Yesitepe, S., Bugdayci, M., Yucel, O., & Sesen, M. K. (2019). Recycling of alcaline batteries via a carbothermal reduction process. *Bateries*, 5(1), 35.