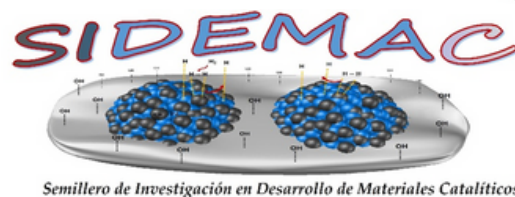




POLITÉCNICO COLOMBIANO  
Jaime Isaza Cadavid



# VALORIZACIÓN DE BATERÍAS ALCALINAS PARA LA PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE MANGANESO

Boletín divulgativo  
CAMER, julio 2025

## Autores

Alba N. Ardila A.<sup>1\*</sup>, Melissa Arango Álvarez<sup>1</sup>, Erasmo Arriola V.<sup>1</sup>, Santiago Bedoya Betancur<sup>1</sup>, Pedro Luis Delvasto Angarita<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables, Facultad de Ciencias y Educación, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia.

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

\*Email contacto: [anardila@elpoli.edu.co](mailto:anardila@elpoli.edu.co)



@PolitecnicoJIC



Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

[www.politecnicojic.edu.co/](http://www.politecnicojic.edu.co/)

# CONTENIDO

01

Estructura interna y composición química de las baterías alcalinas: claves para su aprovechamiento.

02

Contaminación silenciosa: qué ocurre cuando desechamos una batería?

03

Alternativas de valorización: estrategias para recuperar el valor agregado en las baterías alcalinas.

04

Métodos de extracción: cómo recuperar metales de la fracción negra?

05

Métodos de síntesis: transformar el metal recuperado en materiales funcionales

06

Aplicaciones del óxido de manganeso: ciencia útil desde el residuo

07

¿Qué estrategias estamos implementado en CAMER?

08

Nuestros proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico.

09

Descubre nuestras investigaciones y consulta nuestras publicaciones relacionadas.

10

Alianzas.

11

Conclusiones.

12

Agradecimientos.

13

Referencias.

## 01

## ESTRUCTURA INTERNA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS BATERÍAS ALCALINAS: CLAVES PARA SU APROVECHAMIENTO

Las baterías alcalinas son dispositivos electroquímicos ampliamente utilizados tanto en entornos domésticos como industriales debido a su elevada densidad energética, larga vida útil, bajo costo y seguridad operativa. Funcionan a través de reacciones redox entre el zinc (Zn) y el dióxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ), en presencia de un electrolito alcalino como el hidróxido de potasio (KOH). Su diseño está optimizado para ofrecer un suministro de energía eficiente, pero también implica el uso de metales pesados y materiales corrosivos que representan un desafío ambiental una vez que la batería ha sido desechada.

Desde el punto de vista estructural, como se puede observar en la figura 1 una batería alcalina se compone de una carcasa metálica de acero niquelado que actúa como colector de corriente y barrera protectora. En su interior, el cátodo está formado por una mezcla compacta de dióxido de manganeso y grafito, mientras que el ánodo consiste en polvo de zinc suspendido en un gel con el electrolito. Entre ambos se coloca un separador poroso (celulosa o polímero) que evita el contacto físico directo entre los electrodos, permitiendo al mismo tiempo el paso de iones. Otros componentes clave incluyen el colector de corriente, los anillos de sellado y las tapas, que aseguran la integridad del sistema durante su funcionamiento.

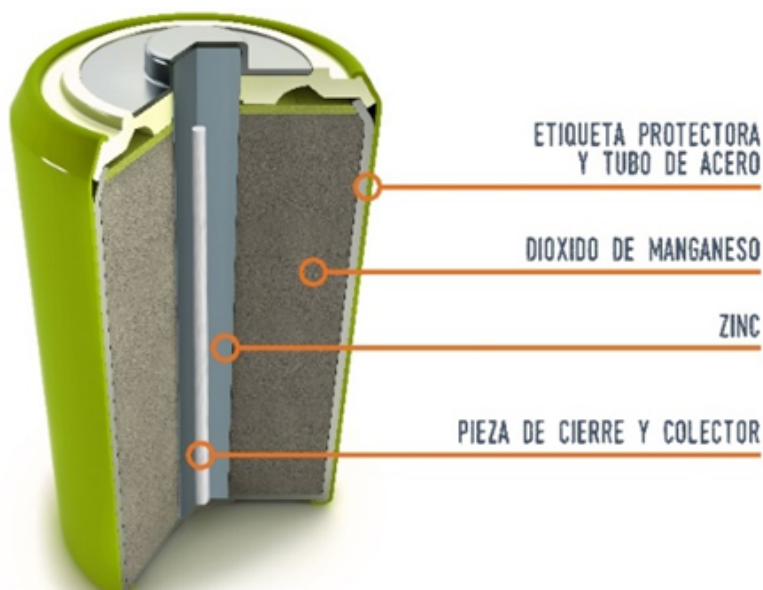


Figura 1. Composición general de las baterías alcalinas.

Químicamente, la parte más relevante de una batería alcalina para fines de valorización es la llamada fracción negra, compuesta en gran medida por dióxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ), óxidos mixtos de manganeso ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ), zinc metálico y restos de grafito. Durante la descarga, el zinc se oxida (libera electrones) y el  $\text{MnO}_2$  se reduce (acepta electrones), generando productos como  $\text{MnO}(\text{OH})$  y  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ . Esta fracción representa una fuente valiosa de manganeso, que puede ser recuperado mediante procesos químicos para la síntesis de óxidos con aplicaciones tecnológicas. Aunque existen diversos formatos (AA, AAA, C, D, 9V o botón), las diferencias entre ellos radican principalmente en el tamaño y la cantidad de material activo, ya que la composición electroquímica interna es esencialmente la misma.

# CONTAMINACIÓN SILENCIOSA: ¿QUÉ OCURRE CUANDO DESECHAMOS UNA BATERÍA?



En la era de la tecnología portátil, las baterías alcalinas se han convertido en un producto cotidiano, presente en controles remotos, juguetes, relojes, cámaras, linternas y un sinnúmero de dispositivos. Su pequeño tamaño y fácil acceso esconden una problemática ambiental de gran escala, que suele pasar desapercibida para la mayoría de los consumidores. Si bien las baterías alcalinas modernas son más seguras que las de generaciones anteriores, su acumulación masiva y la falta de sistemas adecuados de recolección y tratamiento representan una amenaza silenciosa pero persistente para los ecosistemas y la salud pública.

Una vez agotadas, las baterías alcalinas no dejan de ser activas desde el punto de vista químico. Contienen compuestos como dióxido de manganeso, óxidos de zinc y restos de hidróxido de potasio, un electrolito altamente corrosivo, así como aditivos y metales traza que pueden liberarse en el ambiente si la batería se rompe, se oxida o es sometida a presión. Cuando estos residuos llegan a rellenos sanitarios sin tratamiento, existe el riesgo de lixiviación, es decir, la disolución de metales pesados y compuestos tóxicos en el agua de infiltración, lo cual puede contaminar fuentes hídricas subterráneas o superficiales.



La degradación natural de los materiales de las pilas en el ambiente también afecta el equilibrio ecológico del suelo. Por ejemplo, el manganeso en concentraciones elevadas puede ser fitotóxico, afectando el crecimiento de las plantas, mientras que el zinc en exceso puede interferir con procesos enzimáticos esenciales en microorganismos del suelo. En ambientes acuáticos, estos elementos pueden acumularse en organismos filtradores o de bajo nivel trófico, iniciando procesos de bioacumulación y biomagnificación que terminan afectando especies superiores, incluidos los seres humanos.

Se estima que más del 80% de las baterías portátiles usadas terminan en la basura doméstica. Esto equivale a miles de toneladas anuales de residuos potencialmente peligrosos a nivel mundial. La ausencia de legislación específica en muchos países, sumada a la baja conciencia ambiental del consumidor promedio, agrava el problema. En regiones con poca capacidad de reciclaje, estos residuos suelen ser incinerados, generando emisiones de compuestos tóxicos como óxidos metálicos volátiles, partículas finas y gases irritantes. A pesar de que las baterías alcalinas modernas han eliminado el mercurio y reducido otros metales pesados, el problema persiste debido al volumen de uso. La falta de rutas de valorización eficientes también contribuye a desaprovechar recursos valiosos, como el manganeso, que podría recuperarse para aplicaciones tecnológicas y ambientales.

Además, es clave fomentar el eco-diseño de nuevas tecnologías, la adopción de pilas recargables cuando sea posible, y la participación activa de la ciudadanía en programas de recolección selectiva. La batería alcalina no es el enemigo, pero sí lo es la indiferencia frente a su impacto una vez que ha cumplido su función. Como se resume en la figura 2, la diferencia entre una batería no reciclada y una valorizada no solo implica un cambio en su destino final, sino en el grado de contaminación, el aprovechamiento de recursos y el valor social y ambiental generado.

El reciclaje de baterías alcalinas es técnicamente posible, pero económicamente limitado. Las tecnologías de reciclaje térmico, hidrometalúrgico o mecánico requieren inversiones costosas, y el bajo valor económico de los materiales recuperados (comparado con baterías recargables de litio, por ejemplo) hace que muchas empresas lo consideren poco rentable. A esto se suma la necesidad de infraestructura especializada, procesos seguros y logística de recolección diferenciada, lo cual no está disponible en muchos contextos, especialmente en países en desarrollo. Frente a esta realidad, la solución no radica únicamente en prohibir el uso de estas baterías, sino en promover una gestión integral que incluya educación ambiental, legislación adecuada, incentivos para el reciclaje y, sobre todo, proyectos de valorización como el que se propone en este boletín: recuperar el manganeso contenido en las baterías gastadas para sintetizar óxidos útiles, cerrando así el ciclo de vida del producto y avanzando hacia una economía circular.



ASPECTO CLAVE	NO RECICLADA	VALORIZADA
<b>Destino final</b>	 Basurero o vertedero	 Laboratorio
<b>Impacto ambiental</b>	 Contaminación de suelo, agua y aire	 Mínimo; residuos gestionados
<b>Uso de recursos</b>	 Pérdida total de metales valiosos	 Recuperación de manganeso y zinc
<b>Riesgo</b>	 Potencial toxicidad y bioacumulación	 Riesgo controlado
<b>Valor generado</b>	 Ninguno	 valor agregado en forma de materiales útiles

figura 2. Diferencias clave entre el desecho y la valorización de pilas alcalinas.

## 03

## ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN: ESTRATEGIAS PARA RECUPERAR EL VALOR AGREGADO EN LAS BATERÍAS ALCALINAS

La gestión adecuada de las baterías alcalinas una vez agotadas es uno de los retos ambientales más urgentes de la era electrónica. Si bien tradicionalmente se han considerado residuos peligrosos, su contenido químico, especialmente la presencia de óxidos de manganeso ( $MnO_2$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ ) y zinc metálico, representa una oportunidad de transformación. En este sentido, las alternativas de valorización buscan recuperar estos materiales para reincorporarlos a procesos productivos o científicos, minimizando el impacto ambiental y fomentando una economía circular.

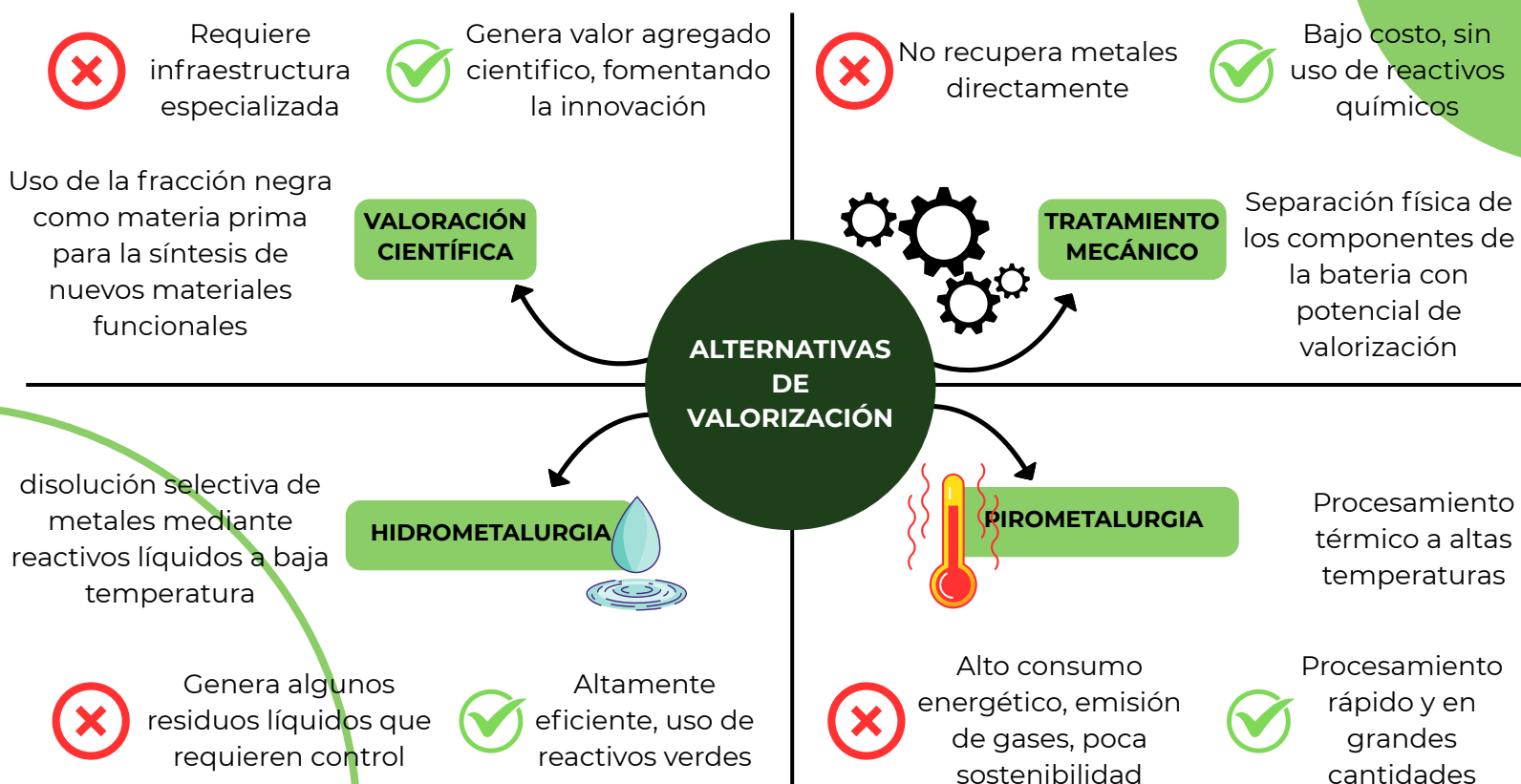


figura 3. Estrategias para el aprovechamiento de la fracción negra

A lo largo de los años, se han desarrollado diferentes estrategias con distintos grados de complejidad, impacto y eficiencia. A continuación, se presentan las cuatro rutas más relevantes: valorización científica, tratamiento mecánico, pirometalurgia e hidrometalurgia.

## Valorización científica o experimental: baterías como fuente de innovación

Una línea de trabajo emergente en el campo de la valorización es la que promueve el uso directo de los residuos, especialmente la fracción negra, como materia prima para la síntesis de nuevos compuestos funcionales. Esta estrategia, conocida como valorización científica o experimental, va más allá del reciclaje tradicional: busca transformar residuos en materiales avanzados, como óxidos de manganeso con aplicaciones catalíticas, ambientales o energéticas.

Mediante la aplicación de técnicas químicas y térmicas controladas, es posible sintetizar compuestos como  $Mn_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$  o  $MnO_2$  de alta pureza a partir del residuo sólido recuperado. Estos compuestos son valiosos por su capacidad para:

- Adsorber contaminantes en agua (metales pesados, colorantes, etc.).
- Almacenar carga eléctrica en supercapacitores o baterías recargables.
- Actuar como catalizadores en reacciones de oxidación, remediación o conversión energética.

### Desventajas

- Limitado a escala de laboratorio o piloto.
- Requiere equipos especializados y conocimiento técnico.
- El rendimiento puede depender de la calidad de la fracción negra.

### Ventajas

- Agrega valor científico y tecnológico al residuo.
- Permite el desarrollo de materiales funcionales con múltiples usos.
- Integra formación académica e innovación aplicada.



## Tratamiento mecánico: la etapa de acondicionamiento inicial

El tratamiento mecánico es una etapa preliminar esencial en la valorización de baterías. Consiste en el desensamble, trituración y clasificación física de los componentes de la batería, con el objetivo de aislar la llamada fracción negra, que contiene principalmente los óxidos de manganeso y el polvo de zinc en contacto con residuos de grafito. Esta fracción representa la materia prima fundamental para los procesos químicos posteriores. Las técnicas más empleadas en esta etapa incluyen:

- Trituración: para liberar los materiales internos.
- Separación magnética: útil para eliminar componentes ferrosos.
- Tamizado y sedimentación: para separar fracciones por tamaño o densidad.

### Desventajas

- No permite la recuperación directa de metales.
- Genera polvo fino, potencialmente contaminante si no se controla.
- Requiere equipos específicos si se quiere garantizar eficiencia y seguridad.

### Ventajas

- Es un proceso simple, sin reactivos químicos ni calor extremo.
- Bajo costo energético y operativo.
- Facilita la manipulación del residuo y su almacenamiento.



## Pirometalurgia: recuperación térmica a alto costo energético



La pirometalurgia es una técnica clásica utilizada en la industria para la recuperación de metales mediante el uso de altas temperaturas, normalmente superiores a 800 °C. En el caso de las baterías alcalinas, el tratamiento térmico permite la transformación de óxidos en formas metálicas o en sales más fácilmente separables, dependiendo de la atmósfera de trabajo (oxidante o reductora). Este método ha sido utilizado para recuperar manganeso metálico o aleaciones, aunque su aplicación en baterías alcalinas es limitada por el bajo contenido metálico y la heterogeneidad del residuo.

### Desventajas

- Elevado consumo energético, lo que lo hace poco sostenible.
- Emisión de gases tóxicos y partículas, requiere filtros y sistemas de control ambiental.
- Baja selectividad, lo que puede dificultar la separación del manganeso.

### Ventajas

- Permite procesar grandes cantidades de material en poco tiempo.
- No genera residuos líquidos.
- Puede recuperar varios metales simultáneamente en ciertos casos.

## Hidrometalurgia: extracción selectiva y sostenible con reactivos verdes

La hidrometalurgia es la estrategia más adecuada y prometedora para la valorización de baterías alcalinas en contextos académicos, sostenibles o tecnológicos. A diferencia de la pirometalurgia, este método se basa en la disolución controlada de los óxidos metálicos mediante soluciones químicas, operando a temperaturas bajas o moderadas (20–90 °C), lo que reduce significativamente el consumo energético y los riesgos ambientales. Una de las principales ventajas de esta técnica es su flexibilidad y adaptabilidad, ya que los parámetros pueden modificarse para optimizar la recuperación de un metal específico. En particular, el manganeso, al estar en forma de óxidos como  $\text{MnO}_2$ , requiere condiciones redox particulares para su disolución eficiente.

En este contexto, el uso de ácidos orgánicos biodegradables, como el ácido cítrico, ha cobrado gran relevancia por su alta capacidad complejante, su baja toxicidad y su compatibilidad con los principios de la química verde. Cuando se emplea en combinación con ácido clorhídrico (HCl) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), se mejora notablemente la solubilización de los óxidos metálicos. El peróxido actúa como reductor, permitiendo la conversión del Mn (IV) a Mn (II), una forma mucho más soluble en medios ácidos.

### Desventajas

- Genera residuos líquidos que requieren tratamiento posterior.
- Requiere conocimiento técnico para controlar parámetros como pH, concentración, potencial redox.
- Etapas múltiples: puede aumentar el tiempo de procesamiento.

### Ventajas

- Alta eficiencia de recuperación de manganeso y zinc.
- Bajo consumo energético por operar a baja temperatura.
- Posibilidad de emplear reactivos ecológicos.
- Control preciso del proceso → mejor calidad del producto.
- Adaptable a pequeñas y medianas escalas, ideal para proyectos académicos.

# MÉTODOS DE EXTRACCIÓN: CÓMO RECUPERAR METALES DE LA FRACCIÓN NEGRA



Tras la recolección y acondicionamiento de las baterías alcalinas agotadas, uno de los pasos más importantes del proceso de valorización es la extracción selectiva de metales desde la fracción negra. Esta mezcla pulverulenta, rica en óxidos de manganeso, zinc y restos de grafito, representa una fuente secundaria valiosa de materias primas. Para poder reutilizar estos metales o transformarlos en nuevos materiales, es necesario primero llevarlos a solución, es decir, disolverlos químicamente de manera controlada.

La estrategia más común para lograr esta disolución es la lixiviación, un proceso químico que consiste en tratar sólidos con soluciones líquidas que disuelven los componentes deseados. Existen diversas variantes de lixiviación que difieren en sus condiciones, reactivos y eficiencia. Una de las más utilizadas es la lixiviación ácida convencional, que emplea ácidos inorgánicos como el clorhídrico (HCl) o el sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Estos ácidos son capaces de atacar los óxidos metálicos, liberando los iones de manganeso (Mn<sup>2+</sup>) y zinc (Zn<sup>2+</sup>) al medio líquido. Aunque este método es eficiente, su uso intensivo puede generar residuos peligrosos y requiere un manejo cuidadoso de los efluentes ácidos.

Para mejorar la eficacia de disolución del manganeso, particularmente cuando se encuentra en forma de MnO<sub>2</sub>, poco soluble, se suele recurrir a una lixiviación asistida con agentes reductores, como el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Este reactivo transforma el manganeso a un estado de oxidación más bajo y soluble, permitiendo una extracción más completa en combinación con un medio ácido. Esta técnica, aunque más eficiente, también implica una mayor complejidad operativa y requiere control estricto de las condiciones de reacción.



En el marco de una química más limpia y sostenible, ha cobrado gran importancia la lixiviación con ácidos orgánicos, en particular el uso de ácido cítrico. Este ácido, de origen natural y biodegradable, actúa tanto como acidificante como agente complejante, atrapando los iones metálicos en estructuras solubles. Su combinación con peróxido de hidrógeno y pequeñas cantidades de HCl ha demostrado ser especialmente efectiva, ofreciendo un proceso más respetuoso con el ambiente y con menor generación de residuos tóxicos. Aunque este método puede requerir tiempos de contacto mayores y ajustes finos de pH, es ideal para proyectos académicos o de investigación que priorizan la sostenibilidad.

Al finalizar el proceso de extracción, se obtiene una solución líquida que contiene los metales en forma iónica, lista para ser purificada o transformada en productos de valor. De esta manera, el proceso de extracción no solo permite aislar los componentes útiles de la batería, sino que abre la puerta a su reutilización en aplicaciones científicas, tecnológicas o industriales, cerrando el ciclo del residuo con un enfoque verdaderamente circular.

# 05

## MÉTODOS DE SÍNTESIS: TRANSFORMAR EL METAL RECUPERADO EN MATERIALES FUNCIONALES

Tras extraer con éxito los iones metálicos desde la fracción negra de las baterías alcalinas, el siguiente paso clave en el proceso de valorización es la síntesis de compuestos útiles a partir de esas soluciones. Esta etapa, lejos de ser un simple procedimiento de laboratorio, representa la oportunidad de crear nuevos materiales funcionales, convertir un residuo en un insumo de alto valor, y cerrar el ciclo de la economía circular desde la ciencia.

Uno de los principales productos obtenidos a partir del manganeso recuperado es el óxido de manganeso en sus distintas formas:  $MnO_2$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ , entre otros. Estos compuestos son ampliamente utilizados en tecnologías ambientales y energéticas por sus propiedades redox, alta estabilidad térmica, conductividad selectiva y actividad catalítica. Para obtenerlos, se emplean diversos métodos de síntesis, que varían en complejidad, costo, pureza y escalabilidad.

Uno de los más accesibles es la precipitación química controlada, que consiste en ajustar cuidadosamente el pH y la temperatura de la solución metálica, añadiendo compuestos precipitantes como hidróxidos, carbonatos o permanganatos. Este método permite obtener óxidos con estructuras definidas en condiciones relativamente suaves, sin necesidad de equipos costosos. Es ideal para contextos educativos o de investigación básica, donde se valoran tanto la simplicidad del procedimiento como el aprendizaje experimental.

Otro enfoque común es la síntesis térmica, también conocida como oxidación térmica. En este caso, la solución que contiene manganeso se seca primero hasta formar una sal sólida, la cual se somete a un tratamiento térmico a temperaturas entre 300 °C y 600 °C. Bajo estas condiciones, los compuestos se descomponen y reorganizan, formando óxidos estables con estructuras cristalinas bien definidas. Este método es particularmente útil para obtener  $Mn_2O_3$  y  $Mn_3O_4$ , utilizados en aplicaciones catalíticas, filtros de aire o materiales activos para baterías.

Cuando se busca una mayor precisión en el diseño del material, se recurre a métodos más avanzados como la síntesis hidrotermal o el proceso sol-gel. En la hidrotermal, la solución de manganeso se somete a condiciones de alta presión y temperatura en un reactor cerrado, lo que permite el crecimiento controlado de cristales nanométricos. En el proceso sol-gel, se parte de una solución precursora que se transforma en un gel y luego en un sólido tras secado y calcinación. Estos métodos, aunque más exigentes en infraestructura, permiten obtener materiales porosos, altamente homogéneos y con propiedades específicas según su aplicación.

En conjunto, los métodos de síntesis permiten cerrar el ciclo de valorización, convirtiendo un residuo contaminante en un producto funcional, útil y científicamente valioso. Este paso es también una oportunidad para integrar conocimiento, creatividad y conciencia ambiental, demostrando que, con técnicas adecuadas y compromiso, es posible transformar residuos del presente en materiales del futuro.

## APLICACIONES DEL ÓXIDO DE MANGANESO: CIENCIA ÚTIL DESDE EL RESIDUO

06

El verdadero impacto de recuperar óxidos de manganeso desde baterías alcalinas no se mide solo en términos de reciclaje, sino en su capacidad de generar nuevos materiales con funciones concretas y relevantes para la sociedad. Lo que alguna vez fue un residuo contaminante puede, mediante procesos químicos controlados, transformarse en una herramienta tecnológica clave para enfrentar desafíos ambientales, energéticos y científicos. Los óxidos de manganeso sintetizados, especialmente  $MnO_2$ ,  $Mn_3O_4$  y  $Mn_2O_3$ , son materiales versátiles con amplio rango de aplicaciones funcionales, tanto a escala industrial como investigativa.

Una de las áreas más destacadas de uso es el almacenamiento de energía, donde el  $\text{MnO}_2$  se emplea como material activo en electrodos de supercapacitores y baterías recargables (como las de ion-litio, ion-sodio y zinc-aire). Gracias a su capacidad para participar en reacciones redox reversibles, estructura porosa y buena estabilidad electroquímica, permite el diseño de dispositivos más sostenibles, económicos y con mayor capacidad de carga. Esta aplicación es especialmente relevante en el desarrollo de tecnologías portátiles, vehículos eléctricos y sistemas de respaldo energético.



En el campo ambiental, los óxidos de manganeso actúan como materiales adsorbentes y catalíticos, capaces de eliminar contaminantes tanto inorgánicos como orgánicos. Son utilizados para el tratamiento de aguas residuales, ya que capturan metales pesados (como plomo, cadmio y cromo) y ayudan a degradar colorantes y compuestos orgánicos persistentes. También se aplican en la purificación de aire, como filtros de gases tóxicos o precursores para catalizadores de oxidación avanzada, lo que los convierte en aliados importantes en la mitigación de la contaminación ambiental.

Desde el punto de vista académico, estos compuestos son considerados materiales modelo, lo que significa que se utilizan ampliamente para enseñar y estudiar fenómenos como la cristalografía, la adsorción, el comportamiento redox y las propiedades nanométricas. Por su facilidad de obtención, bajo costo y relevancia tecnológica, son ideales para proyectos de investigación formativa, laboratorios universitarios y estudios de innovación científica. En este contexto, la valorización de baterías se convierte también en una herramienta pedagógica, que permite abordar la química aplicada con un enfoque sostenible.

Además, el desarrollo reciente de sensores electroquímicos, materiales antibacterianos y recubrimientos funcionales con base en óxidos de manganeso abre nuevas fronteras para su aprovechamiento en sectores como la salud, la agricultura y la seguridad ambiental. Su capacidad para modificar superficies, responder a estímulos y adaptarse a distintas matrices hace que su potencial de aplicación aún esté lejos de agotarse.



Así, cerrar el ciclo de una batería alcalina no implica solo neutralizar su impacto, sino darle una nueva vida como material funcional de alto valor añadido. El óxido de manganeso recuperado demuestra que incluso un residuo puede convertirse en una pieza clave de la innovación sostenible.

# 70

## ¿QUÉ ESTRATEGIAS ESTAMOS IMPLEMENTADO EN CAMER?