

# Un problema ambiental serio: el reciclado de pilas y baterías



Franco Dubois  
Lorena Falco



Cynthia A. Fuentes  
María V. Gallegos



Miguel A. Peluso  
Jorge E. Sambeth



Centro de Investigación  
y Desarrollo en Ciencias  
Aplicadas Dr. Jorge J. Ronco  
CINDECA / CONICET-UNLP  
Comisión de Investigaciones  
Científicas (CIC) | Argentina  
[apelu@quimica.unlp.edu.ar](mailto:apelu@quimica.unlp.edu.ar)

## Resumen

Las pilas y las baterías cumplen un papel esencial en nuestra sociedad, ya que permiten que muchos productos utilizados en la actualidad, tales como juguetes, controles remotos, alarmas, relojes, *notebooks*, *smartphones*, audífonos, electrodomésticos, entre muchos otros bienes y servicios, puedan funcionar. Esta es la razón por la cual constituyen cada día más, una fuente de energía indispensable para adaptarse al avance tecnológico.

La utilización masiva de tecnologías portátiles conlleva el uso también masivo de pilas y baterías, y, como consecuencia, la generación de residuos domésticos peligrosos, que en la mayoría de los países del mundo no son gestionados. Dado que la disposición final es problemática debido al contenido de metales pesados como Ni, Cd, Mn y trazas de Hg, la recuperación de estos dispositivos es una actividad económica y ambientalmente favorable.

La razón de la problemática se basa en que no todas las baterías se recogen apropiadamente, ni son recicladas al final de su vida útil, lo que, como se dijo, aumenta el riesgo de liberación de sustancias peligrosas al entorno y, además, constituye un derroche de recursos. Muchos de los componentes podrían ser reciclados, lo que evita la liberación de sustancias y, además, proporciona materiales valiosos a importantes productos y procesos productivos.

## Algunos conceptos básicos

La pila o celda es un dispositivo que convierte la energía química contenida en sus materiales en energía eléctrica por medio de una reacción química de oxidación y reducción. En las *notebooks*, por ejemplo, hay varias pilas o celdas formando una batería, que en este caso es recargable, lo que significa que al conectarse a la corriente eléctrica se recarga por la reacción química inversa.

Las pilas constan de tres componentes principales, que participan en la reacción química:

1. El ánodo o electrodo negativo, que se oxida durante la reacción electroquímica.
2. El cátodo o electrodo positivo, que se reduce durante la reacción electroquímica.
3. El electrolito, el conductor iónico, que proporciona el medio para la transferencia de carga en forma de iones dentro de la celda, entre el ánodo y el cátodo. El electrolito es típicamente un líquido, tal como agua u otros disolventes, con sales disueltas, ácidos o álcalis.

Físicamente, los electrodos de ánodo y cátodo están electrónicamente aislados en la celda para impedir un cortocircuito interno, pero están rodeados por el electrolito.

Las combinaciones más ventajosas de materiales de ánodo y cátodo son aquellas que resulten más livianas y generen un voltaje alto. Sin embargo, estas combinaciones pueden no ser siempre prácticas debido a la reactividad con otros componentes de la celda, el alto costo y otras deficiencias.

En la práctica, el ánodo se selecciona teniendo en cuenta las siguientes propiedades: eficiencia como agente reductor, buena conductividad, estabilidad, facilidad de fabricación y bajo costo. El zinc (Zn) ha sido un ánodo predominante porque tiene estas propiedades favorables. El litio (Li), el metal más ligero, se ha convertido en un ánodo muy atractivo ya que se han desarrollado electrolitos y diseños de celdas adecuados y compatibles para controlar su actividad.

El cátodo debe ser un agente oxidante eficaz, ser estable al entrar en contacto con el electrolito y tener un voltaje de trabajo útil. La mayoría de los materiales catódicos comunes son óxidos metálicos como manganeso (Mn) y cobalto (Co).

El electrolito debe tener una buena conductividad iónica pero no ser eléctricamente conductor, ya que causaría un cortocircuito interno. Otras características importantes son la no reactividad con los materiales de los electrodos, seguridad en el manejo y bajo costo. La mayoría de los electrolitos son soluciones acuosas, pero existen importantes excepciones como, por ejemplo, en las baterías de ánodo de litio.

Las pilas se pueden construir en muchas formas y configuraciones —cilíndrica, botón, planas y prismática— y los componentes están diseñados para adaptarse a la forma particular. Están selladas, según el tipo, de maneras variadas para prevenir fugas y/o secarse. Algunas están provistas de dispositivos de ventilación u otros medios que permiten a los gases acumulados escapar. Finalmente, se colocan en recipientes o carcasas adecuadas para la conexión de terminales y etiquetado, lo que completa la fabricación de la pila y la batería (Reddy, 2011).

Las pilas pueden clasificarse en dos grandes grupos:

-*Primarias*: basadas en una reacción química irreversible y, por lo tanto, no recargables (poseen un solo ciclo de vida), como las de la linterna.

-*Secundarias*: basadas en una reacción química reversible y, por lo tanto, recargables. Se pueden regenerar sus elementos activos pasando una corriente eléctrica en sentido contrario al de descarga. Poseen ciclos de vida múltiples como la del celular o la de la *notebook*.

Dentro de estos dos grupos, existe una gran diversidad de pilas, que varían en su composición, geometría y tamaño. Cada una con materiales particulares que determinan su capacidad, su voltaje de salida y su vida útil. Sin embargo, no todos los tipos de baterías tienen un uso extendido. En las Tablas 1 y 2 se describen los tipos de pilas más comunes del mercado, sus componentes y características; tanto de pilas primarias como recargables, respectivamente.

Pilas	Composición	Características
Zinc/Carbono (Zn/C) o tipo Le Clanché o pilas secas	Ánodo: Zn Cátodo: MnO <sub>2</sub> Electrolito: NH <sub>4</sub> Cl, ZnCl <sub>2</sub>	Para todo tipo de equipamiento eléctrico y electrónico sencillo y de bajo consumo. Denominadas "pilas comunes".
(Zn/MnO <sub>2</sub> ) o Alcalinas	Ánodo: Zn Cátodo: MnO <sub>2</sub> Electrolito: KOH	Para equipamiento eléctrico y electrónico sencillo y de bajo consumo, con vida útil hasta 10 veces mayor a las "comunes".
Óxido de Plata	Ánodo: Zn Cátodo: Ag <sub>2</sub> O Electrolito: KOH	Uso en calculadoras, relojes y cámaras fotográficas. Usualmente de tipo botón pequeñas, contienen alrededor de 1 % de mercurio.
Litio	Ánodo: Li Cátodo: MnO <sub>2</sub> , Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Electrolito: disolvente orgánico	Uso: desde relojes hasta aplicaciones militares e industrias. Producen tres veces más energía que las alcalinas, considerando tamaños equivalentes, y poseen mayor voltaje inicial (3 voltios).

Tabla 1. Tipos de pilas primarias, sus características y componentes.

### Legislación sobre el tema

A nivel nacional se encuentra la Ley 26.184, Ley de Fuentes de Energía Eléctrica Portátil, la cual prohíbe en todo el país las pilas y baterías no recargables con un contenido de mercurio, cadmio y plomo mayor a: 0,0005 %; 0,015 % y 0,200 % en peso, respectivamente. La ley prohíbe la fabricación, armado e importación de estos productos.<sup>1</sup>

Las pilas y las baterías usadas y agotadas, provenientes mayormente del uso de distintos artefactos —juguetes, electrodomésticos pequeños, equipos de música, relojes, computadoras, etcétera— forman parte de la generación habitual de residuos domésticos o domiciliarios.

1. Ver <https://www.argentina.gov.ar/normativa/nacional/ley-26184-123408>

Pilas	Composición	Características
Níquel/Cadmio (Ni/Cd)	<p>Ánodo: Cd</p> <p>Cátodo: NiO(OH)</p> <p>Electrolito: KOH</p>	Para todo tipo de equipamiento eléctrico y electrónico sencillo y de bajo consumo, teléfonos celulares, computadoras portátiles. Pueden ser recargadas hasta 1000 veces y alcanzan a durar decenas de años.
Níquel/Hidruro metálico (Ni/HM)	<p>Ánodo: MH</p> <p>Cátodo: NiO(OH)</p> <p>Electrolito: KOH</p>	Mismo uso que Ni/Cd y sistema similar donde el Cd ha sido reemplazado por una aleación metálica capaz de almacenar hidrógeno. La densidad de energía producida es el doble de la producida por Ni/Cd, a voltajes operativos similares.
Ion-Litio	<p>Ánodo: Carbón</p> <p>Cátodo: Óxidos metálicos con Litio (cátodo).</p> <p>Electrolito: Sales de Litio y Solventes Orgánicos</p>	Utilizada para telefonía celular, computadoras, cámaras fotográficas y de video.
Plomo	<p>Ánodo: Pb</p> <p>Cátodo: PbO<sub>2</sub></p> <p>Electrolito: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></p>	Tienen uso automotriz, industrial y doméstico.

Tabla 2. Tipos de pilas secundarias, sus características y componentes.

Estos residuos, cuya generación no se limita exclusivamente al ámbito industrial o comercial, sino que involucra principalmente el uso hogareño y que, además, poseen características peligrosas, están incluidos dentro de los que genéricamente se denominan *residuos peligrosos universales*.<sup>2</sup>

La competencia sobre la gestión de los residuos generados en los hogares corresponde a la jurisdicción local, esto es, a la autoridad municipal, a quien se debe consultar para mayor información sobre la existencia de programas para la gestión de pilas y baterías. Es importante observar que los llamados residuos peligrosos universales se encuentran en una zona

2. Ver <http://www.protectora.org.ar>

gris entre el concepto de residuo peligroso y residuo domiciliario, aún no resuelta por ninguna normativa en nuestro país.

El único antecedente normativo respecto al tema de pilas y baterías, se encuentra en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

En el mes de Julio de 2018 se aprobó la Ley 5991, de Gestión ambiental de pilas en desuso, que considera a las pilas en desuso como Residuos Sólidos Urbanos (RSU) Sujetos a Manejo Especial, entendiéndose por estos residuos a aquellos que por su tamaño, volumen, cantidad y/o sus potenciales características de peligrosidad, nocividad o toxicidad, deben sujetarse a un Plan de Gestión Ambiental diferenciado del resto de los RSU. Asimismo, establece que toda persona física o jurídica que produzca, importe, distribuya y/o comercialice pilas será responsable de su gestión en la etapa de pos consumo del ciclo de vida del producto.

Para las baterías recargables de celulares y computadoras rige la Resolución 262/APRA/2008 que aprueba la Guía de contenidos mínimos para los planes de gestión integral de pilas y baterías recargables agotadas, que deben ser presentados por los productores, importadores, distribuidores, intermediarios y cualquier otra persona responsable de la puesta en el mercado de pilas y baterías recargables.<sup>3</sup>

### **Tecnologías para el tratamiento y/o disposición final de pilas y baterías**

Varias son las alternativas tecnológicas para el adecuado tratamiento o disposición final de las pilas y baterías usadas.

- Disposición final, se desecha la pila como tal, en relleno de seguridad: es la más cercana a las posibilidades actuales, pero se halla limitada por la escasa cantidad disponible de tales rellenos.
- Tecnologías para la inmovilización de los constituyentes peligrosos: vitrificación, cementación y ceramización, son algunas de las tecnologías que se han propuesto, las cuales presentan diversas variantes técnicas.

---

3. Ver <https://www.buenosaires.gob.ar/agenciaambiental/residuos/baterias>

Actualmente se inmovilizan dentro de tubos de PVC y estos, una vez sellados, son depositados como relleno en columnas de hormigón. La utilización o destino de los materiales resultantes, según sus propiedades finales, son los problemas que se plantean.

- Exportación: para su tratamiento y/o reciclado en países que dispongan de tecnologías no existentes en la Argentina. Es de aplicación el Convenio de Basilea.
- Reciclado de componentes: existen a nivel mundial tecnologías para todo tipo de pilas y baterías, pero en el país solo se encuentra disponible a nivel industrial para las de plomo-ácido y las de níquel-cadmio.

### Reciclado de pilas

Existen básicamente dos procesos para la recuperación de metales a partir de pilas y baterías agotadas: hidrometalúrgico y pirometalúrgico (o combinaciones y variaciones de ambos). Los procesos utilizados hoy en día requieren una etapa previa de separación, dado que no existe un método universal para todo tipo de pilas (son específicos para pilas Ni-Cd, Ni-MH, de mercurio o de litio).

Los métodos hidrometalúrgicos consisten, en general, en la disolución parcial o total de metales en agua con ácidos o bases fuertes y extracción selectiva de metales para su uso como materia prima en la industria metalúrgica. Los procesos cuentan con sistemas de colecta, tratamiento o recuperación del mercurio que se volatiliza durante las distintas etapas. Las etapas son: *molienda* (trituration de la masa de pilas previa selección y limpieza), *separación* (tamizado que separa el polvo fino, separación magnética de materiales ferromagnéticos como la carcasa de hierro y de no ferromagnéticos como las piezas de zinc, y separación neumática del papel y plástico), *lixiviación* (separación de los metales en la fracción de polvos finos, mediante tratamiento ácido y posterior neutralización para separar sales metálicas), *cementación* (formación de amalgama de Cd y Hg con Zn).

Los procesos pirometalúrgicos involucran la transformación y separación de componentes a partir del tratamiento térmico del residuo en medio reductor (combustión con coque) y separación de los metales volátiles. Los procesos pirometalúrgicos operados a temperaturas altas se

asocian generalmente con un alto control de emisiones a la atmósfera, ya que se pueden generar en el proceso dioxinas, compuestos de cloruro, mercurio, zinc y cadmio (Bernardes et al., 2004).

Muchos de los procesos de reciclado de pilas son utilizados en el mundo: BATENUS, proceso hidrometalúrgico para mezcla de todo tipo de baterías; PLACID, para la recuperación pirometalúrgica de mercurio de las baterías que lo contienen; RECYTEC, para la recuperación de zinc y manganeso de pilas alcalinas y de zinc-carbón; REVABAT/REVATECH, tratamiento hidrometalúrgico para pilas alcalinas y de zinc-carbón que luego de ser desmanteladas son tratadas con ácido sulfúrico y finalmente se recuperan zinc y manganeso como óxidos o sales; y RECUPYL, para la recuperación hidrometalúrgica de zinc y manganeso provenientes de pilas agotadas, como sulfatos, utilizando ácido sulfúrico y agua oxigenada; entre otros (Sayilgan et al., 2009).

### **Motivos para reciclar pilas y baterías**

El consumo de pilas y baterías tiende a aumentar año tras año, especialmente por el incremento de la cantidad de aparatos y artefactos que las utilizan, lo que deriva en un elevado número de residuos (Armand et al., 2020).

Las pilas pueden sufrir la corrosión de sus carcasas, las cuales pueden ser afectadas internamente por sus componentes y externamente por la acción climática y/o por el proceso de descomposición de los RSU, en caso que terminen en un vertedero. Cuando se produce un derrame del electrolito contenido en las pilas, este puede acarrear con él los metales pesados que conforman la pila. Estos metales pueden lixiviar por los suelos y fluir por cursos de agua superficial y acuíferos, contaminando el ambiente en general. Estas situaciones tienen mayor probabilidad de ocurrir, y con mayor intensidad, cuanto menos se gestione el destino y tratamiento de estos residuos.

Los metales lixiviados de las pilas y las baterías pueden exhibir diversos grados de toxicidad para los humanos, atacar diferentes órganos y tener diferentes mecanismos de acción. El litio se dirige principalmente al sistema nervioso central y el



cobalto es potencialmente cancerígeno. Por otro lado, cobre, hierro y níquel han sido implicados en la generación de especies reactivas de oxígeno, que se sabe que causan daño al ADN (Winslow et al., 2018). La exposición oral al manganeso puede provocar efectos neurológicos adversos, mientras que altas dosis de zinc puede provocar síntomas y signos de irritación gastrointestinal (calambres abdominales, vómitos y diarrea) en humanos.<sup>4</sup>

Por otra parte, la obtención de las materias primas para la fabricación de las pilas y las baterías implica el consumo de recursos naturales no renovables y de alto costo económico. Por esta razón, la recuperación de los metales resulta una actividad no solo beneficiosa para el medio ambiente, sino también un potencial negocio. El valor expresado en USD por tonelada de los metales presentes en pilas y baterías según datos de febrero de 2021 del sitio London Metal Exchange (LME) se presenta en la Tabla 3.

Asimismo, reciclar las baterías produciría ahorros de energía y una reducción de la huella de CO<sub>2</sub> (Hamade et al., 2020).

Tabla 3. Valores expresados en USD por tonelada de metales contenidos en las LIBs. Datos de febrero de 2021 (London Metal Exchange, s.f.).

Metal	Precio (USD x tonelada)
Zn	2793
Co	47000
Ni	18363
Al	2076
Cu	8270
Li (LiOH)	9000

4. Ver <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/index.asp>

## Planta Piloto de Tratamiento de Pilas alcalinas y de Zn/C

En la localidad de Gonnet, provincia de Buenos Aires, la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) puso en marcha en 2012 la primera Planta Piloto de Tratamiento de Pilas. Funciona en el Laboratorio UPL (Unidad PlaPiMu-Laseisic) dependiente de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP y de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la provincia de Buenos Aires.

La planta ha sido concebida, diseñada e instalada respetando los principios de ser eco compatible y respetar el medioambiente. La idea fue desarrollar un proceso que permitiera recuperar los metales presentes en las pilas agotadas para lograr, de ese modo, un doble propósito: evitar la contaminación de suelos y aguas subterráneas; y recuperar los metales para su reutilización, disminuyendo la explotación minera y la contaminación en la producción de los mismos.

Se optó por un método hidrometalúrgico que utiliza ácido sulfúrico para la disolución de los componentes de las pilas y una posterior separación para recuperarlos. Para evitar contaminaciones se eligió un método biotecnológico para la obtención del ácido sulfúrico por oxidación de azufre elemental con bacterias. En un biorreactor crecen las bacterias mineras que producen el medio ácido para extraer los metales de las pilas, proceso que se realiza en un segundo reactor tipo tanque agitado, llamado *reactor de lixiviación*. Luego el lixiviado obtenido se filtra y se pasa a un tercer reactor, que es donde se realiza la separación y recuperación de los metales presentes mediante distintos métodos.

Una particularidad de estas bacterias es que no solo pueden vivir en condiciones de acidez intolerables para otras especies, sino que como producto de su metabolismo energético producen ácido sulfúrico, compuestos reductores y compuestos oxidantes. Además, pueden crecer y vivir normalmente en ambientes con altas concentraciones de metales pesados.

La planta tiene una capacidad de tratamiento de 80 kg de pilas por mes, equivalente al consumo de unos 8000 habitantes. Es una planta experimental, no recibe pilas en desuso y no está abierta al público.

### *Descripción de la Planta Piloto de Tratamiento de Pilas*

El primer paso del proceso de reciclado en la planta consiste en la clasificación de las pilas según el tamaño y la clase, dado que pueden ser alcalinas o de carbón zinc. Las pilas son abiertas mediante un corte artesanal, diseñado en la UPL.

Luego de desmanteladas se separan sus componentes: películas plásticas, desechos ferrosos, trozos de papel y un sólido conteniendo el material de los electrodos de las pilas. La carcasa de la pila es chatarra y representa alrededor del 50 % de su peso. El sólido interior posee un contenido de Zn y Mn de 47 % y 25 % en masa, respectivamente.

#### *¿Cómo es el proceso?*

El ácido sulfúrico es producido microbiológicamente, donde una bacteria en contacto con azufre genera el ácido. Este proceso tiene una serie de ventajas sobre el empleo de ácido comercial: es ambientalmente amigable, sin ningún impacto adverso (como efluentes gaseosos o líquidos) y trabaja a temperatura ambiente y presión normal. Utiliza cantidades mínimas de agua, produce ácido a la concentración adecuada para su uso evitándose el transporte de sustancias peligrosas, ahorra costos de transporte y es totalmente competitiva en costos.

La segunda etapa es la disolución de los sólidos, donde el ácido proveniente del biorreactor se pone en contacto con el material de electrodos de las pilas. Una vez disueltos los electrodos en el ácido, se filtra (quedan residuos insolubles) y el líquido filtrado son sulfatos de Zn y Mn. Finalmente, por medio de distintas reacciones químicas, los sulfatos son transformados en óxidos de zinc y manganeso.

De esta manera, el tratamiento de las pilas alcalinas por hidrometalurgia permite recuperar la chatarra, óxidos de zinc y de manganeso. La chatarra es el primer producto reciclable, pudiendo venderse a exportadores o bien a cooperativas que lo reciclan. El óxido de zinc es un producto aplicable en la industria farmacéutica, cosmética, metalúrgica e incluso en aplicaciones dentales. Por último, el óxido de

manganeso es utilizado para eliminar componentes orgánicos (algunos de ellos cancerígenos) en aguas o en aire, los cuales afectan la capa de ozono y generan gases de efecto invernadero.

### **Aplicaciones de los metales recuperados de pilas alcalinas y de Zn/C**

Como se mencionó, las pilas y las baterías contienen metales que afectan la salud ambiental, por lo que su reciclado debe comprender también cerrar su ciclo de vida. Por esta razón, se han desarrollado diferentes líneas de acción para darle una aplicación tecnológica a los metales reciclados como óxidos.

En nuestro grupo de investigación se ha utilizado el  $MnO_2$  recuperado de las pilas como catalizador para la oxidación a  $CO_2$  de compuestos orgánicos provenientes de emisiones gaseosas de industrias, tales como etanol, n-heptano y tolueno. La actividad catalítica de estos óxidos recuperados es similar o hasta superior a óxidos de manganeso preparados a partir de sales comerciales (Gallegos et al., 2013; Gallegos et al., 2017).

El poli (tereftalato de etileno) (PET) es un importante polímero sintético que se utiliza ampliamente en botellas de plástico (Payán et al., 2017). Entre los métodos de reciclado de PET encontramos la glicólisis. Este proceso, en el que se utilizan catalizadores óxidos, implica la ruptura del polímero para producir el monómero de PET, el bis (2-hidroxietil) tereftalato (BHET), el cual se puede utilizar en la producción de PET virgen (Wang et al., 2009). Los óxidos de zinc recuperados de las pilas han sido analizados como catalizadores de esta reacción y resultaron activos para la despolimerización de PET con rendimientos de producción similares a los industriales (Fuentes et al., 2019).

### **Reciclado de ión-Li (LIBs)**

El reciclado de estas baterías ha sido estudiado a escala laboratorio. Se utilizaron LIBs agotadas procedentes de computadoras portátiles. Estas baterías están compuestas por 6, 8 o 9 celdas cilíndricas individuales de 18 mm de diámetro y 65,0 mm de longitud, las cuales se denominan, por

su longitud y diámetro, 18650 y están recubiertas por plástico. La carcasa de plástico que contiene las celdas se retira manualmente y una vez separada se procede al reciclado de cada celda. En primer término, las celdas deben ser descargadas por completo para evitar cortocircuitos; luego, se procede a la apertura. Se recupera Cu y Al en forma de láminas metálicas, láminas plásticas, el ánodo de carbono grafito y el material catódico compuesto por Li, Mn, Ni y Co.

El material catódico es sometido a un proceso hidrometalúrgico utilizando como agente lixiviante el ácido sulfúrico biogenerado, tal como se mencionó más arriba, producido en la planta piloto de la UPL. De este proceso se obtiene un óxido mixto de Ni, Mn y Co, por un lado, y carbonato de litio, por otro. Estos materiales están siendo evaluados como materias primas para la confección de nuevas baterías de ion-Li y como catalizadores para la reacción de reformado en seco de metano para la obtención de una mezcla H<sub>2</sub>/CO. Por su parte, el ánodo de carbono grafito ha sido evaluado como adsorbente de medicamentos en aguas residuales. ●

## Referencias

- Armand, M., Axmann, P., Bresser, D., Copley, M., Edström, K., Ekberg, C. y Zhang, H. (2020). Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments. *Journal of Power Sources*, 479. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228708>
- Bernardes, A. M., Espinosa, D. C. y Tenório, J. A. (2004). Recycling of batteries: a review of current processes and technologies. *Journal of Power Sources*, 130(1–2), 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.12.026>
- Fuentes, C. A., Gallegos, M. V., García, J. R., Sambeth, J., y Peluso, A. (2019). Catalytic Glycolysis of Poly(ethylene terephthalate) Using Zinc and Cobalt Oxides Recycled from Spent Batteries. *Waste and Biomass Valorization*, (11), 4991–5001. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00807-6>
- Gallegos, M. V., Falco, L. R., Peluso, M. A., Sambeth, J. E., y Thomas, H. J. (2013). Recovery of manganese oxides from spent alkaline and zinc-carbon batteries. An application as catalysts for VOCs elimination. *Waste Management*, 33(6), 1483–1490. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.006>
- Gallegos, M. V., Peluso, M. A., Finocchio, E., Thomas, H. J., Busca, G., y Sambeth, J. E. (2017). Removal of VOCs by catalytic process. A study of MnZnO composites synthesized from waste alkaline and Zn/C batteries. *Chemical Engineering Journal*, 313, 1099–1111. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.001>
- Hamade, R., Ayache, R. A., Ghanem, M. B., Masri, S. E., y Ammouri, A. (2020). Life Cycle Analysis of AA Alkaline Batteries. *Procedia Manufacturing*, 43, 415–422. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.193>
- London Metal Exchange. (s.f.). Recuperado de [www.lme.com](http://www.lme.com)
- Payán, L., Poyatos, M. T., Muñoz, L., La Rubia, M. D., Pacheco, R., y Ramos, N. (2017). Study of the influence of storage conditions on the quality and migration levels of antimony in polyethylene terephthalate-bottled water. *Food Science and Technology International*, 23(4), 318–327. <https://doi.org/10.1177/1082013217690300>
- Reddy, T. (Ed.). (2011). *Linden's Handbook of Batteries* (Fourth). Nueva York, Estados Unidos: Mc Graw Hill.
- Sayilgan, E., Kukrer, T., Civelekoglu, G., Ferella, F., Akcil, a., Veglio, F., y Kitis, M. (2009). A review of technologies for the recovery of metals from spent alkaline and zinc-carbon batteries. *Hydrometallurgy*, 97(3–4), 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.02.008>
- Wang, H., Liu, Y., Li, Z., Zhang, X., Zhang, S., y Zhang, Y. (2009). Glycolysis of poly(ethylene terephthalate) catalyzed by ionic liquids. *European Polymer Journal*, 45(5), 1535–1544. <https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2009.01.025>

- Winslow, K. M., Laux, S. J., y Townsend, T. G. (2018). A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 129(November 2017), 263–277. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.001>