

Ficha
informativa



**WATER
PROOF**

Solventes eutécticos profundos ácidos para la recuperación de metales críticos a partir de residuos y aguas residuales



Una estrella naciente: Solventes eutécticos profundos (ADES)

Un método emergente y prometedor para la recuperación de metales críticos a partir de residuos y aguas residuales son los disolventes eutécticos profundos ácidos (ADES, por sus siglas en inglés). Dentro del proyecto financiado por la UE WaterProof, estos ADES se sintetizan a partir del ácido fórmico como sustancia base. Este ácido fórmico es una materia prima renovable, ya que se obtiene mediante conversión electroquímica del CO₂ emitido por plantas de tratamiento de residuos y aguas residuales.

Los ADES son un tipo de disolvente iónico que consta de un donador de enlaces de hidrógeno (el ácido fórmico en el caso de WaterProof) y un aceptor de enlaces de hidrógeno¹. De esta manera, los ADES disuelven los metales presentes en los lodos de aguas residuales y en las cenizas de incineración de residuos, al unirse a estos elementos químicos mediante enlaces de hidrógeno y la formación de complejos metal-ADES, que pueden separarse del material residual.

Entre las características más importantes de los ADES se destacan su baja toxicidad, biodegradabilidad, propiedades personalizables y su alta selectividad metálica^{2,3}, lo que permite la recuperación precisa de metales valiosos a partir de corrientes de desecho complejas, bajo condiciones suaves y de alta eficiencia energética.

El desarrollo de los ADES tiene un gran potencial como método sostenible e innovador, y podría ofrecer una solución para la recuperación de metales en bajas concentraciones, gracias a su alta eficiencia y selectividad frente a distintos tipos de metales.

El desafío de la recuperación de metales críticos

Los metales críticos son elementos químicos de alta importancia económica debido a su escasez, posible agotamiento o interrupción en el suministro, su uso en aplicaciones industriales esenciales o su valor cultural (por ejemplo, en joyería o inversión).

En lo que respecta a la economía de la Unión Europea, los yacimientos de extracción suelen encontrarse en países terceros, lo que genera una relación de dependencia. Una posible solución es la recuperación de metales críticos a partir de materias primas secundarias, como los lodos de aguas residuales o las cenizas de incineración de residuos. De esta manera, la recuperación de metales se alinea con los objetivos de la economía circular y permite la valorización de residuos, aportando beneficios tanto ambientales como económicos.

La reintroducción de metales recuperados en las cadenas de suministro de manufactura mejora la circularidad y reduce el desperdicio de materias primas escasas mediante su reciclaje y reutilización. Sin embargo, estos recursos valiosos se pierden con frecuencia debido a métodos de recuperación insuficientes, que suelen ser costosos y con alto consumo energético, además de perjudiciales o tóxicos para el medio ambiente (ver Recuadro informativo 1).

Asimismo, las bajas concentraciones de metales presentes en los lodos de depuradora y en las cenizas de incineración de residuos hacen que su recuperación sea compleja.



Info-cuadro 1

¿Por qué ADES? Debilidades de otros métodos de recuperación

Métodos de recuperación establecidos

Existen diversos métodos de recuperación actualmente en uso. Sin embargo, aunque permiten recuperar metales, presentan desventajas ambientales y técnicas:

- **Procesos físicos y mecánicos:** Incluyen filtración, sedimentación y centrifugación para separar las partículas metálicas de las corrientes de desecho. Son eficaces para partículas gruesas, pero ineficientes para metales disueltos.
- **Procesos pirometalúrgicos:** La fusión a altas temperaturas permite separar los metales, pero consume grandes cantidades de energía y emite contaminantes. Solo son adecuados para corrientes con alta concentración de metales, como los residuos electrónicos.

- **Procesos hidrometalúrgicos:** Emplean ácidos inorgánicos o compuestos tóxicos (como la lixiviación con cianuro). Estos procesos carecen de selectividad y requieren etapas posteriores de tratamiento, lo que incrementa los costos operativos (OpEx) de la planta

Tecnologías de recuperación en desarrollo

- **Recuperación basada en procesos biológicos:** Utiliza bacterias (por ejemplo, *Chromobacterium violaceum*), microorganismos o extractos vegetales para adsorber selectivamente metales de las aguas residuales. Son ecológicas, pero más lentas que los métodos químicos.
- **Métodos electroquímicos:** La electrólisis con membrana y la electroextracción (electrowinning) permiten la extracción y recuperación selectiva de metales. Estas tecnologías son muy eficaces para corrientes líquidas, pero no pueden aplicarse a materiales sólidos, como lodos o cenizas.

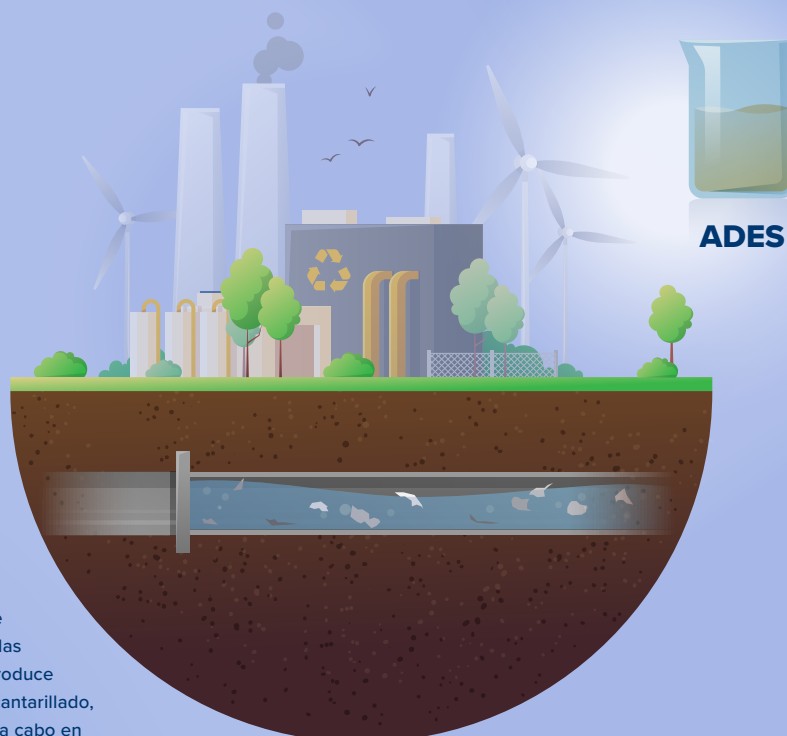


Ilustración simplificada del uso de ADES para recuperar metales de las aguas residuales. ADES no se introduce directamente en el sistema de alcantarillado, sino que la recuperación se lleva a cabo en un reactor.



El valor económico de los metales recuperados

La recuperación de metales y elementos como cobalto, cobre, oro, plata y paladio a partir de cenizas de incineración de residuos, así como de cobre, zinc y fósforo provenientes de lodos de aguas residuales, está siendo cada vez más reconocida por sus beneficios económicos y ambientales, convirtiéndose en una alternativa relevante a la minería tradicional.

Dado que los metales críticos son esenciales para diversas industrias, su recuperación resulta también financieramente rentable para el sector de tratamiento de residuos y aguas residuales: las plantas de tratamiento pueden compensar sus costos operativos mediante la venta de metales refinados a fundiciones, joyeros, fabricantes de convertidores catalíticos y otros compradores industriales.

Además, la recuperación ofrece una fuente adicional de metales, lo que ayuda a las empresas a mantener sus operaciones frente a fluctuaciones de precios y disrupciones en el suministro, contribuyendo así a la resiliencia económica.

Ejemplos de metales con alto valor de recuperación:

- **Cobalto:** Altamente valorado por su uso en baterías y dispositivos electrónicos, es considerado un material crítico con precios volátiles y una creciente demanda⁴.
- **Cobre:** Ampliamente utilizado en la transmisión eléctrica y la construcción, cuenta con un mercado secundario sólido³.
- **Oro y plata:** Entre los metales más codiciados para la recuperación debido a su alto valor de mercado y su extenso uso en la electrónica y la joyería⁵.
- **Paladio:** Perteneciente al grupo de los metales del platino (PGMs), es esencial en las industrias electrónica y química. Su alto valor y escasez hacen que su recuperación sea particularmente atractiva.

Los metales recuperados pueden alcanzar valores de entre 4.000 y 12.000 USD por tonelada⁶; en el caso de la plata y el oro recuperados, el precio puede llegar incluso a 1.000 USD por kilogramo y 100.000 USD por kilogramo, respectivamente⁷. Además, el mercado global de metales preciosos recuperados de residuos electrónicos (e-waste) superó los 10.000 millones de USD en 2023, con proyecciones de crecimiento continuo impulsadas por los altos precios de las materias primas y el aumento del volumen de desechos electrónicos^{8,9}.

Info-cuadro 2

Fuentes de metales críticos en residuos y aguas residuales

Los metales críticos, como el paladio, el oro y la plata, se encuentran en numerosos productos, incluyendo residuos eléctricos y electrónicos (conocidos como RAEE o e-waste), recubrimientos industriales, nanopartículas de plata en tejidos antibacterianos, alimentos y aditivos alimentarios, cosméticos (como el maquillaje) y productos farmacéuticos. Cuando estos productos se usan, desechan o se eliminan por los desagües, los metales pueden liberarse al medio ambiente. Incluso las joyas y aleaciones (por ejemplo, en empastes y coronas dentales) pueden liberar metales lentamente, ya sea por escorrentía del agua de lluvia o por lavados rutinarios. Otra fuente importante de metales preciosos son los vertimientos industriales provenientes de la minería, la fabricación de productos electrónicos y el recubrimiento metálico. Finalmente, los metales preciosos descartados o erosionados terminan acumulándose en los lodos de aguas residuales y en las cenizas de incineración de residuos.



ADES: Desafíos y direcciones futuras

Aunque la investigación sobre los ADES ha avanzado significativamente en los últimos años, su aplicación a gran escala aún no es factible debido a varios retos pendientes:

- **Nivel de desarrollo tecnológico y escalabilidad:**
Los ADES son actualmente objeto de investigación intensiva, con un aumento notable en los estudios sobre el tema (de 4.900 publicaciones en 2019 a 18.400 en 2024¹⁰). Sin embargo, aún no se encuentran lo suficientemente desarrollados como para producirse en grandes volúmenes. Además, la síntesis de ADES y los costos asociados continúan siendo barreras importantes para su adopción industrial.
- **Vacíos regulatorios:**
Antes de su implementación generalizada, la recuperación de metales basada en ADES requiere evaluaciones exhaustivas de seguridad y sostenibilidad ambiental.
- **Falta de estandarización:**
Las plantas municipales de tratamiento de residuos y aguas residuales generalmente no están optimizadas para una recuperación eficiente de metales. Esto se debe a que suelen requerirse sistemas especializados, como: de complejación: ruptura de los complejos metálicos en el agua residual para liberar sólidos recuperables. coagulación/floculación: agregación de partículas para formar flóculos filtrables que faciliten la separación.

A pesar de estos desafíos, los ADES presentan un alto potencial de integración en procesos combinados. Su combinación con métodos biológicos o electroquímicos de recuperación podría optimizar la eficiencia y aumentar el rendimiento de los sistemas de recuperación de metales.

Conclusión

Es recomendable y económicamente relevante recuperar metales críticos y otros elementos, como el fósforo, a partir de fuentes secundarias tales como los lodos de aguas residuales y las cenizas de incineración, para lo cual los ADES ofrecen una solución tecnológica innovadora.

Los ADES y las tecnologías híbridas representan alternativas sostenibles y de alto rendimiento frente a los métodos tradicionales de recuperación de metales, alineándose con los objetivos de la economía circular, especialmente en materia de reutilización y reciclaje.

La investigación en ADES continúa avanzando, con un enfoque en optimizar su selectividad y escalabilidad para su implementación a nivel industrial.



Políticas relevantes de la UE relacionadas con la recuperación de metales y el tratamiento de residuos (y aguas residuales)

Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE):

Promueve el reciclaje y la recuperación de materias primas críticas, estableciendo principios clave para la gestión sostenible de residuos en la Unión Europea.

Reglamento CLP (CE N.º 1272/2008): Aborda la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias peligrosas, lo cual impacta directamente los procesos de reciclaje de metales al garantizar su manipulación y tratamiento seguros.

Plan de Acción para la Economía Circular: Fomenta la simbiosis industrial y el uso eficiente de los recursos dentro de los procesos de reciclaje y recuperación, impulsando la transición hacia modelos productivos más sostenibles.

Directiva sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE, 2012/19/UE): Exige la recolección separada y el tratamiento adecuado de los RAEE, estableciendo objetivos específicos de recolección, recuperación y reciclaje. Dado que los metales críticos son de alto valor y estratégicamente importantes, el reciclaje de RAEE está directamente vinculado con el acceso y la seguridad del suministro de estos metales dentro de la UE.

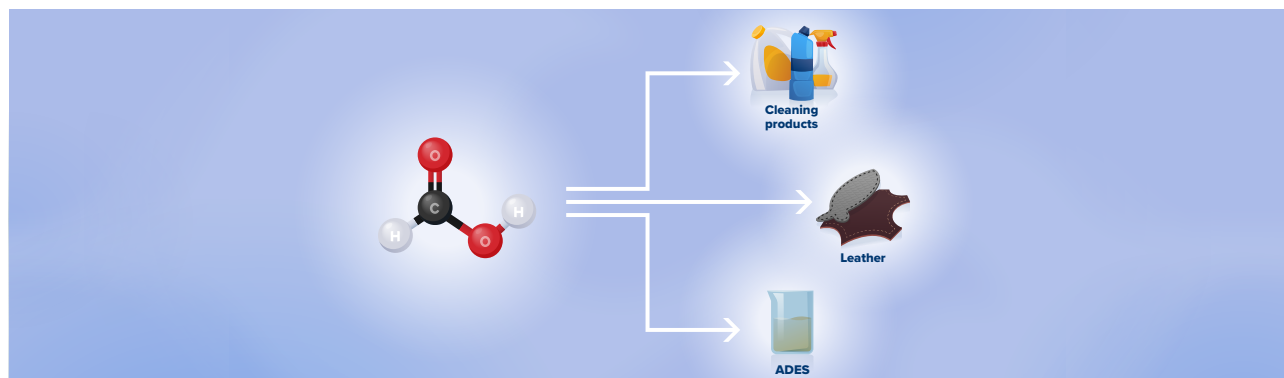
Sobre el proyecto WaterProof

El proyecto WaterProof tiene como objetivo cerrar el ciclo del carbono en el tratamiento de residuos y aguas residuales, mediante el desarrollo de un nuevo concepto de biorrefinería que convierte electroquímicamente las emisiones de CO₂ provenientes de las plantas urbanas de tratamiento en ácido fórmico renovable, utilizado posteriormente para la producción de bienes de consumo ecológicos de alto valor.

Durante este proceso electroquímico también se generan peróxidos como subproductos, los cuales pueden emplearse para la eliminación de productos farmacéuticos y pesticidas presentes en las aguas residuales.

El ácido fórmico se transforma además en disolventes eutécticos profundos ácidos (ADES), utilizados para la recuperación de metales críticos a partir de lodos de aguas residuales y cenizas de incineración de residuos. Los ADES ofrecen ventajas ambientales al sustituir los ácidos minerales tradicionales y reducir los requerimientos energéticos, gracias a su operación a temperaturas más bajas.

Impulsado por energías renovables, el enfoque de WaterProof contribuye a un ciclo del agua limpio y libre de emisiones, apoyando la transición hacia una Europa climáticamente neutra y una economía circular, al integrar la utilización del CO₂, la sustitución de materias primas fósiles, la recuperación de metales preciosos y la electrificación industrial.



Referencias

- 1 Qin, H., Hu, X., Wang, J., Cheng, H., Chen, L., & Qi, Z. (2020). Overview of acidic deep eutectic solvents on synthesis, properties and applications. *Green Energy & Environment*, 5(1), 8-21.
- 2 Yuan, Z., Liu, H., Yong, W. F., She, Q., & Esteban, J. (2022). Status and advances of deep eutectic solvents for metal separation and recovery. *Green Chemistry*, 24(5), 1895-1929.
- 3 Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DESS) and their applications. *Chemical reviews*, 114(21), 11060-11082. <https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>
- 4 https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2015/02/material-resources-productivity-and-the-environment_g1g27386/9789264190504-en.pdf
- 5 <https://iwaponline.com/jwrd/article/13/2/134/94168/Recovery-of-precious-metals-from-processed>
- 6 Phogat, P., Kumar, S., & Wan, M. (2025). A scientometrics study of advancing sustainable metal recovery from e-waste: processes, challenges, and future directions. *RSC Sustainability*.
- 7 <https://www.azomining.com/News.aspx?newsID=18339>
- 8 <https://www.gminsights.com/industry-analysis/precious-metals-e-waste-recovery-market>
- 9 <https://www.alliedmarketresearch.com/precious-metals-e-waste-recovery-market-A31390>
- 10 <https://scholar.google.de>
- 11 <https://www.mdpi.com/2673-4079/1/3/16>



Financiado por
la Unión Europea