

Ácidos orgánicos y su importancia en el desarrollo sostenible

Organic acids and their importance in sustainable development

Fernando Israel Gómez-Castro*

Jocelyne Villagómez Ibarra

Oswaldo Isaac Martínez-Cortés

Zeferino Gamiño-Arroyo

Salvador Hernández

Guillermo Manuel González-Guerra

Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México

Juan Cristóbal García-García

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería, Guanajuato, México

* fgomez@ugto.mx

Fecha de recepción: 11 de diciembre del 2023

Fecha de aceptación: 21 de octubre del 2024

Resumen

En años recientes, los ácidos orgánicos han tomado gran importancia para diversas aplicaciones industriales. Se han realizado distintos estudios donde se propone el uso de este tipo de sustancias como reemplazo de los ácidos inorgánicos, tales como el ácido sulfúrico, entre otros. Los ácidos orgánicos pueden obtenerse a partir de biomasa; de esta manera, su producción se asocia a un impacto ambiental relativamente bajo y con el potencial de contribuir a la implementación de esquemas de economía circular. Una de las aplicaciones en las que los ácidos orgánicos pueden reemplazar a los inorgánicos es en la recuperación de metales valiosos a partir de residuos, incrementando sus potenciales beneficios al medio ambiente. En este trabajo se presentan las características de los ácidos orgánicos. Se discuten las estrategias para su obtención a partir de biomasa, así como sus potenciales aplicaciones en hidrometalurgia.

Palabras claves: ácidos orgánicos, biomasa, fermentación, hidrometalurgia



Abstract

In the last years, organic acids have taken importance on diverse industrial applications. Various studies have taken place, where the use of such substances is proposed as replace of inorganic acids, as sulfuric acid, among others. Organic acids can be obtained from biomass. Thus, its production is associated with a relatively low environmental impact, with potential to contribute to the implementation of circular economy schemes. Among the applications on which organic acids can replace to the inorganic ones, the recovery of valuable metals from residues can be mentioned, increasing the potential benefits of such acids to the environment. In this work, the characteristics of the organic acids are presented. The strategies required to produce them from biomass are discussed, and their potential applications in hydrometallurgy are described.

Keywords: organics acids, biomass, fermentation, hydro-metallurgy

Introducción

Los ácidos inorgánicos, también conocidos como ácidos minerales, son sustancias obtenidas a partir de compuestos inorgánicos, entre los más comunes se encuentran el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico (Speight, 2018). El ácido sulfúrico es uno de los compuestos químicos más empleados, contando a su vez con una amplia experiencia en su producción a nivel industrial. Se ha reportado que la primera planta comercial de producción de ácido sulfúrico inició operaciones en el siglo XVI (Kutney, 2007). La demanda por este material a nivel mundial en 2021 fue de 259.62 millones de toneladas métricas (Statista, 2023a). Asimismo, se ha reportado que el ácido sulfúrico comprende un 36-40% del mercado global de ácidos (Predence Research, 2022). Otros ácidos inorgánicos tienen también un importante mercado a nivel mundial, tal como el ácido nítrico, con una demanda global en 2021 de aproximadamente 70 millones de toneladas (Lim y col., 2021). Sin embargo, una característica de los ácidos minerales comunes es su alta corrosividad. Adicionalmente, durante su manejo pueden generarse vapores peligrosos (Xiao y col., 2020), así como corrientes residuales con alta acidez (Rodríguez-Domínguez y Kirsch, 2006). Por otra parte, muchas de las materias primas empleadas en la producción de los ácidos inorgánicos provienen de minerales no renovables, cuya extracción tiene un impacto ambiental negativo, asociado principalmente a la contaminación y/o acidificación del agua, así como el consumo de recursos no renovables, la degradación del suelo y la

contaminación atmosférica, entre otros (Gallardo Martínez y col., 2013). Debido a estos factores negativos, en los últimos años ha crecido el interés por la obtención de materiales con menor impacto ambiental que puedan reemplazar a los ácidos inorgánicos en diversas aplicaciones.

Los ácidos orgánicos pueden producirse a partir de procesos fermentativos. Estas rutas de producción implican, en principio, un menor impacto ambiental en comparación con el asociado a la obtención de ácidos inorgánicos. Lo anterior debido a que se producen a partir de materiales renovables, y no se generan productos como óxidos de azufre o de nitrógeno, que contribuyen al efecto invernadero. Por otra parte, el uso de biomasa residual contribuye a la implementación de esquemas de economía circular, reintegrando un material actualmente considerado como desecho a la cadena productiva y dándole un segundo uso en la obtención de productos de valor agregado (Oloffson y Börjesson, 2018), como los ácidos orgánicos. El mercado de los ácidos orgánicos a nivel mundial es menor que el de los ácidos inorgánicos. Por ejemplo, el mercado del ácido acético en 2021 fue de 16.7 millones de toneladas métricas (Statista, 2023b), mientras que el del ácido láctico fue de 1.39 millones de toneladas métricas (Statista, 2023c).

Se han reportado diversas aplicaciones relevantes para los ácidos orgánicos. Por ejemplo, el ácido cítrico es reconocido como un compuesto con amplia aplicación debido a su versatilidad y biocompatibilidad, con usos en industrias como la farmacéutica y la alimenticia, así como en la producción de detergentes y cosméticos (Soccol y col., 2006; Lambros y col., 2022). Por otra parte, el ácido láctico tiene aplicaciones en la conservación de alimentos, y es materia prima para la obtención de plásticos y fibras, entre otros derivados (Datta y Henry, 2006). El ácido acético es empleado como saborizante y conservador en alimentos (Vidra y Nemeth, 2018); también es materia prima para la obtención de productos como el vinil acetato, el cual es la base para la resina polivinil acetato (Omanov y col., 2020). Una aplicación que ha tomado relevancia en los últimos años implica el uso de los ácidos orgánicos como agentes lixiviantes en procesos hidrometalúrgicos. En la extracción de metales valiosos de jales mineros, así como la recuperación de metales de residuos eléctricos y electrónicos, regularmente se emplea ácido sulfúrico como un agente lixiviante con un alta eficiente de recuperación, no obstante, dada la agresividad de este material, así como las implicaciones medioambientales de su producción, en años recientes se ha estudiado el poten-

cial de los ácidos orgánicos para emplearse como reemplazo del ácido sulfúrico en estas aplicaciones. Esto permitiría llevar a cabo el proceso de recuperación de materiales a partir de residuos empleando agentes que pueden obtenerse a partir de residuos orgánicos, lo que contribuye a un esquema sostenible, enmarcado en el concepto de economía circular. Dado lo anterior, en este artículo se describirán a los ácidos orgánicos más comunes y su obtención a partir de biomasa. Asimismo, se establecerá el potencial de este tipo de materiales para su aplicación en procesos hidrometalúrgicos para la recuperación de metales valiosos.

Ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos son materiales que contienen en su estructura uno o más grupos carboxilo (Papagianni, 2011). En otras palabras, sus moléculas incluyen átomos de carbono unidos por átomos de oxígeno con enlaces dobles. Lo anterior les otorga características fisicoquímicas a los ácidos orgánicos, como la solubilidad en agua y su carácter de ácido débil (Scapinello y col., 1998).

A pesar de que muchos compuestos cumplen con estas características, existe solo un número limitado que han presentado un creciente interés comercial, lo que ha llevado al estudio de rutas de producción biotecnológica como una solución integral al paulatino incremento en la demanda por parte de la industria química. Estos análisis se han centrado tanto en el desarrollo de estrategias eficientes de producción, como en el aprovechamiento de residuos o subproductos industriales (Ripoll, 2011).

Este tipo de ácidos están presentes principalmente en alimentos tales como frutas y vegetales, siendo responsables de varias de sus propiedades organolépticas (Flores y col., 2012). Sin embargo, algunos ácidos orgánicos también pueden encontrarse en otras fuentes, como el suero de leche (García-Mujica y Benavides-Cedeño, 2020). Los más comunes son el ácido acético, el ácido cítrico, el ácido oxálico, entre otros (Gurtler y Mai, 2014).

Respecto al ácido acético, este es uno de los ácidos orgánicos con mayor demanda tanto en la industria química como en la alimentaria, siendo sus principales aplicaciones la producción de acetato de vinilo monómero, empleado en la fabricación de pinturas, adhesivos y papel, y la producción de ácido terftálico purificado, precursor del poliéster PET. Además, es el ingrediente clave en el vinagre (ICIS., s.f.). Se prevé que el mercado

global de ácido acético crezca considerablemente al año 2027, llegando a alcanzar los 12,471 mdd, siendo el ácido acético puro uno de los más importantes solventes en la industria electrónica (Grand View Research, 2023). Entre las formas de obtención del ácido acético se distinguen dos tipos de rutas:

i) Las vías sintéticas

Los tres principales métodos convencionales de producción de ácido acético sintético son la oxidación de acetaldehído (Agreda y Zoeller, 1992), la oxidación de hidrocarburos en fase líquida (Weissermel y Arpe, 2003) y la cabonilación de metanol (Thomas y Süß-Fink, 2003). A pesar de que en la actualidad los tres métodos mencionados son los más utilizados debido al amplio conocimiento en torno a estas rutas de síntesis (Jmker y col., 2014), los requerimientos de mejoras en términos de impacto ambiental han impulsado la búsqueda de procesos alternativos.

ii) La fermentación bacteriana

La obtención de ácido acético a través de la fermentación de azúcares es el método más tradicional, aunque menos utilizado actualmente dadas las ventajas que presentan las vías sintéticas desde un punto de vista económico, del posible aprovechamiento de materia prima y de la potencial eficiencia en sus procesos de síntesis (González-Guerra y col., 2024). El proceso fermentativo se basa en el uso de diferentes cepas de microorganismos (bacterias u hongos) que potencializan el proceso de conversión hacia ácidos orgánicos. En la Tabla 1 se muestran los microorganismos más utilizados en los últimos años, así como su hábitat y forma de aislamiento para su uso. Se observa que, adicional a la generación de ácido láctico, un microorganismo puede dar origen a la formación de otros ácidos orgánicos.

Como se puede observar en la Tabla 1, existe una gran variedad de microorganismos que pueden utilizarse en rutas fermentativas para la producción de ácidos orgánicos, siendo el cítrico y el láctico los más comunes. Asimismo, la incubación de estos oscila entre uno a siete días y no ocupan temperaturas mayores a 30 °C, lo que puede significar una ventaja en términos de requerimientos energéticos, al no necesitar un incremento considerable a partir de la temperatura ambiente.

Tabla 1

Microorganismos utilizados en fermentación bacteriana.

Microorganismo	Hábitat	Aislamiento	Ácido orgánico que puede producirse a través del microorganismo	Referencia
<i>Escherichia coli</i>	Se encuentra en el intestino de humanos y animales. Ambientes contaminados. Alimentos.	Incubación a 37 °C por 24 h en agar MacConkey (peptona, sales biliares y lactosa) o Eosin Metileno (peptona, eosina y lactosa). Con un pH de crecimiento óptimo de 7.0, puede crecer tanto en presencia como en ausencia de oxígeno.	Ácido láctico, ácido acético y ácido succínico.	Liu y col. (2013). Thakker y col. (2013).
<i>Corynebacterium glutamicum</i>	Suelo y ambientes vegetales.	Incubación a 30 °C por 48 h en medios que contengan sustratos de almidón o glucosa. Con un pH óptimo de crecimiento entre 6.5 y 7.5, en condiciones aeróbicas.	Ácido glutámico, ácido cítrico y ácido succínico	Litsanov y col. (2013)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Ambientes ricos en azúcares y en algunos ambientes industriales para la fabricación de alcoholes.	Incubación a 30 °C por 48 h en agar YPD (levadura, peptona y dextrosa) o Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH de crecimiento óptimo entre 4.5 y 6.5, puede crecer tanto en presencia como en ausencia de oxígeno.	Ácido cítrico y el ácido láctico.	Curran y col. (2013) Toivari y col. (2012)
<i>Aspergillus niger</i>	Se encuentra comúnmente en el suelo, materia orgánica en descomposición y en ambientes húmedos	Incubación a 30 °C por 7 días en agar patata dextrosa o Agar Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 4.5 y 6.5, en condiciones aeróbicas.	Ácido cítrico.	Blumhoff y col. (2013) Kuivanen y col. (2012)

<i>Aspergillus oryzae</i>	Se encuentra comúnmente en suelos y en materia orgánica en descomposición. También se encuentra en alimentos fermentados como el miso o la salsa de soja.	Incubación a 30 °C por 7 días en agar patata dextrosa o Agar Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 5.5 y 6.5, en condiciones aeróbicas.	Ácido cítrico y ácido láctico.	Brown y col. (2013)
<i>Rhizopus oryzae</i>	Se encuentra comúnmente en suelos y en materia orgánica en descomposición. También se encuentra en alimentos fermentados a base de soja.	Incubación a 30 °C por 5 días en agar patata dextrosa o Agar Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 5.0 y 6.5, en condiciones aeróbicas.	Ácido cítrico.	Zhang y col. (2012)
<i>Pichia kudriavzevii</i>	Se encuentra en suelos, ambientes vegetales y en la superficie de frutas. Es común en ambientes con alta disponibilidad de azúcares.	Incubación a 30 °C por 72 h en agar YPD (levadura, peptona y dextrosa) o Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 4.5 y 6.0, en condiciones aeróbicas.	Ácido láctico y ácido cítrico.	Toivari y col. (2013)
<i>Kluyveromyces lactis</i>	Se encuentra en suelos y en la superficie de plantas, donde puede acceder a azúcares presentes en la materia orgánica.	Incubación a 30 °C por 72 h en agar YPD (levadura, peptona y dextrosa) o Sabouraud (peptonas y dextrosa). Con un pH óptimo de crecimiento entre 5.0 y 6.5, puede crecer tanto en presencia de oxígeno como en ausencia.	Ácido láctico y ácido cítrico.	Nygaard y col. (2011)

Los caldos de la fermentación en producción en escala laboratorio están formados mayoritariamente por agua destilada o desionizada con una pequeña cantidad del ácido. En los procesos a gran escala se utiliza agua corriente, aunque recientes estudios proponen el uso de agua marina (Chen y Liu, 2021). En cualquiera de los casos, es necesario diseñar procesos que consigan concentrar y purificar esas disoluciones. Una ventaja que presenta la biosíntesis es la posibilidad de obtener los productos deseados a partir de fuentes renovables con contenido de azúcares, celulosa y/o hemicelulosa. Dentro de estos materiales es posible mencionar residuos tales como cáscaras,

bagazos, pajas, pulpas, residuos sólidos urbanos orgánicos, entre otros (Caltzontzin-Rabell y col., 2022; Espinoza-Vázquez y col., 2023)

Otro ácido orgánico de interés es el ácido cítrico (ácido 2-hidroxipropanoico), el cual se considera de origen natural, sin embargo, también se puede sintetizar vía ruta metabólica. Es parte de casi todos los tejidos animales y vegetales, se presenta en forma de ácido en frutas como el limón, mandarina, lima, toronja, naranja, piña, ciruela, guisantes, melocotón, así como en los huesos, músculos y sangre de animales. Adicional a sus ya mencionadas aplicaciones en las industrias farmacéuticas y de alimentos (Behera, 2020), el ácido cítrico puede emplearse en la recuperación de metales, como zinc y níquel, a partir de lodos (Wang y col. 2015), o metales como litio y cobalto a partir de residuos de baterías (Punt y col., 2021).

La síntesis en el laboratorio del ácido cítrico se lleva a cabo a partir de bacterias u hongos en una fuente de nitrógeno, carbono y glucosa. Se aisló por primera vez a partir del zumo de limón mezclado con cal, disolviendo el precipitado con ácido sulfúrico (Sánchez Toro y col., 2004). Las técnicas más comunes para su obtención son la fermentación sumergida y de superficie (Vandenberghe y col., 1999), y la fermentación en estado sólido (Mendoza y Kulich, 2004). En el caso de la fermentación sumergida y de superficie, las variables a tomar en cuenta durante los procesos de conversión son: temperatura, pH, concentración de sustrato, agitación y el tiempo que dura la fermentación. Referente a la fermentación en estado sólido; la humedad, la temperatura, el pH, la concentración de sustrato, la aeración y el tiempo de fermentación son las variables más importantes por tomar en consideración. Para su comercialización, se presenta como un ácido anhídrico o monohidratado, se espera una producción anual de 1.5 millones de toneladas de las cuales el 70% se destina a la industria de alimentos y bebidas como acidificante o antioxidante para preservar o mejorar los sabores y aromas de jugos de frutas, helados y mermeladas. 20% se usa en la industria farmacéutica como antioxidante para conservar las vitaminas, efervescentes, correctores de pH. El 10% restante se utiliza en la industria química como un agente de formación de espuma para el ablandamiento y el tratamiento de los textiles (Guadalupe y col., 2021).

Finalmente, el ácido oxálico es el más simple de los ácidos dicarboxílicos alifáticos, se trata de un ácido orgánico saturado. Éste se presenta como un sólido incoloro (cristales higroscó-

picos o polvo blanco) con un sabor amargo, sus niveles de reacción son altos con oxidantes fuertes, forma oxalatos al reaccionar con bases, es muy ácido y venenoso, es soluble en agua y en alcohol y se cristaliza fácilmente en el agua (Aliano y Ellis, 2009).

El ácido oxálico es un producto con un gran interés industrial, tanto por su uso directo como decapante, curtierte, en la limpieza de radiadores, etcétera, como por ser un intermedio importante para la síntesis de numerosos compuestos que pueden aplicarse en la industria. Los procesos denominados “*síntesis química*” para la obtención del ácido oxálico presentan una serie de inconvenientes relacionados a su eficiencia e impacto ambiental, ya que se generan desechos como el dióxido de nitrógeno, ácido nítrico residual, nitratos, óxidos de carbono y aguas residuales. Este método tradicional se basa en la oxidación con ácido nítrico de las melazas de la remolacha azucarera, lo que da lugar a un rendimiento inferior al 70% y la producción de subproductos con impacto medioambiental, consecuencia del desprendimiento de gran cantidad de óxidos de nitrógeno y la generación de agua con una elevada demanda química de oxígeno (Ochoa Gómez, 2003). En la Tabla 2, se presenta una comparativa de ventajas y desventajas en el empleo de ácidos orgánicos respecto a los inorgánicos en diversas aplicaciones industriales (Theron y Lues, 2010a, 2010b).

Tabla 2

Ventajas y desventajas de los ácidos orgánicos respecto al uso de ácidos inorgánicos (Theron y Lues, 2010a, 2010b).

Ventajas	Desventajas
Biocompatibilidad: son ácidos menos tóxicos, más seguros en industrias como la alimentaria.	Costos de producción: los procesos fermentativos por los que se obtienen pueden ser más costosos que la obtención industrial de ácidos inorgánicos.
Sostenibilidad: se pueden obtener a partir de residuos agroalimentarios, lo que dirige los esfuerzos a la implementación de esquemas de economía circular.	Estabilidad: los ácidos orgánicos pueden ser menos estables químicamente a temperaturas altas y condiciones extremas de pH.
Menor corrosividad: los ácidos orgánicos son menos corrosivos, lo que reduce riesgo de daños en equipamiento industrial.	Variabilidad en el rendimiento: puede variar dependiendo de la fuente y del proceso de producción

Impacto ambiental: los subproductos pueden degradarse fácilmente a través de procesos biológicos.	Escalabilidad: la producción de ácidos orgánicos a partir de procesos biotecnológicos puede enfrentar desafíos de escalabilidad, lo que dificulta su implementación a gran escala en comparación con los métodos tradicionales de producción de ácidos inorgánicos.
---	---

A pesar de que el uso de ácidos orgánicos como alternativa a los ácidos inorgánicos en aplicaciones industriales ofrece ventajas significativas en términos de sostenibilidad y seguridad, también presenta limitaciones en términos de económicos derivado a que la mayoría de sus procesos se encuentran todavía en investigación, lo que dificulta desplazar a las tecnologías existentes por ácidos inorgánicos. En el caso de procesos que ya se encuentran establecidos, como es el caso del utilizado para producción de ácido cítrico, la etapa de purificación presenta áreas de oportunidad desde el punto de vista ambiental. Debido a esto, es necesaria la búsqueda de estrategias para la mejora de la competitividad económica de las rutas de producción de ácidos orgánicos.

Como se ha mencionado hasta el momento, los ácidos orgánicos (cítrico, láctico, oxálico y acético) se pueden obtener a partir de diferentes métodos fermentativos. Para su producción es posible utilizar fuentes de carbono como materia prima; igualmente, se requiere un ambiente rico en nitrógeno, dependiendo del microorganismo ausencia o presencia de oxígeno, entre otras. Asimismo, se emplean diferentes cepas de bacterias y hongos, y los métodos de síntesis tienen gran influencia sobre el rendimiento en la obtención de estos productos, sin embargo, debido a la relevancia que tienen los ácidos orgánicos en los diferentes sectores de la industria, es necesario proponer nuevas rutas de conversión, así como enfocar y direccionar los métodos de síntesis a partir de materia prima de bajo costo y renovable. Los actualmente considerados como residuos o subproductos agroalimentarios (e.g. residuos de frutas y vegetales como cáscaras de plátano, naranja, granada, piña, zanahoria, brócoli, entre otros) son una alternativa interesante para esta aplicación, debido a su gran contenido de azúcares y a la gran generación de este tipo de residuos. A continuación, se aborda la importancia de utilizar la biomasa para la producción de ácidos orgánicos.

Producción de ácidos orgánicos a partir de biomasa

Procesos de conversión de biomasa En la Tabla 3 se muestran las 4 rutas para llevar a cabo la conversión de biomasa en bioproductos.

Tabla 3

Tipos de rutas de conversión de biomasa. *Elaboración propia.

Tipo de conversión	Descripción	Aplicaciones	Referencia
Anaerobia	Este proceso utiliza microorganismos para descomponer la biomasa en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (principalmente metano) y digestato.	Sus aplicaciones son en la conversión de residuos de alimentos, estiércol y residuos agrícolas en biogás.	He y col. (2024)
Aerobia	Se emplean microorganismos en presencia de oxígeno que convierten la biomasa en productos como ácidos orgánicos tales como el ácido cítrico y el ácido láctico.	Sus aplicaciones utilizan los residuos de frutas y vegetales para la producción de ácido orgánicos.	Sreenath y col. (2021)
Hidrólisis enzimática	En este proceso se emplean enzimas específicas con la capacidad de descomponer la celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables.	La conversión de paja, bagazo y otros residuos lignocelulósicos en azúcares para fermentación son algunos de los ejemplos de sus aplicaciones.	Rathore y Singh (2021)
Pirólisis y gasificación	Estos procesos térmicos se basan en la descomposición de la biomasa a altas temperaturas en ausencia (pirólisis) o con cantidades limitadas de oxígeno (gasificación), produciendo biocombustibles líquidos y gaseosos.	Las aplicaciones de esta categoría son la conversión de residuos leñosos y agrícolas en biocombustibles.	Bridgwater (2012)

*Tipos de biomasa a partir
de los cuales se pueden
obtener ácidos orgánicos*

Una de las grandes ventajas que presentan los ácidos orgánicos es su potencial de obtención a partir de biomasa proveniente de residuos agroalimentarios, como frutas, vegetales o cosechas. Estos productos pueden ser de gran utilidad para diversas aplicaciones en la industria alimentaria, la industria química y petroquímica; así como para industrias en el tratamiento de aguas y la recuperación de elementos de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Esto muestra el potencial de los ácidos orgánicos derivados de residuos agroalimentarios y como pueden contribuir a la sostenibilidad y la reducción de residuos que se generan en los diferentes sectores, tanto industrial como urbano, al tiempo que ofrecen beneficios en una amplia variedad de aplicaciones. La demanda de productos sostenibles y la creciente preocupación por el medio ambiente están impulsando aún más la investigación y el desarrollo en dicho campo (Gómez Castro y col., 2022).

Como ya se mencionó anteriormente, la biomasa representa una gran ventaja para distintos sectores y favorece la optimización de posibles rutas de procesamiento y deshecho de los residuos. Entre las ventajas se incluyen la implementación de esquemas sostenibles de manejo de residuos, debido a la reducción de la carga medioambiental asociada a la disposición de estos: como una alternativa a su acumulación en rellenos sanitarios o su incineración, los residuos pueden tener un segundo uso. Otra ventaja importante es la reducción de la dependencia de combustibles fósiles derivados del petróleo a largo plazo. En general, la utilización de residuos agroalimentarios para la producción de ácidos orgánicos no sólo contribuye a la reducción de los mismos y a la sostenibilidad medioambiental, sino que también ofrece beneficios económicos y se ajusta a la creciente demanda de productos sostenibles. Dicho planteamiento es beneficioso tanto para el medio ambiente como para la economía. Diversos autores han realizado un extenso estudio para destacar la importancia de encontrar nuevas rutas de procesamiento; tal es el caso de Liu y col. (2023), quienes realizaron un estudio de valoración de los residuos agroalimentarios para la producción de bioproductos. Asimismo, Liu (2023), centra su investigación en las rutas de conversión y la caracterización detallada de los residuos agroalimentarios. Entre los ácidos que más destacan por su obtención a partir de biomasa se encuentran el ácido cítrico, el ácido acético y el ácido oxálico (Yan y col., 2023).

De entre los residuos agroalimentarios que recientemente se han reportado destacan los residuos de cáscara de gra-

nada (Roukas y Kotzekidou, 2020), a partir de los cuales pueden obtenerse diferentes subproductos como tintes naturales, extractos antioxidantes, productos para el cuidado personal y/o biocombustibles. Este proceso de obtención no requiere condiciones asépticas para llevar a cabo la conversión y se facilita el proceso mediante la fermentación de estado sólido, lo cual reduce el costo de producción.

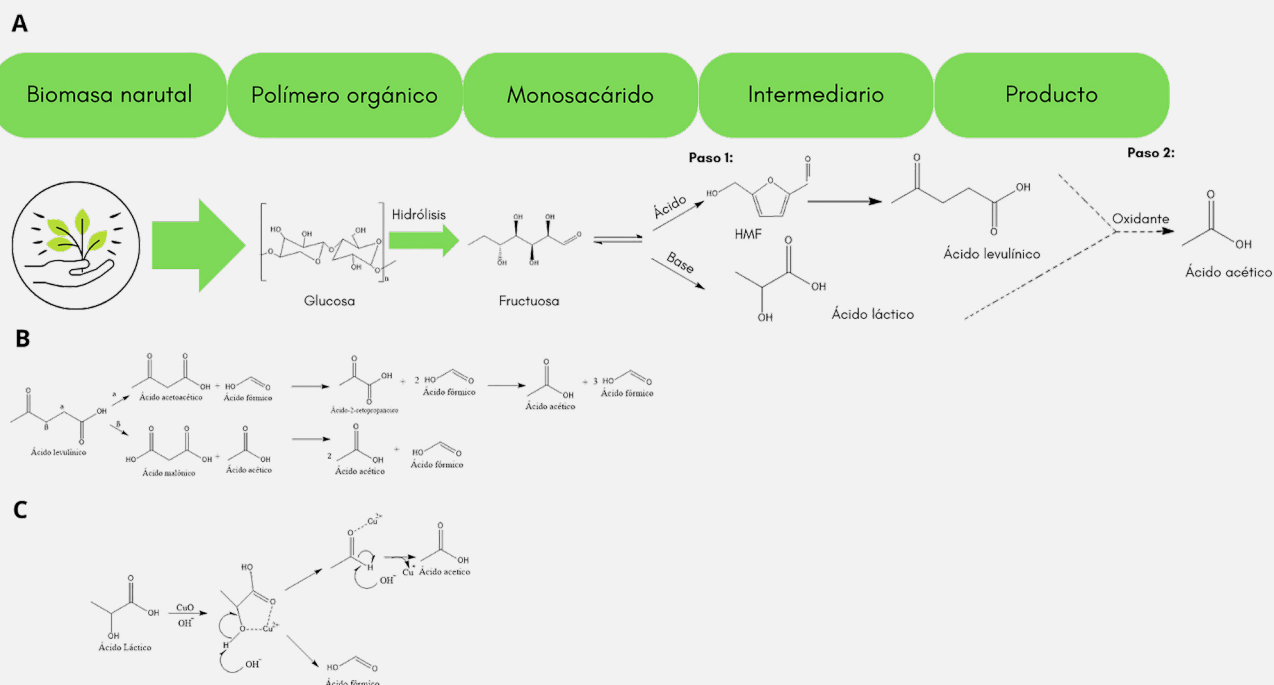
*Descripción general
de las rutas de
procesamiento
para la obtención
de ácidos orgánicos*

De entre las rutas de procesamiento más viables, la producción de ácidos orgánicos se ha favorecido, con buenos rendimientos y un bajo costo de producción, de la fermentación de residuos de biomasa, como los mencionados anteriormente. La producción de ácido cítrico o del ácido acético se ha obtenido principalmente con *Aspergillus niger* usando una ruta fermentativa que involucra un proceso de secado, neutralización y fermentación mediante el hongo mencionado (Villagómez-Ibarra y col., 2023). Sin embargo, la fermentación en estado sólido ofrece más ventajas, como la eficacia y la similitud que presenta el desarrollo de microorganismos con un entorno natural de crecimiento (Roukas y Kotzekidou, 2020). Esto se debe a que se aprovechan los residuos sólidos generados. Además, requiere menos agua que la fermentación líquida, facilita un mejor control de la temperatura y la humedad, y genera subproductos de valor agregado.

Yan y col. (2023) realizaron un extenso análisis de las rutas de procesamiento y la viabilidad que existe para la conversión de biomasa a ácidos orgánicos; a modo de ejemplo de la relevancia que tienen estas síntesis, la Figura 1 presenta la ruta para la obtención del ácido acético. En la serie de reacciones A se parte de la biomasa, posteriormente se da un proceso de hidrolisis y de neutralización a la glucosa y fructosa que componen a los diferentes residuos de fruta y vegetales. De esta manera, se obtienen ácido láctico y ácido levulínico, este último al pasar por un proceso de oxidación da lugar al ácido acético. En la secuencia de reacciones B se observa que a partir del ácido levulínico formado en la ruta A, se puede obtener el ácido acético y el ácido fórmico. Finalmente, para la ruta de reacciones C, el ácido láctico obtenido en la ruta A también puede dar lugar a la producción de ácido fórmico y ácido acético posterior a un tratamiento con catalizadores metálicos.

Figura 1

Rutas de reacciones para la conversión de biomasa a ácidos orgánicos (Yan y col., 2023).



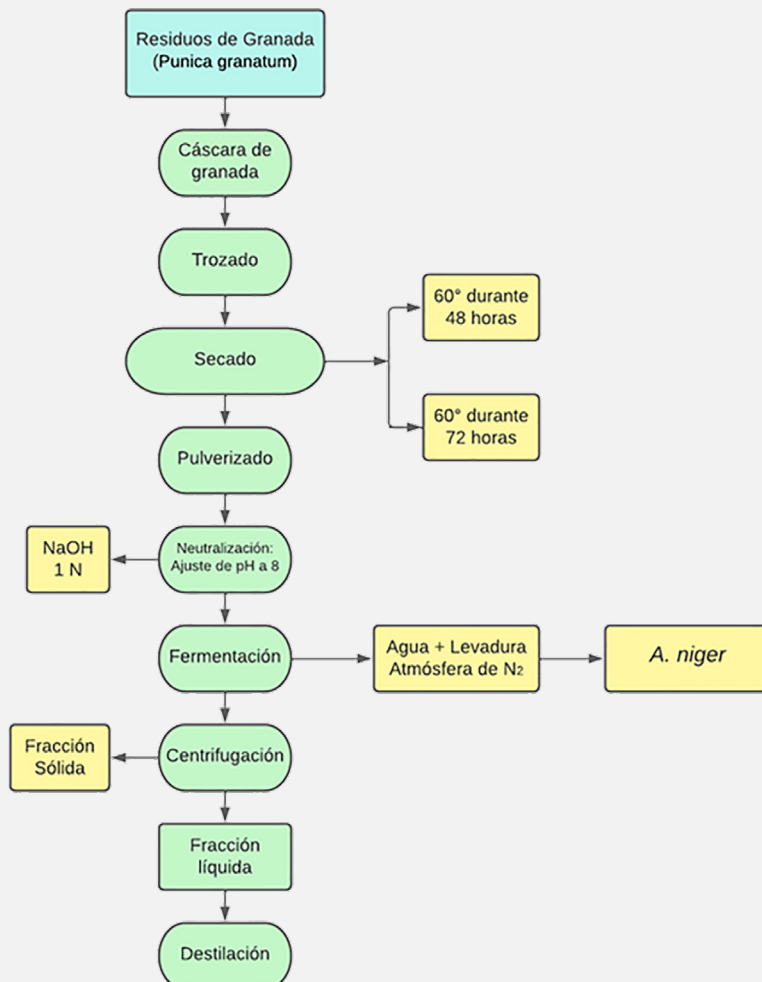
Se ha reportado la obtención de biocombustibles a partir de los residuos agroalimentarios (Santos Tanamachi y col., 2022); dichas rutas tienen etapas similares en la conversión de los productos para la obtención de ácidos orgánicos. Lo anterior permite continuar con el estudio para realizar el análisis de nuevas rutas para la obtención de ácidos orgánicos como co-producto de la obtención de bioetanol y otros biocombustibles mediante una vía fermentativa. En la Figura 2 se presenta la ruta propuesta por Villagómez-Ibarra y col. (2023), en donde se resalta que el pretratamiento y el ajuste de pH es el mismo que se emplea para la obtención de bioetanol, el proceso se direcciona para la conversión de ácidos orgánicos en la etapa de fermentación utilizando el hongo *A. Niger*.

Hasta el momento se han revisado los aspectos más importantes de las rutas de procesamiento para la obtención de biocombustibles a partir de biomasa, así como el potencial que tiene utilizar los residuos agroalimentarios para la producción de estos ácidos; no obstante, se requiere continuar con esfuerzos en las propuestas de novedosas metodologías, que permitan obtener reproducibilidad en la síntesis, rendimientos altos y que sean rutas sustentables para mitigar los impactos con el medio ambiente. Un ejemplo de esto es el proceso de producción de ácido cítrico a partir de residuos agroindustriales,

que utiliza ácido sulfúrico para lograr altos rendimientos en el pretratamiento y la redisolución (Martínez-Ramírez y col., 2023). Esto plantea la necesidad de buscar pretratamientos alternativos más eficientes y procesos de separación que empleen agentes de bajo impacto ambiental pero que sean competitivos económicamente con la ruta tradicional de purificación por precipitación o cristalización (Cerón-Hernández y col., 2024). Además, la implementación de esquemas para aprovechar los residuos en la producción a gran escala de derivados de valor, como los ácidos orgánicos, requiere una planificación adecuada de la cadena de suministro. Un diseño óptimo de esta cadena permite establecer estrategias para la recolección de la materia prima y la distribución de los productos, de modo que se logren esquemas económicamente viables y con bajo impacto ambiental, beneficiando a la sociedad (Gómez-Castro y col., 2022).

Figura 2

Ruta propuesta para la conversión de residuos de granada a ácido cítrico (Villagómez-Ibarra y col., 2023).



Aplicaciones en hidrometalurgia

A continuación, se describirán dos aplicaciones para la extracción de metales en hidrometalurgia. La primera es la recuperación de metales a partir de jales mineros. La segunda aplicación que se describe es la recuperación de metales a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Recuperación de metales a partir de jales mineros

Actualmente en México, la minería representa una de las principales actividades que impulsan la economía del país, alrededor de 8 mil mdp al Producto Interno Bruto (PIB) (Banxico, 2022); sin embargo, el desarrollo de esta actividad es la responsable de generar residuos con impacto negativo al medio ambiente. Por ejemplo, sus residuos contribuyen a la contaminación del suelo derivada de la liberación de metales pesados en la extracción (plomo, arsénico y mercurio), generando también lo que se conoce como drenaje ácido de mina, cambiando el pH del suelo. Asimismo, genera destrucción de los hábitats y la erosión del suelo (Araya y col., 2020, 2021). Los jales mineros corresponden a los residuos sólidos resultantes en los procesos metalúrgicos después de haber recuperado los valores de interés tales como Cu, Co, As, Hg, Pb, Zn, Fe, Ag y Au (Ruiz-Sánchez y Juárez-Tapia, 2022). Araya y col., (2020, 2021) reportaron que a nivel mundial la industria minera genera alrededor de 10 billones de toneladas de jales mineros por año, con la tendencia de duplicar esta cantidad en el año 2035. Los métodos que se utilizan para la remoción de metales en estos jales mineros son costosos y generan una gran cantidad de residuos ácidos (Ruiz-Sánchez y Juárez-Tapia, 2022 y Nwaila y col., 2021).

Como una alternativa, la lixiviación es un método utilizado en la hidrometalurgia. Para este proceso, los ácidos orgánicos se han convertido en alternativas interesantes para disolver selectivamente los metales objetivo del mineral contaminante (Astuti y col., 2016). La elección del ácido orgánico depende del metal o mineral específico que se esté procesando. Algunos ejemplos son:

- Ácido oxálico: Se utiliza en la lixiviación de minerales de plomo, paladio y uranio.
- Ácido cítrico: Ayuda en la lixiviación de metales como el cobalto, el silicato y el níquel.
- Ácido acético: Se emplea en la lixiviación de minerales de uranio y de hierro.

Es importante destacar que la selectividad en la extracción de metales provenientes de jales mineros podría incrementar el costo de operación. No obstante, este aumento podría compensarse mediante la reducción del impacto ambiental, lo cual se lograría considerando los siguientes factores: i) inversión en tecnologías avanzadas que sustituyan las convencionales, ii) amortización del aumento de costos, minimizando la contaminación al ser más selectivo y reduciendo la liberación de metales, iii) ahorro en multas y regulaciones gracias a extracciones más eficientes, y iv) recuperación y aprovechamiento de metales valiosos.

Recuperación de metales a partir de jales mineros

Otra de las aplicaciones importantes que pueden tener los ácidos orgánicos es la recuperación de metales que forman parte de la estructura de los residuos electrónicos, pues los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) se han convertido en un problema medioambiental con alto impacto. En algunos países los RAEE constituyen el 8% del total de los residuos municipales, y mundialmente representan entre el 1% y el 3% de los residuos totales generados (Priya y Hait, 2018; Işildar y col., 2018).

Adicionalmente, los componentes de este tipo de residuos son los que presentan mayor crecimiento a nivel mundial (Priya y Hait, 2018), con una tasa del 3% al 5% por año, y una producción anual en promedio, de entre 20 y 50 millones de toneladas (Kaya, 2018). Una de las problemáticas es que no existe una correcta disposición de los RAEE (Ghodrat y col., 2017; Diaz y Lister, 2018), lo que genera acumulación de estos materiales a nivel mundial, sin tratar ni aprovechar los diferentes componentes que constituyen a dichos residuos.

Los procesos que actualmente se utilizan para el tratamiento de metales a partir de los RAEE se basan en la recuperación de cobre, estaño, cobalto, plata, oro, paladio y platino (Awasthi y Li, 2017); pero las metodologías convencionales generan sustancias tóxicas a la atmósfera, como los bromuros de llama retardante, además, contaminan las fuentes de agua en procesos subsecuentes de recuperación y extracción de los materiales metálicos (Gurgul y col., 2018; Chauhan y col., 2018). Por lo anterior, se deben desarrollar nuevas propuestas direccionadas a la implementación de la recolección y separación de los residuos; igualmente, deben enfocarse los esfuerzos al desarrollo de metodologías para la extracción de materiales de formas más sustentables, evitando la generación de residuos tóxicos y realizando síntesis de los precursores más amigables

con el medio ambiente. Estas dos importantes aplicaciones en la extracción y remoción de metales permiten visualizar que se deben aumentar los esfuerzos para mejorar la utilización de los ácidos orgánicos en la hidrometalurgia; de este modo, se pueden considerar varias estrategias para su desarrollo:

- Optimizar las condiciones de lixiviación, como la concentración del ácido, la temperatura, el tiempo de contacto y el pH, para maximizar la eficiencia de la disolución de los metales.
- La aplicación de ácidos orgánicos en esta industria, obtenidos a partir de la biomasa como lo son los residuos agroalimentarios.
- Evaluar y seleccionar el ácido orgánico más adecuado según las propiedades químicas y la afinidad por el metal objetivo.
- Recuperar y reciclar los ácidos orgánicos utilizados, lo que ayuda a reducir costos y minimizar los impactos ambientales.

Conclusiones

Los ácidos orgánicos son materiales con potencial para reemplazar a los ácidos inorgánicos en una diversidad de aplicaciones, siendo compuestos menos agresivos con el medio ambiente, además de que pueden obtenerse mediante la biomasa. De manera particular, es posible producirlos a partir de residuos orgánicos, lo que contribuye a dar un segundo uso a materiales actualmente considerados como desecho, aportando de esta manera a la economía circular. Adicionalmente, entre las aplicaciones que se pueden dar a estos componentes se encuentra la recuperación de metales a partir de relaves mineros o de residuos electrónicos, lo cual, a su vez, reduce la necesidad de extraer y procesar nuevos minerales, promoviendo así estrategias de producción más sostenibles. Sin embargo, la producción de ácidos orgánicos a partir de biomasa residual presenta aún desafíos entre los que se encuentra la urgencia por incrementar los rendimientos de conversión, así como la búsqueda de nuevas estrategias para su purificación que reduzcan la necesidad de emplear agentes externos y que requieran una menor cantidad de energía. De esta manera, el desarrollo de tecnologías mejoradas para la conversión de biomasa es imperativa. Asimismo, la co-producción de otros derivados de esta es importante para la sostenibilidad económica de los procesos productivos, junto con la elección de cadenas de suministro factibles.

Agradecimientos

Los autores agradecen profundamente el apoyo de la Universidad de Guanajuato a través de la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado, a través del proyecto 118/2023.

Referencias

- Agreda, V. H., & Zoeller, J.R. (1992). *Acetic acid and its derivatives*. CRC Press.
- Aliano, N. P., & Ellis, M. D. (2009). Oxalic acid: a prospective tool for reducing *Varroa* mite populations in package bees. *Experimental and Applied Acarology*, 48(4), 303-309. <https://doi.org/10.1007/s10493-009-9240-8>
- Araya, N., Krastawski, A., & Cisternas, L. A. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121555>
- Araya, N., Ramírez, Y., Krastawski, A., Cisternas, L. A., & Ramírez Y. (2021). Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 284(02). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112060>
- Astuti, W., Hirajima, T., Sasaki, K., & Okibe, N. (2016). Comparison of effectiveness of citric acid and other acids in leaching of low-grade Indonesian saprolitic ores. *Minerals Engineering*, 85, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.10.001>
- Awasthi, A., & Li, J. (2017). An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 228-239. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.014>
- Banxico. (2022). *Sistema de Información Económica*. <https://www.banxico.org.mx/SielInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=2&idCuadro=CR199&accion=consultarCuadro&locale=es>
- Behera, B. C. (2020). Citric acid from *Aspergillus niger*: a comprehensive overview. *Critical Reviews in Microbiology*, 46(6), 727-749. <https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1828815>
- Blumhoff, M. L., Steiger, M. G., Mattanovich, D., & Sauer, M. (2013). Targeting enzymes to the right compartment: Metabolic engineering for itaconic acid production by *Aspergillus niger*. *Metabolic Engineering*, 19, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2013.05.003>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Brown, S. H., Bashkirova, L., Berka, R., Chandler, T., Doty, T., McCall, K., McCulloch, M., McFarland, S., Thompson, S., Yaver, D., & Berry, A.

- (2013). Metabolic engineering of *Aspergillus oryzae* NRRL 3488 for increased production of L-malic acid. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(19), 8903–8912. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5132-2>
- Caltzontzin-Rabell, V., Romero-Izquierdo, A. G., Moreno-Gómez, A. L., Martínez-Guido, S. I., Gómez-Castro, F. I., & Gutiérrez-Antonio, C. (2022). Raw materials for a biomass-based industry. En C. Gutiérrez-Antonio y F. I. Gómez-Castro (Eds.), *Biofuels and Biorefining Volume 1: Current Technologies for Biomass Conversion* (pp. 25–52). Elsevier.
- Cerón-Hernández, J. A., Romero-Izquierdo, A. G., & Gómez-Castro, F. I. (2024). Análisis comparativo de esquemas de purificación en la obtención de ácido cítrico a partir de biomasa. *Avances en Ingeniería Química*, 3(1), PRO45-PRO50.
- Chauhan, G., Jadhao, P. R., Pant, K. K., & Nigam, K. D. P. (2018). Novel technologies and conventional processes for recovery of metals from waste electrical and electronic equipment: challenges & opportunities – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1288–1304. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.032>
- Chen, G. Q., & Liu, X. (2021). On the future fermentation. *Microbial Biotechnology*, 14(1), 18–21. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13674>
- Curran, K. A., Leavitt, J. M., Karim, A. S., & Alper, H. S. (2013). Metabolic engineering of muconic acid production in *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering*, 15, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.11.003>
- Datta, R., & Henry, M. (2006). Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies – a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 81(7), 1119–1129. <https://doi.org/10.1002/jctb.1486>
- Diaz, L. A., & Lister, T. E. (2018). Economic evaluation of an electrochemical process for the recovery of metals from electronic waste. *Waste Management*, 74, 384–392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.050>
- Dustet Mendoza, J. C., & Izquierdo Kulich, E. (2004). Aplicación de balances de masa y energía al proceso de fermentación en estado sólido de bagazo de caña de azúcar con *Aspergillus niger*. *Bioteología Aplicada*, 21(2), 85–91. <https://biblat.unam.mx/hevila/Bioteologiaaplicada/2004/vol21/no2/5.pdf>
- Espinoza-Vázquez, Y. M., Hernández-Camacho, N. V., & Gómez-Castro, F. I. (2023). Agricultural residues as raw materials for a bio-based industry. En A. Norton, D. Scheff y L.M. Gilbertson (Eds.), *Sustainable Agricultural Practices and Product Design* (pp. 77–99). ACS.

- Flores, P., Hellín, P. & Fenoll, J. (2012). Determination of organic acids in fruits and vegetables by liquid chromatography with tandem-mass spectrometry. *Food Chemistry*, 132(2), 1049-1054. [10.1016/j.foodchem.2011.10.064](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.064)
- Gallardo Martínez, D., Cabrera Díaz, I., Bruguera Amaran, N., & Mardrazo Escalona, F. (2013). Evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad minera en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río. *Avances*, 15(1), 98-116.
- García-Mujica, R., & Benavides-Cedeño, G. (2020). Diseño de una planta a escala industrial para la elaboración de ácido láctico mediante fermentación líquida. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 3(5), 25-34. <https://doi.org/10.46296/ig.v3i5.0013>
- Ghodrat, M., Rhamdhani, M. A., Brooks, G., Rashidi, M., & Samali, B. (2017). A thermodynamic-based life cycle assessment of precious metal recycling out of waste printed circuit board through secondary copper smelting. *Environmental Development*, 24, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.07.001>
- Gómez Castro, F. I., González-Guerra, G. M., Restrepo-Elorza, M.d.P., Montiel-Carrillo, A. P., Álvarez-Rivera, K. Y., Linares-Luna, R. G., & Hernández, S. (2022). Residuos de frutas y vegetales como materias primas para la producción de biocombustibles: potencial en el estado de Guanajuato. *Digital Ciencia@UAQRO*, 15(1), 8-19. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/697>
- Gómez-Castro, F. I., Espinoza-Vázquez, Y. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2022). Modeling and optimization of supply chains: Applications to conventional and intensified biorefineries. En C. Gutiérrez-Antonio y F. I. Gómez-Castro (Eds.), *Biofuels and Biorefining Volume 2: Intensified Processes and Biorefineries* (pp. 361-388). Elsevier.
- González-Guerra, G. M., Garate Ruiz, J. R., Santos Tanamachi, K., Restrepo-Elorza, M.d.P., Gómez-Castro, F. I., Hernández, S., García-García, J. C., & Gamiño-Arroyo, Z. (2024). Synthesis of bioethanol from mixed vegetable wastes: Experimental methodology and characterization. *Engineering Reports*, 6(7). <https://doi.org/10.1002/eng2.12784>
- Grand View Research. (2023). *Organic chemicals*. <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/acetac-acid-market>
- Guadalupe-Alcoser, M. A., Salazar-Llangarí, K. G., Rodríguez-Pinos, A. A., y Brito-Moína, H. L. (2021). Evaluación del proceso de producción de ácido cítrico por fermentación con el uso de *Aspergillus niger*. *Dominio de las Ciencias*, 7(3), 1136-1158. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i3.2045>
- Gurgul, A., Szczepaniak, W., & Zabłocka-Malicka, M. (2018). Incineration and pyrolysis vs. steam gasification of electronic waste.

- Science of The Total Environment*, 624, 1119–1124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.151>
- Gurtler, J. B., & Mai, T. L. (2014). Traditional preservatives – organic acids. En C.A. Batt y M.L. Tortorello (Eds.), *Encyclopedia of Food Microbiology*, 2ª edición (pp. 119–130). Academic Press.
- He, K., Liu, Y., Tian, L., He, W., & Cheng, Q. (2024). Review in anaerobic digestion of food waste. *Heliyon*, 10(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28200>
- ICIS. (s.f.). *Acetic acid, market, prices and analysis*. <http://www.icis.com/chemicals/acetic-acid/?tab=tbc-tab4>
- Ijmker, H., Gramblička, M., Kersten, S. R. A., van der Ham, A. G. J., & Schuur, B. (2014). Acetic acid extraction from aqueous solutions using fatty acids. *Separation and Purification Technology*, 125, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.050>
- Işıldar, A., Rene, E. R., van Hullebusch, E. D., & Lens, P. N. L. (2018). Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 296–312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.031>
- Kaya, M. (2018). Current WEEE recycling solutions. En F. Vegliò y I. Birloaga (Eds.), *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling: Aqueous Recovery Methods* (pp. 33–93). Woodhead Publishing.
- Kuivanen, J., Mojzita, D., Wang, Y., Hilditch, S., Pennttila, M., Richard, P., & Wiebe, M. G. (2012). Engineering filamentous fungi for conversion of D-galacturonic acid to L-galactonic acid. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(24), 8676–8683. <https://doi.org/10.1128/AEM.02171-12>
- Kutney, G. (2007). *Sulfur: History, Technology, Applications & Industry*. ChemTec Publishing.
- Lambros, M., Tran, T., Fei, Q., & Nicolaou, M. (2022). Citric acid: a multifunctional pharmaceutical excipient. *Pharmaceutics*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14050972>
- Lim, J., Fernández, C. A., Lee, S. W., & Hatzell, M. C. (2021). Ammonia and nitric acid demands for fertilizer use in 2050. *ACS Energy Lett.*, 6(10), 3676–3685. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c01614>
- Litsanov, B., Brocker, M., & Bott, M. (2013). Glycerol as a substrate for aerobic succinate production in minimal medium with *Corynebacterium glutamicum*. *Microbial Biotechnology*, 6(2), 189–195. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2012.00347.x>
- Liu, R., Liang, L., Cao, W., Mingke, W., Chen, K., Jiangfeng, M., Jiang, M., Wei, P., & Ouyang, P. (2013). Succinate production by metabolically engineered *Escherichia coli* using sugarcane bagasse hydrolysate as the carbon source. *Bioresource Technology*, 135, 574–577. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.120>

- Liu, Z. (2023). A review on the emerging conversion technology of cellulose, starch, lignin, protein and other organics from vegetable-fruit-based waste. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124804>
- Liu, H., Zhen, F., Wu, D., Wang, Z., Kong, X., Li, Y., Xing, T., & Sun, Y. (2023). Co-production of lactate and volatile fatty acids through repeated-batch fermentation of fruit and vegetable waste: effect of cycle time and replacement ratio. *Bioresource Technology*, 387(3). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129678>
- Martínez-Ramírez, G. G., Gamiño-Arroyo, Z., & Gómez-Castro, F. I. (2023). Análisis comparativo del impacto ambiental en los procesos productivos de agentes lixiviantes. *Avances en Ingeniería Química*, 2(1), PRO7-PRO11.
- Nwaila, G. T., Ghorbani, Y., Zhang, S. E., Frimmel, H. E., Tolmay, L. C. K., Rose, D. H., Nwaila, P. C., & Bourdeau, J. E. (2021). Valorisation of mine waste-Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralised tailings by using Witwatersrand Gold Mines (South Africa) as an example. *Journal of Environmental Management*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113013>
- Nygaard, Y., Toivari, M. H., Penttilä, M., Ruohonen, L., & Wiebe, M.G. (2011). Bioconversion of D-xylose to D-xylonate with *Kluyveromyces lactis*. *Metabolic Engineering*, 13(4), 383-391. <https://doi.org/10.1016/jymben.2011.05.002>
- Ochoa Gómez, J. R. (2003). Síntesis de ácido oxálico por electrorreducción de dióxido de carbono, un proceso medioambientalmente compatible. *Tecnología y Desarrollo*, 1, 3-21.
- Olofsson, J., & Börjesson, P. (2018). Residual biomass as resource – Life-cycle environmental impact of wastes in circular resource systems. *Journal of Cleaner Production*, 196, 997-1006. [10.1016/j.jclepro.2018.06.115](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.115)
- Omanov, B. Sh., Fayzullaev, N. I., Musulmonov, N. Kh., Xatamova, M. S., & Asrorov, D. A. (2020). Optimization of vinyl acetate synthesis process. *International Journal of Control and Automation*, 13(1), 231-238.
- Papagianni, M. (2011). Organic Acids. En M. Moo-Young (Ed.), *Comprehensive Biotechnology*, Vol. 1, 2ª edición (pp. 109-120). Pergamon.
- Precedence Research (2022). *Sulfuric acid market*. <https://www.precedenceresearch.com/sulfuric-acid-market#:~:text=The%20global%20sulfuric%20acid%20market,of%20the%20overall%20acids%20market>.
- Priya, A., & Hait, S. (2018). Toxicity characterization of metals from various waste printed circuit boards. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.01.018>

- Punt, T., Akdogan, G., Bradshaw, S., & van Wyk, P. (2021). Development of a novel solvent extraction process using citric acid for lithium-ion battery recycling. *Minerals Engineering*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107204>
- Rathore, A. S., & Singh, A. (2021). Biomass to fuels and chemicals: A review of enabling processes and technologies. *Journal Of Chemical Technology & Biotechnology*, 97(3), 597-607. <https://doi.org/10.1002/jctb.6960>
- Ripoll, X. P. (2011). *Obtención de exopolisacáridos de interés industrial a partir del lactosuero y permeatos* [Tesis Doctoral, Universidad de Granada]. Repositorio Institucional. <https://digibug.ugr.es/bitstream/10481/2376/1/18101604.pdf>
- Rodríguez-Domínguez, J. C., & Kirsch, G. (2006). Sulfated zirconia, a mild alternative to mineral acids in the synthesis of hydroxycoumarins. *Tetrahedron Letters*, 47(19), 3279-3281. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2006.03.030>
- Roukas, T., & Kotzekidou, P. (2020). Pomegranate peel waste: a new substrate for citric acid production by *Aspergillus niger* in solid-state fermentation under non-aseptic conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 13105-13113. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07928-9>
- Ruiz-Sánchez, A., & Juárez-Tapia, J. C. (2022). Obtención de cobre metálico a partir de la lixiviación de jales mineros originarios del estado de Zacatecas. *PADI Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial 7), 1-9. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial7.9826>
- Sánchez Toro, O. J., Ortiz Buriticá, M. C., & Betancourt Garcés, A. L. (2004). Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación con *Aspergillus* spp. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 6(1), 43-54. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote>
- Santos Tanamachi, K., Alvarado Ahedo, N. C., Gárate Ruiz, J. R., Restrepo Elorza, M.d.P., González Guerra, G. M., Gómez Castro, F. I., & Hernández Castro, S. (2022). Revaloración de residuos de fruta y verdura para la producción de biocombustibles. *Jóvenes en la Ciencia*, 16, 1-14. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3654>
- Scapinello, C., Furlan, A. C., & García de Faria, H. (1999). Influência de diferentes níveis de ácido fumárico sobre o desempenho de coelhos em crescimento. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 28(4), 785-790. <https://doi.org/10.1590/s1516-35981999000400019>
- Soccol, C. R., Vandenberghe, L. P. S., Rodrigues, C., & Pandey, A. (2006). New perspectives for citric acid production and application. *Food Technology and Biotechnology*, 44(2), 141-149. <https://www>

ftb.com.hr/archives/443-new-perspectives-for-citric-acid-production-and-application

- Speight, J. G. (2018). *Reaction Mechanisms in Environmental Engineering: Analysis and Prediction*. Butterworth-Heinemann.
- Sreenath, H. K., Moldes, A. B., Koegel, R. G., & Straub, R. J. (2001). Lactic acid production from agriculture residues. *Biotechnology Letters*, 23(3), 179-184. <https://doi.org/10.1023/a:1005651117831>
- Statista (2023a). *Market volume of sulfuric acid worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030*. <https://www.statista.com/statistics/1245226/sulfuric-acid-market-volume-worldwide/>.
- Statista (2023b). *Market volume of acetic acid worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030*. <https://www.statista.com/statistics/1245203/acetic-acid-market-volume-worldwide/>.
- Statista (2023c). *Market volume of lactic acid worldwide from 2015 to 2022, with a forecast for 2023 to 2030*. <https://www.statista.com/statistics/1310495/lactic-acid-market-volume-worldwide/>.
- Thakker, C., San, K. Y., & Bennett, G. N. (2013). Production of succinic acid by engineered *E. coli* strains using soybean carbohydrates as feedstock under aerobic fermentation conditions. *Biore-source Technology*, 130C(12), 398-405. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.154>
- Theron, M. M., & Lues, J. F. R. (2010a). Microbial organic acid producers. En M.M. Theron y J.R.R. Lues (Eds.) *Organic Acids and Food Preservation* (pp. 97-115). CRC Press.
- Theron, M. M., & Lues, J. F. R. (2010b). Novel applications for organic acids. En M.M. Theron y J.R.R. Lues (Eds.) *Organic Acids and Food Preservation* (pp. 316-324). CRC Press.
- Thomas, C. M., & Süss-Fink, G. (2003). Ligand effects in the rhodium-catalyzed carbonylation of methanol. *Coordination Chemistry Reviews*, 243(1-2), 125-142. [https://doi.org/10.1016/S0010-8545\(03\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0010-8545(03)00051-1)
- Toivari, M. H., Nygard, Y., Kumpula, E.-P., Vehkomäki, M.-L., Bencina, M., Valkonen, M., Maaheimo, H., Blomster Andberg, M., Koivula, A., Ruohonen, L., Penttilä, M., & Wiebe, M. G. (2012). Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for bioconversion of D-xylose to D-xylonate. *Metabolic Engineering*, 14(4), 427-436. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.03.002>
- Toivari, M., Vehkomäki, M.-L., Nygard, Y., Penttilä, M., Ruohonen, L., & Wiebe, M. G. (2013). Low pH D-xylonate production with *Pichia kudriavzevii*. *Biore-source Technology*, 133C, 555-562. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.157>
- Vandenbergh, L. P. S., Soccol, C. R., Pandey, A., & Lebeault II, J. M. (1999). Microbial production of citric acid. *Brazilian Archives of*

- Biology and Technology*, 42(3), 263-276. <https://doi.org/10.1590/s1516-89131999000300001>
- Vidra, A., & Németh, Á. (2018). Bio-produced acetic acid: a review. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(3), 245-256. <https://doi.org/10.3311/PPCh.11004>
- Villagómez-Ibarra, J., Nava-Hernández, C. V., Flores-Juárez, E. I., Martínez-Cortés, O. I., González-Guerra, G. M., & Gómez-Castro, F. I. (2023). Co-producción de biocombustibles y ácidos orgánicos a partir de residuos de frutas y vegetales. *Jóvenes en la Ciencia*, 21, 1-10. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4007>
- Wang, X., Chen, J., Yan, X., Wang, X., Zhang, J., Huang, J., & Zhao, J. (2015). Heavy metal chemical extraction from industrial and municipal mixed sludge by ultrasound-assisted citric acid. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 27, 368-372. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.01.016>
- Weissermel, K., & Arpe, H.-J. (2003). *Industrial Organic Chemistry*, Wiley-VCH.
- Xiao, J., Li, J., & Xu, Z. (2020). Challenges to future development of spent lithium ion batteries recovery from environmental and technological perspectives. *Environmental Science & Technology*, 54(1), 9-25. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03725>
- Yan, W., Guan, Q., & Jin, F. (2023). Catalytic conversion of cellulosic biomass to harvest high-valued organic acids. *iScience*, 26(10). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107933>
- Zhang, B., Skory, C. D., & Yang, S. T. (2012). Metabolic engineering of *Rhizopus oryzae*: effects of overexpressing pyc and pepc genes on fumaric acid biosynthesis from glucose. *Metabolic Engineering*, 14(5), 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2012.07.001>