





Química verde: Una revisión de sus principios y aplicaciones industriales Green chemistry: A review of its principles and industrial applications

F. Piña-Aguilar ^a, E. Contreras-López ^a, J. G. Pérez-Flores ^{a,b,*}, L. García-Curiel ^b,

V. Salazar-Pereda ^a, L. G. González-Olivares ^a

^a Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

^b Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42060, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

Resumen

El deterioro ambiental actual requiere soluciones sostenibles, tales como la implementación de los principios de la química verde en la industria, que tiene como objetivo diseñar productos y procesos químicos que reduzcan la generación de sustancias peligrosas y que optimicen el uso de recursos. Esta contribución se enfocó en examinar los fundamentos de la química verde y sus aplicaciones en diversas industrias, recurriendo a estudios de caso y ejemplos contemporáneos para ilustrar cómo su puesta en práctica disminuye el impacto ambiental, optimiza la eficiencia de los procesos y promueve la sostenibilidad a escala mundial. Se enfatizó la influencia de la química verde en campos como la fabricación de compuestos químicos, la generación de biocombustibles y la formulación de medicamentos, fomentando así una industria de mayor sostenibilidad. Se llegó a la conclusión de que la incorporación de la química verde es determinante para alcanzar un equilibrio entre el progreso industrial y la responsabilidad ambiental, y su implementación continua es esencial para abordar los retos ambientales futuros y progresar hacia un desarrollo más sostenible.

Palabras Clave: Química verde, economía circular, diseño de materiales impulsado por IA, síntesis sostenible de nanoestructuras, polímeros biodegradables.

Abstract

The current environmental deterioration requires sustainable solutions, such as the implementation of the principles of green chemistry in the industry, which aim to design chemical products and processes that reduce the generation of hazardous substances and optimize resource use. This paper examined the foundations of green chemistry and its applications across various industries. It draws on case studies and contemporary examples to illustrate how its implementation decreases environmental impact, enhances process efficiency, and promotes global sustainability. The influence of green chemistry was highlighted in fields such as chemical manufacturing, biofuel production, and drug formulation, fostering a more sustainable industry. It was concluded that integrating green chemistry is crucial for achieving a balance between industrial progress and environmental responsibility, and its continued implementation is essential to address future environmental challenges and move toward more sustainable development.

Keywords: Green Chemistry, Circular Economy, AI-Driven Material Design, Sustainable Nanostructure Synthesis, Biodegradable Polymers.

1. Introducción

La química verde (QV) se define como el diseño de productos y procesos que reducen o erradican la producción

*Autor para la correspondencia: jesus_perez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: fer_nando_pa@hotmail.com (Fernando Piña-Aguilar), elizac@uaeh.edu.mx (Elizabeth Contreras-López), jesus_perez@uaeh.edu.mx (Jesús Guadalupe Pérez-Flores), laura.garcia@uaeh.edu.mx (Laura García-Curiel), salazar@uaeh.edu.mx (Verónica Salazar-Pereda), lgonzales@uaeh.edu.mx (Luis Guillermo González-Olivares)

Historial del manuscrito: recibido el 24/09/2024, última versión-revisada recibida el 05/03/2025, aceptado el 18/03/2025, en línea (postprint) desde el 16/05/2025, publicado el 05/07/2025. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v13i25.13805>



de sustancias peligrosas, fomentando prácticas de sostenibilidad (P. Anastas & Eghbali, 2010; Martínez et al., 2022). De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la QV se define como la aplicación de la química para prevenir la contaminación y en la concepción de productos y procesos que sean beneficiosos para el medio ambiente (Chen et al., 2020; Pájaro Castro & Olivero Verbel, 2011). Esta disciplina introduce una filosofía innovadora, implementando estándares elevados para la investigación y producción química, con el objetivo de maximizar los beneficios y minimizar los efectos perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente (Ardila-Fierro & Hernández, 2021; Sierra et al., 2015).

Diversos sectores, incluyendo la industria química, las entidades gubernamentales, la academia y las organizaciones no gubernamentales, han implementado estrategias para afrontar los retos inherentes a la interfaz entre la química y la sostenibilidad. Estas iniciativas abarcan la Iniciativa Global para el Cuidado Responsable, promovida por el Consejo Internacional de Asociaciones Químicas, las conferencias sobre química sustentable organizadas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), además de legislaciones y acuerdos internacionales que regulan los productos y procedimientos químicos (Doria Serrano, 2009).

La QV surgió a finales del siglo XX en respuesta a la creciente contaminación ambiental y se consolidó con la publicación de los “Doce Principios de la Química Verde” por Paul Anastas y John Warner en 1988. Estos principios proporcionaron un marco de referencia para reducir la repercusión ambiental en la producción química, fomentando la utilización de recursos renovables, la minimización de residuos y para prevenir la generación de sustancias tóxicas, alineando de esta manera la química con los objetivos de sostenibilidad (P. Anastas & Eghbali, 2010; Sjöström, 2006). La Figura 1 ilustra visualmente estos principios, estableciendo las pautas para la prevención, control y administración de sustancias y procesos, lo que resulta beneficioso para el medio ambiente, los profesionales y la industria en su conjunto (Grieger et al., 2022).

La Ley de Prevención de la Contaminación de 1990 en EE.UU. marcó un punto de inflexión, fomentando la reducción de la contaminación en su origen. Esto impulsó el desarrollo de la QV, dando lugar a iniciativas como el “Desafío Presidencial de Química Verde”, que premia tecnologías sostenibles (Cosío et al., 2020).

Las raíces de la química sostenible se remontan aún más atrás, a químicos como Giacomo Ciamician, que durante el siglo XX promovió la utilización de la luz solar en los procesos químicos, anticipando prácticas de mayor sostenibilidad (P. T. Anastas, 2018; Poliakoff & George, 2020). Con el tiempo, la QV ha evolucionado para abarcar la síntesis química, la responsabilidad social y ética (Krasnodębski, 2023). Además, al promover la utilización de recursos renovables y procesos eficientes, la QV se alinea con la economía circular (EC), contribuyendo a la reducción de la huella de carbono (Ncube et al., 2023; Sheldon & Norton, 2020).

Avances como la biocatálisis y la química analítica verde han demostrado la aplicabilidad de sus principios en diversas industrias (Chook et al., 2023; Sheldon & Woodley, 2018). La biocatálisis, por ejemplo, emplea enzimas o

microorganismos para transformar la biomasa en compuestos químicos de alto valor, permitiendo aprovechar recursos renovables en lugar de derivados del petróleo y también contribuye a la sostenibilidad al reducir el impacto ambiental de los procesos químicos convencionales y promover un uso más eficiente de la materia prima (Bernini et al., 2024; Sheldon, 2020). También, su aplicación en industrias como la textil y la plástica ha demostrado cómo la química verde mitiga la contaminación y optimiza el diseño de productos, asegurando su degradabilidad al final del ciclo de vida (Linder, 2017; Sheldon & Norton, 2020).

Además de sus ventajas ambientales directas, la química verde se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), fomentando una industria química responsable y sostenible que armonice la viabilidad económica con la responsabilidad social y ambiental (Barna et al., 2023; Obeidat et al., 2023).

De acuerdo con todo lo anterior, el objetivo de esta contribución fue revisar los 12 principios de la QV, así como sus aplicaciones en diversos sectores de la industria, a través de la discusión de ejemplos actuales para ilustrar la manera en la que la implementación de estos principios reduce el impacto ambiental, mejora la eficiencia de los procesos químicos y contribuye a la sostenibilidad. Además, se exploró el rol de la inteligencia artificial (IA) en la promoción y la optimización de la QV, destacando su capacidad para innovar y transformar prácticas industriales hacia un futuro más sostenible, con la finalidad de brindar una visión general para industriales, académicos, estudiantes y cualquier persona interesada en el tema.



Figura 1. Doce principios de la química verde.

2. Los 12 principios de la química verde

Los principios de la QV se establecieron con el objetivo de prevenir la contaminación y disminuir la utilización de compuestos químicos contaminantes, mediante la adopción de sustancias más seguras y la implementación de estrategias eficaces de prevención y gestión de residuos. Estos principios constituyen la base para las prácticas de la QV y

son desglosados en los párrafos subsiguientes (Chen et al., 2020; Flank et al., 2008; Ribeiro & Machado, 2011; Stubbs et al., 2022; Tabanelli et al., 2021; Tobiszewski et al., 2015).

2.1. *Prevención de generación de residuos*

El principio establece que es preferible prevenir la generación de residuos en lugar de gestionarlos una vez creados. Se busca que, a través de nuevas tecnologías o procedimientos, se cumpla este enfoque. En caso de no ser factible, se promueve la minimización, reutilización y reciclaje de los materiales, o, finalmente, la disposición segura de los residuos.

Por ejemplo, investigaciones han mostrado que las empresas farmacéuticas han implementado prácticas de QV para minimizar los residuos en sus procesos de síntesis, lo que reduce costos, impacto ambiental y mejora la eficiencia en el uso de recursos (DeVito et al., 2015). Además, la implementación de principios de la QV en laboratorios tiene como objetivo reducir los residuos producidos durante los experimentos, subrayando la relevancia de la prevención de residuos como un componente de la química (Mulyani et al., 2023).

En las reacciones bifásicas, la incorporación de una tercera fase líquida bajo condiciones adecuadas tiene el potencial de optimizar la rapidez de la reacción y la selectividad del producto resultante. Por ejemplo, en la eterificación de 2'-hidroxiacetofenona con 1-bromopentano, la catálisis de transferencia de fase (CTF) de tipo líquido-líquido (L-L) fue modificada a una variante líquido-líquido-líquido (L-L-L). Esta modificación suscitó un interés técnico y comercial al disminuir la producción de desechos y alinearse con los principios de la QV. La CTF líquida-líquida convencional implicaba la pérdida del catalizador, mientras que con la CTF L-L-L se logró una mejora en la rapidez de la reacción, logrando una conversión del 100% del reactivo limitante y una selectividad total hacia el producto deseado. Esta metodología abordó desafíos relacionados con la separación, disminuyó el tiempo de reacción y posibilitó el reciclaje de la fase rica en catalizador más de siete veces sin comprometer su actividad. Adicionalmente, se registró una disminución en la energía de activación con la CTF L-L-L en comparación con la CTF L-L, debido a la transición del sitio de reacción hacia la tercera fase (Yadav & Desai, 2005). Este método minimizó la pérdida de catalizador y permitió solucionar problemas de separación, lo que resultó en una reducción de los residuos producidos. Este enfoque se alinea con el principio de prevenir la generación de residuos en lugar de simplemente gestionarlos.

2.2. *Economía atómica*

Los métodos de síntesis deben diseñarse para maximizar la incorporación de todos los materiales utilizados en el proceso dentro del producto final. Para cuantificar tanto el desempeño del proceso como el volumen de residuos producidos, es imprescindible cuantificar los resultados a través de una métrica que correlacione el peso molecular del producto deseado con la suma de los pesos moleculares de todas las sustancias producidas. Esto ofrece una valoración más exacta de la eficiencia del proceso, lo que posibilita la

optimización de la producción y la minimización de los residuos.

En una investigación, se sintetizó 3-hidroxi-oxindol a través de una reacción de descarbonilación de aldol. Se estimó una economía atómica del 85.86%, lo que sugiere que una proporción considerable de los materiales se integró en el producto final, lo que disminuyó la producción de residuos. Esta metodología optimizó la eficiencia del proceso y facilitó la minimización del impacto ambiental vinculado a la generación de residuos (Dwivedi et al., 2019).

En una investigación adicional, se llevó a cabo una síntesis sin disolventes de isoxazoles mediante el uso de nano-titanía sólida, logrando una economía atómica del 93.23%. Esto evidenció una elevada incorporación de reactivos en el producto final y una reducción de los residuos producidos, ilustrando cómo se puede diseñar un proceso químico para optimizar el uso de materiales y minimizar la generación de residuos. Este hecho ilustra cómo se puede diseñar un proceso químico para optimizar el uso de materiales y minimizar la generación de residuos (Dwivedi et al., 2018).

En otro estudio, se resaltó la relevancia de la economía atómica en el campo de la química medicinal. A pesar de que su análisis se enfoca principalmente en las tendencias de la química medicinal y la aplicación de la QV, se destaca que la transición hacia prácticas de mayor sostenibilidad ha propiciado un incremento en la utilización de reacciones que optimizan la incorporación de átomos en el producto final, un aspecto primordial para minimizar la generación de residuos durante la síntesis de compuestos farmacéuticos. Esta modificación en la práctica química es ventajosa desde una perspectiva medioambiental; no obstante, también puede derivar en procedimientos más económicos y eficientes (Schneider et al., 2016).

2.3. *Realizar síntesis química menos peligrosa*

Siempre que sea posible, se deben emplear sustancias menos peligrosas en lugar de aquellas tóxicas o dañinas. Esto implica diseñar procesos que minimicen tanto la toxicidad como el impacto ambiental. Tanto los reactivos empleados como las sustancias resultantes de la síntesis deben ser seguros, reduciendo riesgos como la explosividad o inflamabilidad y minimizando el impacto en el medio ambiente y la salud.

Por ejemplo, en una investigación, se presentó un protocolo más ecológico para la síntesis de benzopirano utilizando ácidos exudados de hojas de garbanzo. Este enfoque utilizó recursos naturales en lugar de disolventes orgánicos peligrosos o catalizadores metálicos, lo que permitió reducir la toxicidad del proceso y el impacto ambiental (Mali et al., 2018). La aplicación de exudados naturales redujo la utilización de sustancias perjudiciales y fomentó la sostenibilidad mediante la utilización de materias primas renovables.

Otro caso ilustrativo fue un estudio que se centró en la transformación sostenible de la síntesis de péptidos en fase sólida. En esa investigación, se adoptaron estrategias que disminuyeron la utilización de sustancias peligrosas y se buscó eliminar la generación de desechos tóxicos durante el proceso de síntesis, en consonancia con los principios de la QV. Este enfoque permitió optimizar la seguridad en los laboratorios y reducir al mínimo el riesgo vinculado a la

manipulación de compuestos químicos peligrosos (Jad et al., 2019).

En una investigación adicional, se enfatizó la necesidad de desarrollar métodos de síntesis alternativos que mitiguen el impacto ambiental de los reactivos orgánicos y disolventes en la salud humana y el medio ambiente. Se subrayó la importancia de implementar metodologías de QV que utilicen sustancias menos peligrosas en la producción de derivados de oxindol, contribuyendo de este modo a la disminución de la toxicidad en los procesos químicos (Kumarasinghe et al., 2023).

2.4. Diseñar productos químicos seguros

Los productos químicos deben ser diseñados para mantener su eficacia funcional mientras se minimiza su toxicidad. La evaluación de la seguridad de un compuesto requiere considerar tanto sus riesgos intrínsecos como el nivel de riesgo vinculado a la exposición; es decir, tener en cuenta su composición química y sus potenciales efectos tóxicos.

Por ejemplo, un estudio se enfocó en la valoración de los riesgos asociados con los plaguicidas agrícolas en comunidades rurales de Sonora, México. Se subrayó la importancia de vincular las rutas de exposición a los plaguicidas con los hallazgos de investigaciones de biomonitorio epidemiológico, lo cual facilitó una comprensión más profunda de los efectos perjudiciales de estos productos en la salud de las poblaciones expuestas. Se proporcionaron evidencias de la existencia de residuos de plaguicidas en dichas comunidades, lo que enfatizó la relevancia de diseñar productos químicos que sean menos tóxicos y más seguros para su aplicación en la agricultura (Silveira-Gramont et al., 2018).

En el estudio de la toxicidad de los productos de limpieza, se realizó un análisis de las consultas registradas en un Centro de Información Toxicológica sobre exposiciones a productos de limpieza y cosméticos en población infantil. Los resultados evidenciaron que sustancias como el cloro doméstico y otros agentes limpiadores contribuyeron significativamente a la alta prevalencia de exposiciones tóxicas en este grupo. Esto resaltó la necesidad de diseñar productos de limpieza que sean eficaces pero que a la vez reduzcan el riesgo de toxicidad, particularmente en poblaciones vulnerables como la infantil (González et al., 2019).

Además, en otra investigación sobre la percepción del riesgo de toxicidad por exposición a plaguicidas domésticos en hogares con niños, se resaltó la necesidad de diseñar productos químicos que sean seguros para el uso en el hogar. Se identificaron las prácticas y percepciones de los padres respecto a los riesgos asociados con los plaguicidas, lo cual sugiere que una educación más profunda y la utilización de productos más seguros podrían disminuir la exposición y el riesgo de toxicidad en la población infantil (Kandel Gambarte et al., 2022).

Finalmente, en una investigación posterior sobre bioplaguicidas, se presentó una opción más segura en comparación con los plaguicidas sintéticos, subrayando cómo estos productos pueden ser empleados eficazmente en la agricultura sin los riesgos inherentes a los compuestos químicos tradicionales. Este enfoque promovió la seguridad

en el uso de productos químicos y apoyó prácticas agrícolas sostenibles (Nava-Pérez et al., 2012).

2.5. Disolventes y auxiliares más seguros

Siempre que sea posible, es preferible evitar el uso de disolventes, y cuando su uso sea necesario, deben ser inocuos. Los productos químicos deben diseñarse con mínima toxicidad. Dado que los disolventes y auxiliares, como los reactivos de separación, son de uso común en procesos químicos, resulta primordial evaluar su impacto ambiental. Se promueve la minimización o sustitución de estos compuestos con el objetivo de minimizar los residuos producidos.

Por ejemplo, en un estudio se enfocaron en la erradicación de recubrimientos de acrílico mediante el uso de disolventes más seguros para la remanufactura de productos electrónicos. Se realizó una comparativa de la eficacia y seguridad de diversos disolventes, revelándose que los disolventes optimizados exhibían puntuaciones de seguridad superiores en comparación con disolventes convencionales como el diclorometano (DCM) (Lu et al., 2021).

En otra investigación se presentó un método de síntesis verde para cocrisales de ibuprofeno y nicotinamida, enfatizando la necesidad de utilizar disolventes más seguros, como el agua, en lugar de disolventes orgánicos tradicionales (DeVito, 2016).

Finalmente, se ha discutido la importancia de emplear disolventes alternativos en la cromatografía líquida preparativa (Shen et al., 2015). Además, se ha investigado la “química analítica verde”, cuyo objetivo es sustituir métodos analíticos contaminantes por opciones más sostenibles, evidenciando un creciente interés en la comunidad analítica por la sostenibilidad (Yabré et al., 2018).

2.6. Diseñar para la eficiencia energética

Los procesos deben diseñarse para operar a temperatura y presión estándar siempre que sea factible, con el objetivo de minimizar los requerimientos energéticos. Es primordial evaluar el impacto ambiental y económico de la energía empleada en los procesos químicos, con el objetivo de maximizar su reducción a través de métodos de síntesis que se lleven a cabo bajo condiciones estándar de temperatura y presión.

En un estudio se abordó la formulación de compuestos químicos más seguros y eficaces. Se subrayó la importancia de perfeccionar los procesos químicos para su funcionamiento bajo condiciones de temperatura y presiones ambientales, lo cual facilitaría la disminución del consumo energético y la minimización del impacto ambiental derivado de los procesos químicos. Se estableció un esquema para comprender cómo la concepción de productos químicos podía alinearse con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética (Morales et al., 2020).

En una investigación adicional, el riesgo químico fue evaluado a través de un índice de seguridad inherente. Se permitió identificar procesos que podían ser optimizados para operar de manera más eficiente, minimizando así el uso de energía y reduciendo el riesgo asociado a la manipulación de sustancias químicas. El estudio propone que la valoración

de la seguridad inherente podría constituir un instrumento valioso para optimizar la eficiencia energética en los procesos químicos (Sotomayor Pineda et al., 2021).

Adicionalmente, se enfatizó la relevancia de emplear compuestos químicos con impacto ambiental reducido y aplicables bajo condiciones que reduzcan el consumo energético. Se evidenció la forma en que la elección apropiada de productos químicos podía contribuir a la sostenibilidad y eficiencia en el sector agrícola (Roque et al., 2023). Además, se enfatizó la relevancia de emplear técnicas que disminuyan el uso de productos químicos convencionales, lo cual podría resultar en una reducción de la demanda energética en su fabricación y aplicación. Este aspecto adquiere particular relevancia en el marco de la agricultura sostenible, en la que se persigue la minimización del uso de insumos químicos (Castañedo Hernández et al., 2022).

Finalmente, se evidenció la eficacia de los bioplaguicidas en el control de plagas, promoviendo prácticas agrícolas que demandaban una menor cantidad de energía en comparación con los métodos convencionales que dependían de pesticidas químicos (Nava-Pérez et al., 2012).

2.7. Utilizar materias primas renovables

Se deben utilizar materias primas renovables en lugar de no renovables siempre que sea viable tanto económica como técnicamente.

En ese sentido, se llevó a cabo una investigación que exploró la fabricación de biocompuestos porosos derivados de corcho y poliuretano modificado con polioles derivados de aceite de cocina usado. Se enfatizó cómo la aplicación de materias primas renovables, tales como el corcho y los aceites de origen vegetal, podía favorecer la generación de materiales sostenibles y eficaces, disminuyendo la dependencia de los recursos petroquímicos (Kurańska et al., 2023).

En una investigación adicional, se examinó el impacto del pretratamiento de biomasa maderera en la producción de etanol, subrayando la transformación de materias primas lignocelulósicas, tales como desechos agrícolas y cultivos destinados a la generación de etanol, lo que presentaba ventajas económicas y ambientales (Gómez et al., 2013). También ya ha sido reportada la extracción de arabinosilanos (AX) a partir de subproductos procedentes de los procesos agroindustriales utilizando la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos (Pérez-Flores et al., 2019; Pérez-Flores et al., 2022; Rodríguez-Viveros et al., 2023). Los AX, polisacáridos no amiláceos, presentan un gran potencial en las industrias alimentaria, biomédica y cosmética. Además, sus aplicaciones en el desarrollo de sistemas de administración de fármacos de liberación controlada han sido documentadas (García-Curiel et al., 2024; Pérez-Flores et al., 2017, 2022, 2024). Este enfoque concuerda con el principio que establece utilizar materias primas renovables, dado que fomenta la utilización de subproductos vegetales, disminuyendo la dependencia de recursos no renovables y promoviendo una producción más sostenible y económicamente viable.

Dentro del marco de la biorrefinería, se propuso un enfoque integrado para la generación de biocombustibles a partir de recursos agrícolas renovables. Se subrayó la

importancia de convertir materiales renovables en productos de aplicación comercial, lo cual disminuye la dependencia de los combustibles fósiles y fomenta un crecimiento sostenible (Pellegrini Pessoa et al., 2020). Adicionalmente, se llevó a cabo una investigación sobre la generación de biodiésel a partir de desechos grasos animales, subrayando el potencial de emplear materias primas renovables y subproductos de la industria alimentaria, ofreciendo una opción económicamente viable frente a los combustibles fósiles (Rivera et al., 2009). También se llevó a cabo un examen de la conversión de biomasa en biocombustibles de segunda generación, subrayando la relevancia de emplear residuos lignocelulósicos abundantes y renovables en la generación de energía (Faba et al., 2014). Finalmente, se discutió el papel de los precios de las materias primas en la generación de tecnologías de energía renovable, postulando que la transición hacia la utilización de materias primas renovables es primordial para el desarrollo sostenible y la disminución de la dependencia de recursos no renovables (Nabi et al., 2020).

2.8. Minimización de derivados

Se deben minimizar la generación de los derivados, ya que complican el proceso y generan más residuos. Las moléculas tienen la capacidad de reaccionar mediante diversas rutas, lo que comúnmente implica la utilización de grupos protectores para inhibir reacciones indeseables. No obstante, esto conlleva un incremento en los residuos contaminantes. En consecuencia, el diseño de la síntesis debería orientarse hacia minimizar el uso de estos grupos, evitando procedimientos adicionales y minimizando la generación de residuos.

Por ejemplo, en una investigación se introdujo un enfoque multidisciplinario para la optimización de la preparación de TiO₂/carbón activo, subrayando la relevancia de diseñar procedimientos que minimicen la necesidad de derivados y etapas adicionales, fomentando así una síntesis más eficaz (Peñas-Garzón et al., 2023).

En un estudio adicional, se examinó la síntesis hidrotérmica de puntos cuánticos de carbono, subrayando que este procedimiento posibilita condiciones reguladas y tiempos de reacción reducidos, lo que contribuye a la minimización de los residuos producidos (Zamora-Valencia et al., 2023).

2.9. Utilizar catalizadores

Los catalizadores son preferidos por encima de los reactivos estequiométricos debido a su uso en cantidades reducidas y su capacidad para ser recuperados y reutilizados. Adicionalmente a la aceleración de las reacciones, la catálisis potencia la selectividad y minimiza los pasos del proceso, lo que lo optimiza y reduce la producción de residuos y productos derivados.

En una investigación se analizaron los catalizadores de tres vías (CTV) y sus ventajas ambientales, detallando cómo estos catalizadores permitieron la oxidación de monóxido de carbono (CO) y de hidrocarburos (HC), lo que contribuyó a la reducción de emisiones contaminantes (Navarro-Espinoza et al., 2022).

Se ha documentado asimismo la creación de un micro-reactor de lecho empacado destinado a la síntesis de acetato de metilo, empleando resina ácida de intercambio iónico como catalizador, evidenciando la optimización de las condiciones de reacción, incrementando la conversión del metanol y minimizando los reactivos requeridos (Pineda et al., 2015).

En un estudio posterior, se examinó la producción de biocombustibles desde el enfoque de la catálisis, subrayando la relevancia de los catalizadores para optimizar la eficiencia en la generación de biodiésel y bioetanol, disminuyendo la generación de desechos y fomentando la sostenibilidad energética (Cuevas-García & Bravo Nava, 2021).

También se realizó una evaluación de riesgos químicos en la industria gráfica, destacando la implementación de catalizadores para optimizar la eficiencia de los procesos de impresión y disminuir la exposición a sustancias peligrosas, contribuyendo así a un ambiente laboral más seguro (Villalobos-González et al., 2021).

Finalmente, en una investigación se enfatizó la aplicación de catalizadores en la fabricación de microperlas de quitosano modificadas con tiourea, lo que posibilita la transformación de desechos en productos valiosos, contribuyendo a la sostenibilidad y a la minimización de residuos (Meramo-Hurtado et al., 2020).

2.10. *Diseñar a favor de la degradación*

Los productos químicos deben diseñarse para degradarse en sustancias no tóxicas y no persistir en el medio ambiente al final de su vida útil. La biodegradabilidad se presenta como un indicador para garantizar que, una vez cumplida su función, se transformen en compuestos inertes o fácilmente descompuestos por procesos biológicos.

Por ejemplo, en una investigación se estudió la actividad inhibitoria de extractos alcohólicos de hongos comestibles contra *Rhizoctonia solani*, resaltando el potencial de los extractos naturales como biopesticidas, que pueden degradarse naturalmente sin dejar residuos tóxicos en el ambiente (Narváez-Montaño et al., 2023). No obstante, es importante destacar que la aplicación de fungicidas, incluso aquellos de origen natural, puede implicar riesgos de resistencia en los fitopatógenos, aspecto que debe ser contemplado en el marco de su implementación.

En otro ejemplo, se investigó el uso de resina de pinos cubanos para el control de enfermedades tropicales transmitidas por moluscos, destacando que los compuestos naturales derivados de plantas son biodegradables y generan menor toxicidad ambiental (Arteaga-Crespo et al., 2010). La investigación muestra que el diseño de productos basados en materias primas renovables y biodegradables puede contribuir a la sostenibilidad en el control de plagas.

En otra investigación se abordaron técnicas de eliminación de metales en aguas destinadas al consumo humano, subrayando la importancia de emplear agentes de eliminación biodegradables y no tóxicos para reducir la contaminación y salvaguardar los recursos hídricos (Zúñiga-Martínez et al., 2022). La investigación postula que la elección apropiada de productos químicos es primordial para el tratamiento de aguas residuales y la salvaguarda de los recursos hídricos.

En una investigación adicional, se examinó la aplicación de aceites esenciales para el control de enfermedades

agrícolas, destacando que estos biopesticidas naturales son biodegradables y presentan un menor impacto ambiental en comparación con los pesticidas sintéticos (Santiago-Santiago et al., 2024). Sin embargo, su alta volatilidad y sensibilidad a factores como la luz, la temperatura y el oxígeno pueden limitar su estabilidad y eficacia en aplicaciones agrícolas. Por ello, el desarrollo de estrategias como la encapsulación ha sido explorado para mejorar su estabilidad y liberación controlada, favoreciendo su uso en sistemas de producción sostenible.

Finalmente, se estableció una comparación entre diversas especies de *Jatropha* utilizadas en la producción de biocombustibles, lo que sugiere que cultivos como *Jatropha curcas* pueden contribuir a la generación de biocombustibles biodegradables que se descomponen en compuestos no tóxicos (Guevara-Fefer et al., 2016).

2.11. *Monitorear los procesos químicos en tiempo real para evitar la contaminación*

Es necesario desarrollar métodos analíticos que permitan el monitoreo en tiempo real de la producción para prevenir la formación de sustancias peligrosas. Se debe fomentar la implementación de estas técnicas para detectar y corregir errores en el proceso que podrían aumentar la contaminación. Además, es necesario establecer sistemas de control y monitoreo continuos para evitar la generación de compuestos peligrosos durante la producción.

Por ejemplo, en una investigación se determinó y analizó estadísticamente la composición de gases producidos en un piloto de recobro mejorado, destacando la importancia del monitoreo continuo de variables como la composición química de los fluidos para la toma de decisiones operativas (Díaz Molina et al., 2019). La implementación de esta metodología de monitoreo en tiempo real resultó efectiva para prevenir la generación de sustancias peligrosas.

En otro trabajo se validó un método analítico para la detección de benzofenonas en muestras de suelo mediante extracción líquida presurizada y cromatografía líquida acoplada con espectrometría de masas, subrayando la necesidad de métodos eficientes para monitorear contaminantes emergentes en el ambiente (Benítez-Villalba et al., 2018). La adopción de métodos de seguimiento en tiempo real es necesaria para la identificación y rectificación de errores en los procesos que podrían incrementar la contaminación.

Se ha documentado asimismo el diseño de pilares geotécnicos en minas subterráneas, subrayando la relevancia del control y supervisión constante para asegurar la seguridad y prevenir la contaminación ambiental en el sector minero (Castro-Caicedo et al., 2019). Esta modalidad de supervisión puede facilitar la detección de problemas antes de que se transformen en amenazas ambientales.

Asimismo, en otro trabajo se aplicaron métodos analíticos en dispositivos portátiles para el análisis de fluidos corporales, demostrando la relevancia del monitoreo en tiempo real, también aplicable a la prevención de la contaminación en la química industrial (Nien & Li, 2023). La capacidad para llevar a cabo análisis en tiempo real posibilita una pronta reacción ante la identificación de sustancias tóxicas.

Finalmente, se ha implementado la detección de metales en agua a través de dispositivos móviles inteligentes,

subrayando la capacidad de los dispositivos portátiles para el seguimiento en tiempo real de contaminantes, promoviendo así la prevención de la contaminación en cuerpos de agua (Hernández Cruz & Santacruz Ortega, 2023). La instauración de tecnologías de monitoreo ambiental accesibles puede simplificar la detección de problemas de contaminación y promover la toma de decisiones fundamentadas.

2.12. *Química inherentemente benigna para la prevención de accidentes*

El diseño de la química se debería orientar hacia la minimización del riesgo de accidentes, empleando sustancias y procesos intrínsecamente seguros. Los procedimientos y materiales escogidos deben reducir la probabilidad de incidentes como emisiones, explosiones e incendios, y restringir los daños en caso de que se produzcan.

En una investigación se discutió la integración de la educación sobre seguridad química y QV en los laboratorios de enseñanza. Se enfatizó la importancia de diseñar experimentos que minimicen el uso y la generación de sustancias peligrosas, promoviendo una cultura de seguridad en el laboratorio (Goode et al., 2021). La implementación de los principios de la QV en el ámbito educativo puede contribuir a la capacitación de los estudiantes para operar de manera más segura en entornos químicos.

Otro caso ilustrativo fue un estudio que se centró en la integración de la QV y de la seguridad en la cultura del laboratorio. Se resaltó la manera en que la implementación de principios de la QV contribuyó a la identificación y evaluación de riesgos vinculados a las reacciones químicas, fomentando la eliminación o sustitución de sustancias peligrosas (O'Neil et al., 2021). La investigación sugiere que la educación en QV puede contribuir a la prevención de accidentes en el entorno de laboratorio.

Adicionalmente, en otra investigación se examinó el estado presente y los retos futuros de la QV, subrayando la manera en que la concepción de productos y procesos químicos puede salvaguardar la salud humana y el medio ambiente (P. T. Anastas & Kirchhoff, 2002). Este enfoque resalta la relevancia de desarrollar métodos y materiales que posean una seguridad intrínseca, lo cual tiene el potencial de disminuir la probabilidad de que se presenten accidentes y así minimizar el impacto ambiental.

En una investigación adicional, se evaluaron indicadores de sostenibilidad para la fabricación de biodiésel, subrayando la relevancia de reducir la producción de sustancias peligrosas y prevenir amenazas a la salud y al medio ambiente (Martínez-Guerra & Gude, 2017). La adopción de prácticas sostenibles en la generación de biocombustibles tiene el potencial de contribuir a la seguridad y a la disminución de incidentes.

Adicionalmente, se llevaron a cabo investigaciones sobre recubrimientos de poliéster y epóxido en entornos de alta agresividad, evidenciando que dichos recubrimientos tienen la capacidad de resguardar superficies y reducir la exposición a compuestos químicos peligrosos en entornos industriales (Stojanović et al., 2018). La investigación sugiere que el diseño de materiales seguros puede contribuir a la prevención de incidentes laborales y salvaguardar la salud de los empleados.

Finalmente, en otra investigación se implementó un cribado de alta capacidad para identificar sustitutos funcionales de productos químicos, utilizando modelos de clasificación basados en la estructura química. Lo anterior permite evaluar grandes bibliotecas de compuestos y predecir su funcionalidad en aplicaciones industriales y de consumo, facilitando la selección de alternativas con menor toxicidad y menor riesgo de incidentes en el sector químico (Phillips et al., 2017). La investigación propone que la implementación de modelos de clasificación fundamentados en la estructura puede simplificar la detección de productos químicos más seguros y menos susceptibles a provocar accidentes.

Estos 12 principios de la QV establecen un marco de referencia para la reducción del impacto ambiental y la mejora de la seguridad en los procesos químicos. Adicionalmente, enfatizan la relevancia de adoptar una perspectiva preventiva en lugar de reactiva. Estos principios, al fomentar la eficiencia energética, la utilización de materias primas renovables y la minimización de desechos y sustancias peligrosas, aportan beneficios ambientales y proporcionan ventajas económicas y operativas a largo plazo. La aplicación de estos principios en el sector industrial y la investigación química resulta imprescindible para progresar hacia una EC y sostenible, capaz de abordar los retos ambientales presentes y futuros. De esta manera, la QV se consolida como un enfoque integral y necesario para el desarrollo de tecnologías más seguras y sostenibles capaces de cumplir con las demandas de la sociedad sin poner en riesgo la salud del planeta.

La Tabla 1 resume los 12 principios de la QV, subrayando la implementación de estos principios en diversas disciplinas con el objetivo de fomentar la sostenibilidad y reducir al mínimo el impacto ambiental. Cada principio proporciona un enfoque práctico para la minimización de residuos y la optimización del uso de recursos, y fomenta innovaciones en la generación de productos químicos más seguros, la generación de energías renovables y la producción de materiales biodegradables. Estos ejemplos ilustran cómo la QV se ha convertido en un pilar para el desarrollo de tecnologías más sostenibles, enfatizando su importancia en la transición hacia una economía global más responsable y ambientalmente consciente.

Tabla 1. Cuadro comparativo de las características y ejemplos de los 12 principios de la química verde.

Principio	Características	Ejemplos
1. Prevención de generación de residuos	Evitar la generación de residuos desde el inicio en lugar de gestionarlos después de creados.	Síntesis de productos farmacéuticos con procesos que minimizan la generación de residuos, como en la síntesis de nanopartículas de plata usando extractos de plantas.

2. Economía atómica	Maximizar la incorporación de todos los materiales en el producto final.	Síntesis de 3-hidroxi oxindol con una economía atómica del 85.86%, reduciendo la generación de residuos.
3. Síntesis química menos peligrosa	Utilizar sustancias menos peligrosas y minimizar la toxicidad e impacto ambiental en los procesos.	Uso de exudados naturales en lugar de disolventes orgánicos peligrosos para la síntesis de benzopirano.
4. Diseñar productos químicos seguros	Minimizar la toxicidad de los productos manteniendo su eficacia.	Diseño de bioplaguicidas como alternativas más seguras a plaguicidas sintéticos en agricultura.
5. Disolventes y auxiliares más seguros	Utilizar disolventes seguros y, si es posible, evitar su uso.	Uso de cachaça como disolvente en síntesis orgánica en lugar de disolventes tóxicos como diclorometano.
6. Eficiencia energética	Diseñar procesos para operar a temperatura y presión ambiente, minimizando el uso de energía.	Optimización de la síntesis de productos químicos para reducir el consumo energético, como el uso de radiación de microondas en la síntesis farmacéutica.
7. Utilizar materias primas renovables	Preferir el uso de materias primas renovables en lugar de no renovables.	Producción de biocombustibles a partir de microalgas, que son renovables y no compiten con cultivos alimentarios.
8. Evitar derivados químicos	Minimizar el uso de derivados y grupos protectores que generan residuos adicionales.	Síntesis hidrotermal de puntos cuánticos de carbono, que reduce el uso de derivados y residuos.
9. Utilizar catalizadores	Preferir catalizadores sobre reactivos estequiométricos para mejorar la eficiencia y reducir la generación de residuos.	Uso de catalizadores en la producción de biodiésel para aumentar la eficiencia y reducir la generación de residuos.
10. Diseñar a favor de la degradación	Diseñar productos que se degraden en sustancias no tóxicas después de su uso.	Uso de bioplaguicidas biodegradables que se descomponen sin dejar residuos tóxicos en el ambiente.
11. Monitorear procesos en tiempo real	Desarrollar métodos para monitorear y controlar los procesos en tiempo real, previniendo la formación de contaminantes.	Implementación de sistemas de monitoreo continuo en procesos industriales para detectar y corregir errores que podrían aumentar la contaminación.
12. Química inherentemente segura	Diseñar procesos y productos que minimicen el riesgo de accidentes como explosiones o emisiones peligrosas.	Implementación de principios de química verde en la educación para minimizar riesgos en los laboratorios de enseñanza.

3. Aplicaciones de la química verde

La producción sostenible, alineada con los principios de la QV, busca equilibrar la demanda actual con la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus necesidades, minimizando el impacto ambiental a través de la utilización de recursos renovables como las plantas (Jadoun et al., 2021; Pájaro Castro & Olivero Verbel, 2011). El auge de la QV se atribuye a la creciente comprensión de la toxicidad de las sustancias químicas y a la habilidad para sintetizar compuestos menos perjudiciales y más eficaces (Estévez, 2005). Entre sus avances recientes destacan los disolventes eutécticos, biodegradables y no tóxicos, empleados en el sector alimentario para el análisis de alimentos y la recuperación de fitoquímicos (Cannavacciuolo et al., 2022). Estos principios han revolucionado sectores tales como la producción de productos químicos, biocombustibles y la creación de materiales biodegradables, fomentando una industria de mayor sostenibilidad.

A continuación, se examinan ejemplos de su implementación en campos como la síntesis de productos

químicos, biocombustibles, diseño farmacéutico y la utilización de disolventes verdes.

3.1. *Síntesis verde de productos químicos*

La QV ha promovido metodologías innovadoras como la biosíntesis de nanopartículas, minimizando la utilización de reactivos peligrosos y contaminantes. Estudios recientes han evidenciado que las nanopartículas de plata pueden ser sintetizadas a través de extractos vegetales, lo cual reduce el uso de sustancias tóxicas y optimiza la utilización de recursos renovables (Alarcón et al., 2021; Sifontes, 2015). Este enfoque, alineado con los principios de sostenibilidad, reduce la producción de desechos peligrosos mediante la utilización de materiales biológicos en lugar de químicos sintéticos (Torres-Gómez et al., 2020). Por ejemplo, la producción de nanopartículas de plata, con aplicaciones en los campos de la biomedicina y la bioingeniería, particularmente en el tratamiento oncológico al disminuir la viabilidad de las células cancerígenas a través del estrés oxidativo. Se utilizan plantas, algas, bacterias, levaduras y

hongos para obtener nanopartículas metálicas a través de sus proteínas y metabolitos. Este método minimiza los desechos resultantes de la síntesis convencional y minimiza los costos asociados al producto final (Ratan et al., 2020).

Otro ámbito donde se ha implementado la QV es en la industria farmacéutica. La aplicación de estos principios en el desarrollo de fármacos ha propiciado la adopción de estrategias que minimizan la generación de residuos y que favorecen el uso de reactivos de menor toxicidad. Por ejemplo, se han implementado técnicas de síntesis que emplean radiación de microondas, lo cual posibilita una disminución notable en el consumo energético y la producción de subproductos (Bello & Bahena Culhuac, 2024; Martínez Arellano et al., 2017). Adicionalmente, la aplicación de catalizadores enzimáticos en lugar de catalizadores inorgánicos en la producción de compuestos farmacéuticos ha demostrado ser una opción más limpia y eficaz (Carrillo et al., 2022).

La industria química también ha comenzado a explorar el uso de disolventes de mayor seguridad y sostenibilidad. Un caso ilustrativo es el empleo de cachaça como disolvente en la síntesis orgánica, que, además de ser menos tóxica que los disolventes convencionales, también se caracteriza por ser un recurso renovable (Cunha & Silveira Matosa, 2017). Estas innovaciones potencian la seguridad en el laboratorio y favorecen la disminución de la huella ambiental derivada de los procesos químicos.

Finalmente, la implementación de métricas de evaluación del “grado de verdor” de los procesos químicos ha permitido a las empresas identificar áreas de mejora en sus prácticas industriales. Estas métricas contribuyen a la clasificación y optimización de procesos basándose en su sostenibilidad, fomentando de este modo una cultura de responsabilidad ambiental en el sector industrial (Garzón García et al., 2018; Sierra et al., 2015). La adopción de estos principios de la QV tiene un impacto positivo en el medio ambiente y puede derivar en ahorros económicos y una aceptación social más favorable de las operaciones industriales.

Las investigaciones anteriores son un ejemplo de que la QV está transformando la forma en que se llevan a cabo los procesos industriales, fomentando la seguridad y la sostenibilidad. Mediante la adopción de técnicas más sostenibles y la utilización de reactivos menos peligrosos, la industria química tiene la capacidad de mitigar su impacto ambiental y contribuir a un futuro de mayor sostenibilidad.

3.2. *Biocombustibles y energía renovable*

En las décadas recientes, el interés ha sido en la producción de biocombustibles a partir de materias primas renovables, debido a la necesidad de disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático. En este contexto, la QV ha contribuido a la sostenibilidad de los procesos de producción de biocombustibles y a la disminución de la huella de carbono relacionada con la generación de energía.

Un ejemplo representativo de producción de biocombustibles es el bioetanol, que tradicionalmente se ha producido a partir de cultivos como el maíz y la caña de azúcar. No obstante, la investigación ha comenzado a enfocarse en la utilización de microalgas como sustituto de materia prima para la generación de bioetanol. Las microalgas son altamente eficientes en la conversión de luz

solar y CO₂ en biomasa, lo que las convierte en una fuente prometedora de biocombustibles sostenibles (Khan et al., 2018; J. C. Liao et al., 2016). La producción de bioetanol a partir de microalgas no compete con la producción de alimentos y optimiza el balance de carbono al emplear CO₂ como materia prima (Khan et al., 2018; J. C. Liao et al., 2016).

La generación de biodiésel a partir de aceites vegetales y grasas residuales ha sido optimizada a través de la implementación de los principios de la QV. Por ejemplo, la implementación de catalizadores homogéneos y heterogéneos en la transesterificación de aceites para la producción de biodiésel ha sido optimizada para reducir la producción de desechos y la utilización de disolventes tóxicos. Se demostró que el uso de procesos catalíticos más eficientes puede aumentar los rendimientos de biodiésel y reducir el consumo de energía durante la producción (Kohse-Höinghaus et al., 2010).

La QV también ha fomentado la innovación en los procesos de producción de biocombustibles. Un enfoque innovador es la ingeniería microbiana, que permite a los microorganismos convertir materias primas renovables en biocombustibles avanzados. Estos biocombustibles, que incluyen bioetanol y biodiésel, pueden ser diseñados para tener propiedades similares a los combustibles fósiles, lo que facilita su integración en la infraestructura de transporte existente (Peralta-Yahya et al., 2012). La optimización de las rutas metabólicas de microorganismos mediante la modificación genética ha evidenciado resultados prometedores en la generación de biocombustibles a partir de lignocelulosa y otros subproductos y residuos agroalimentarios (J. C. Liao et al., 2016; Peralta-Yahya et al., 2012).

El uso de procesos hidrotermales para convertir grasas residuales en biocombustibles líquidos también ha sido un avance en la sostenibilidad de la producción de biocombustibles. Este método utiliza agua en condiciones supercríticas para descomponer los residuos en biocombustibles, lo que minimiza la necesidad de reactivos adicionales y reduce la generación de subproductos nocivos (Fedie et al., 2022). Esta metodología incrementa la eficiencia del proceso, al tiempo que favorece la eficiencia operativa mediante la reutilización de residuos que, de otra manera, serían descartados.

Estas investigaciones evidencian que la generación de biocombustibles a partir de materias primas renovables ha experimentado una mejora gracias a los principios de la QV. Mediante la optimización de procedimientos, la ingeniería basada en microorganismos y la implementación de tecnologías emergentes, se ha conseguido disminuir la huella de carbono en la generación de energía y potenciar la sostenibilidad de dichos procesos.

3.3. *Diseño de fármacos y productos farmacéuticos*

La implementación de la QV en el diseño y síntesis de productos farmacéuticos ha promovido métodos más sostenibles y menos tóxicos para mejorar la seguridad y la eficiencia en la producción de medicamentos, reduciendo el impacto ambiental asociado con su fabricación.

Un ejemplo es el uso de sistemas eutécticos profundos en la síntesis de ingredientes farmacéuticos activos. Estos disolventes, que son menos tóxicos y más sostenibles que los

disolventes orgánicos convencionales, han sido utilizados en reacciones de formación de enlaces C-O catalizadas por cobre, lo que demuestra su potencial para reemplazar métodos más contaminantes (Domingues et al., 2024; Quivelli et al., 2022). Este tipo de innovación permite mejorar la seguridad del proceso y también reduce la generación de residuos peligrosos.

Otro ejemplo es la síntesis de quinazolinonas utilizando un catalizador sostenible basado en Cu(II) en un disolvente derivado de biomasa, 2-metiltetrahidrofurano (2-MTHF). Este método ha permitido la producción de diproqualona, un fármaco con propiedades sedantes y antiinflamatorias, de manera más eficiente y con menor toxicidad (A. V. Dubey & Kumar, 2018). Este enfoque permitió optimizar el rendimiento del proceso, minimizando el uso de reactivos peligrosos.

La biocatálisis representa otra estrategia que ha adquirido relevancia en el ámbito de la síntesis farmacéutica. La implementación del uso de enzimas como catalizadores de reacciones químicas proporciona una opción más sustentable, dado que dichas reacciones suelen ocurrir en condiciones suaves y generan menos subproductos (Kim et al., 2024). Por ejemplo, se ha reportado que la biocatálisis puede emplearse en la síntesis de compuestos farmacéuticos de alta complejidad, lo que reduce la necesidad de múltiples pasos sintéticos y, por ende, disminuye el consumo de energía y recursos (Menges, 2018).

Además, la QV ha impulsado el desarrollo de nanopartículas y sistemas de liberación controlada de fármacos que se caracterizan por su mayor eficiencia y reducción de toxicidad. Por ejemplo, el uso de nanopartículas cargadas con medicamentos, diseñadas mediante métodos de la QV, ha mostrado una mejora en la bioactividad y una reducción en los efectos secundarios de los fármacos (Patra et al., 2018), optimizando así la eficacia y la seguridad terapéutica.

La reducción de disolventes tóxicos y de residuos peligrosos también contribuye a una producción más limpia y sostenible (Leahy et al., 2013). Adicionalmente, la optimización de los procesos de síntesis disminuye los costos operativos y acelera el desarrollo de nuevos fármacos, lo que favorece su accesibilidad en el mercado (Veleva & W. Cue Jr, 2017). La adopción de estas técnicas de producción más sostenibles y menos nocivas mejora la eficiencia y la seguridad en la generación de fármacos, sentando las bases para un futuro más sostenible en el sector farmacéutico.

3.4. *Uso de disolventes verdes*

Los disolventes son comúnmente utilizados en el ámbito científico para disolver otro tipo de moléculas, las cuales necesitarán de un disolvente compatible (Mabesoone et al., 2020). En ocasiones las mezclas entre el soluto y el disolvente, para la recuperación de este último, requieren ser separadas lo cual es un proceso común en diferentes industrias, entre estas la industria química, alimenticia y farmacéutica. En algunas ocasiones suele ser complicado y representa un foco de contaminación (Ren et al., 2021).

Se suele considerar que los disolventes verdes sean accesibles, su costo sea reducido, su reciclaje sea factible, su síntesis no requiera un gasto excesivo de recursos y energía, posean baja toxicidad, sean biodegradables, su rendimiento sea similar a los disolventes ya utilizados, ostenten una

estabilidad óptima, baja inflamabilidad, sean seguros de transportar y sean fabricados a partir de materiales renovables (Armenta et al., 2022).

Comparando los disolventes verdes con los tradicionales, los beneficios son claros. En términos de impacto ambiental, los disolventes verdes tienden a ser menos tóxicos y más biodegradables (Ali et al., 2020). Desde el punto de vista industrial, estos disolventes ofrecen ventajas en términos de eficiencia. Su capacidad para disolver una amplia gama de compuestos y su estabilidad térmica los hacen ideales para diversas aplicaciones, desde la síntesis química hasta la extracción y separación de productos (Umar et al., 2019). Además, la implementación de los disolventes verdes puede resultar en procesos más rápidos y menos costosos, lo que es particularmente valioso en la industria donde el tiempo y el costo son factores críticos (Banger et al., 2023).

Por ejemplo, la implementación de disolventes eutécticos y otros disolventes ecológicos ha generado una revolución en múltiples sectores industriales, desde la farmacéutica hasta la química de materiales, proporcionando opciones más sostenibles y menos tóxicas a los disolventes convencionales. Estos disolventes emergentes, tales como los disolventes profundos eutécticos (SEP) y los disolventes naturales eutécticos (SNE), han sido desarrollados para abordar las preocupaciones ambientales y de salud asociadas al uso de disolventes convencionales. Los disolventes eutécticos profundos son mezclas de dos o más componentes que presentan un punto de fusión más bajo que cualquiera de sus componentes individuales. Esto les permite ser líquidos a temperatura ambiente y, a menudo, son biodegradables y no tóxicos (Guajardo et al., 2016; Paiva et al., 2014). En ese sentido, los SEP han sido utilizados en la síntesis de heterociclos de manera eficiente y sostenible, reemplazando disolventes peligrosos como el diclorometano y el N,N-dimetilformamida (Banger et al., 2023). Además, los SEP son más económicos y fáciles de sintetizar en comparación con los líquidos iónicos, lo que los convierte en una opción atractiva para la industria (Guajardo et al., 2016). El uso de SEP en la síntesis de productos químicos, también ha demostrado reducir la cantidad de residuos generados en comparación con métodos tradicionales (Umar et al., 2019).

Una de las aplicaciones más representativas de los SEP se encuentra en la extracción de compuestos bioactivos de productos naturales. Se ha demostrado que los SNE son efectivos en la extracción de compuestos de hierbas chinas, mostrando buena biocompatibilidad y biodegradabilidad (M. Li et al., 2023). Esto permite mejorar la eficiencia de la extracción y, simultáneamente, disminuye el impacto ambiental al minimizar el uso de disolventes orgánicos convencionales.

Por lo tanto, la incorporación de disolventes eutécticos y otros disolventes ecológicos está revolucionando diversas industrias al proporcionar opciones más seguras y sostenibles. Estos disolventes contribuyen a la reducción del impacto ambiental, optimizando la eficacia de los procesos industriales, lo que los establece como una alternativa factible en la búsqueda de prácticas más sostenibles.

3.5. *Materiales biodegradables y sostenibles*

La QV está desempeñando una función estratégica en la producción de plásticos biodegradables y de materiales de embalaje sostenibles, contribuyendo de este modo a la

reducción de residuos plásticos y a la promoción de la sostenibilidad ambiental. Este enfoque se orienta hacia la creación de materiales que, además de su funcionalidad, también puedan descomponerse de manera segura en el medio ambiente, reduciendo de esta manera el impacto negativo de los plásticos convencionales derivados del petróleo.

Uno de los ejemplos más destacados de plásticos biodegradables es el poliéster poli-hidroxibutirato (PHB), que se produce a partir de microorganismos como *Ralstonia eutropha*. Este bioplástico se descompone en condiciones ambientales, convirtiéndose en agua y dióxido de carbono, lo que lo convierte en una alternativa viable a los plásticos tradicionales. La producción de PHB en plantas, en lugar de en condiciones industriales, puede reducir los costos y el impacto ambiental asociado con la producción de plásticos convencionales (Mozes-Koch et al., 2017).

Además, los plásticos biodegradables, como el ácido poliláctico (PLA) y el polibutileno succinato (PBS), se están utilizando cada vez más en aplicaciones de embalaje. Estos materiales son derivados de fuentes renovables, como el almidón y la celulosa, lo que les permite ser biodegradables y compostables (Ribba et al., 2022). La producción de estos plásticos permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles, disminuyendo la cantidad de residuos plásticos que terminan en vertederos y océanos, donde pueden tardar cientos de años en descomponerse (Geyer et al., 2017).

El impacto de estos desarrollos en la reducción de residuos plásticos es cada vez más relevante. De acuerdo con un estudio, la producción global de plásticos biodegradables alcanzó 1.23 millones de toneladas en 2020, y se espera que el mercado crezca un 50% para 2025 (Yao et al., 2023). Este aumento en la producción de plásticos biodegradables puede contribuir a una disminución notable en la acumulación de plásticos no biodegradables en el medio ambiente. Además, el uso de plásticos biodegradables en aplicaciones de un solo uso, como envases y bolsas, puede ayudar a contrarrestar la crisis de contaminación plástica (Yu & Flury, 2024).

La QV también ha permitido el desarrollo de plásticos que se descomponen en condiciones específicas, como en instalaciones de compostaje industrial, donde se pueden convertir en biomasa y nutrientes para el suelo (Malafeev et al., 2023). Esto permite cerrar el ciclo de vida de los plásticos y también promueve prácticas agrícolas sostenibles al enriquecer el suelo con materia orgánica.

En términos de sostenibilidad ambiental, el uso de plásticos biodegradables y materiales de embalaje sostenibles reduce la huella de carbono asociada con la producción y eliminación de plásticos convencionales. Estos materiales, al ser derivados de fuentes renovables y ser biodegradables, contribuyen a una EC, donde los recursos se utilizan de manera más eficiente y se minimizan los residuos (Yu & Flury, 2024). Además, la reducción de la toxicidad de los materiales utilizados en la producción de plásticos biodegradables también mejora la seguridad para los trabajadores y el medio ambiente (Erythropel et al., 2018).

De acuerdo con estos ejemplos, la QV está impulsando la innovación en la producción de plásticos biodegradables y materiales de embalaje sostenibles, lo cual tiene un efecto positivo en la minimización de desechos plásticos y en la promoción de la sostenibilidad medioambiental. Con el incremento en la demanda de soluciones más sostenibles, es plausible que la adopción de estos materiales se intensifique,

contribuyendo así a reducir la crisis de contaminación por plásticos.

3.6. Agentes químicos para la agricultura

El desarrollo de biopesticidas y fertilizantes verdes también ha mejorado las prácticas agrícolas al ofrecer alternativas más seguras y sostenibles en comparación con los productos químicos agrícolas tradicionales. Estos productos contribuyen a la salud del suelo y las plantas, además de proporcionar beneficios ambientales y para la salud humana (Sulochana, 2024).

Los biopesticidas, que son derivados de organismos vivos o de sus productos, han demostrado ser efectivos en el control de plagas y enfermedades agrícolas. Por ejemplo, el uso de microorganismos como *Bacillus thuringiensis* ha sido ampliamente adoptado como un biopesticida eficaz, proporcionando una opción menos tóxica que los insecticidas químicos convencionales. Estos biopesticidas son menos perjudiciales para los seres humanos y la fauna no objetivo y contribuyen a reducir la resistencia de las plagas a los pesticidas, un problema frecuentemente vinculado con el uso excesivo de productos químicos sintéticos (Ortiz & Sansinenea, 2022).

En cuanto a los fertilizantes verdes, su uso ha evidenciado una mejora en la calidad del suelo y la salud de las plantas. La incorporación de cultivos de abono verde, como la alfalfa o el trébol, en la rotación de cultivos ayuda a aumentar la materia orgánica del suelo, a mejorar su estructura y a aumentar la disponibilidad de los nutrientes (Kumar et al., 2024; D. Singh et al., 2023). Además de proporcionar nitrógeno al suelo, estos cultivos fomentan la actividad microbiana beneficiosa, la cual es necesaria para preservar la fertilidad del suelo. Se ha observado que la aplicación de abono verde puede reducir la necesidad de fertilizantes nitrogenados sintéticos, esto a su vez disminuye el riesgo de contaminación del agua por escorrentía de nitratos (Pu et al., 2023; Qaswar et al., 2019).

El uso de biopesticidas y fertilizantes verdes aportan múltiples beneficios ambientales. Al reducir la dependencia de productos químicos sintéticos, se minimiza la contaminación del suelo y del agua, contribuyendo a la salud de los ecosistemas circundantes (Rabalao et al., 2022). Además, el uso de prácticas agrícolas sostenibles, como la rotación de cultivos y la conservación del suelo, mejora la biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas agrícolas. La implementación de prácticas de no laboreo y la conservación de residuos de cultivos han evidenciado un incremento en la diversidad de la comunidad microbiana del suelo, lo que es importante para la salud del ecosistema (Luo et al., 2020).

Desde una perspectiva de salud pública, el uso de biopesticidas y fertilizantes verdes reduce la exposición de los agricultores y de las comunidades cercanas a productos químicos tóxicos. Esto es importante en regiones donde los agricultores dependen de la agricultura para su sustento y pueden estar expuestos a altos niveles de pesticidas sintéticos (Ahmad & Tariq, 2021). Además, la producción de alimentos cultivados con métodos más sostenibles puede mejorar la inocuidad alimentaria al reducir la contaminación con productos agrícolas (F. Li et al., 2021).

Las investigaciones anteriores muestran que el desarrollo y la implementación de biopesticidas y de fertilizantes

verdes ha transformado las prácticas agrícolas al ofrecer alternativas más seguras y sostenibles.

3.7. *Industria Alimentaria*

La QV también ha transformado los procesos de extracción de compuestos bioactivos y del análisis de alimentos, proporcionando métodos más sostenibles y menos tóxicos para obtener compuestos bioactivos y aditivos alimentarios. Este enfoque tiene como objetivo optimizar la eficiencia de los procesos y mitigar el impacto ambiental vinculado a la producción alimentaria.

La aplicación de métodos como la extracción asistida por ultrasonido y la extracción asistida por microondas constituye un caso ilustrativo de la obtención de compuestos bioactivos, tales como compuestos fenólicos y antioxidantes, que se obtienen de manera más eficaz a partir de subproductos agroindustriales, como el orujo de frutas. Por ejemplo, un estudio sobre la extracción de compuestos bioactivos de los orujos de arándano y frambuesa mostró que el uso de disolventes hidroalcohólicos mejora la recuperación de antocianinas y compuestos fenólicos en comparación con disolventes puros. Adicionalmente, el empleo del agua como disolvente en estos procesos puede disminuir la dependencia de disolventes orgánicos, haciendo que el proceso sea más ecológico (Santos et al., 2021).

La aplicación de sistemas de extracción de dos fases acuosas también ha sido explorada para la determinación colorimétrica de colorantes alimentarios sintéticos. Esto ha permitido la extracción rápida y eficiente de colorantes, alineándose con los principios de la química analítica verde al minimizar el uso de disolventes tóxicos y peligrosos. La tendencia hacia métodos de preparación de muestras más sostenibles es evidente, ya que se busca hacer que las técnicas de extracción sean más adecuadas para el concepto de química analítica verde (Smirnova & Apyari, 2023).

En cuanto a la producción de aditivos alimentarios y colorantes naturales, la QV ha facilitado el desarrollo de métodos de extracción que utilizan disolventes ecológicos, como los SEP y el agua. Por ejemplo, se ha demostrado que los SEP son efectivos para extraer compuestos lipofílicos de materiales biológicos, lo que abre nuevas oportunidades para la obtención de colorantes naturales y aditivos alimentarios (Boateng, 2022). Estos métodos además de ser más seguros para la salud humana, también reducen la toxicidad de los productos finales.

La extracción de carotenoides, que son colorantes naturales utilizados en la industria alimentaria, ha sido optimizada mediante el uso de aceite de girasol como disolvente alternativo en un proceso de extracción asistida por ultrasonido, haciendo el proceso más económico y alineado con los conceptos de extracción verde y bio-refinería (Y. Li et al., 2013). La comparación de este método con la extracción convencional utilizando hexano mostró que la extracción asistida por ultrasonido es más eficiente y menos perjudicial para el medio ambiente.

Los beneficios ambientales y de salud al utilizar métodos de extracción y análisis más seguros son cada vez más evidentes. Al reducir la dependencia de disolventes tóxicos y peligrosos, se reduce la contaminación ambiental y se mejora la seguridad de los trabajadores en la industria alimentaria. Además, la producción de aditivos y colorantes naturales mediante métodos más sostenibles contribuye a la

creación de productos alimentarios más seguros y saludables para los consumidores (P. Anastas & Eghbali, 2010; Bordiga et al., 2023).

Las investigaciones citadas muestran que la aplicación de la QV en la extracción y análisis de alimentos ha propiciado avances en la producción de aditivos alimentarios y colorantes naturales, con métodos que facilitan la optimización de la eficiencia y de la sostenibilidad de los procesos, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y a la promoción de la salud pública.

3.8. *Reciclaje y reutilización de materiales*

La implementación de los principios de la QV en los procesos de reciclaje ha facilitado la creación de métodos más sostenibles y eficaces para la recuperación de materiales, que abarcan metales, plásticos y otros compuestos.

Un ejemplo en el ámbito del reciclaje de metales es el tratamiento de baterías de iones de litio, que permite la recuperación de sus componentes sin alterar su estructura química, preservando así la energía y los materiales de valor (Hayagan et al., 2024; Piątek et al., 2021). Este proceso de reciclaje evita el uso de métodos tradicionales que requieren altas temperaturas y productos químicos agresivos, contribuyendo a reducir la huella de carbono y la generación de residuos (Lv et al., 2018; Pražanová et al., 2024).

En relación con el reciclaje de plásticos, la QV ha facilitado el desarrollo de métodos de reciclaje químico que permiten la conversión de plásticos en sus monómeros originales. Un estudio sobre el reciclaje de polilactida ha propuesto una estrategia de “DE–RE polimerización”, que permite reciclar plásticos de polilactida de manera que se mantengan las propiedades del material original (Yang et al., 2022), permitiendo mejorar la calidad del material reciclado, además de contribuir a la EC al promover la reutilización de plásticos sin degradación considerable de sus propiedades.

Adicionalmente, la implementación de líquidos iónicos y disolventes ecológicos en el proceso de reciclaje de plásticos ha evidenciado su eficacia en la descomposición de plásticos complejos, como los policarbonatos, en sus componentes básicos (M. Liu et al., 2018). Este método reduce la necesidad de utilizar disolventes tóxicos y mejora la sostenibilidad del proceso de reciclaje.

La QV también se ha aplicado en el reciclaje de materiales compuestos, como los utilizados en la industria de la construcción y la automoción. Se han desarrollado métodos que utilizan procesos biológicos y enzimáticos para descomponer compuestos complejos, permitiendo la recuperación de materiales valiosos sin el uso de productos químicos agresivos (Schyns & Shaver, 2021). Estos métodos son más seguros para el medio ambiente y pueden ser más económicos a largo plazo.

Las ventajas de aplicar la QV en los procedimientos de reciclaje son múltiples. En primer lugar, la disminución de sustancias químicas nocivas y la minimización de desechos peligrosos favorecen la creación de un ambiente más limpio y seguro. Adicionalmente, la optimización de la eficiencia de los procesos de reciclaje puede derivar en una disminución de los costos operativos y en un incremento de la rentabilidad para las organizaciones implicadas en la administración de residuos (Vollmer et al., 2020).

Las investigaciones citadas muestran que la aplicación de los principios de la QV en los procesos de reciclaje transforma la manera en la que se gestionan los materiales, desde metales hasta plásticos y materiales compuestos. En particular, se han desarrollado estrategias para el reciclaje de polímeros como el polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poli(cloruro de vinilo) (PVC) y polietilentereftalato (PET), que son ampliamente utilizados en envases, construcción y automoción. Estas iniciativas fomentan la sostenibilidad ambiental, además de proporcionar oportunidades económicas, contribuyendo de esta manera a una economía circular y a una gestión responsable de los recursos.

3.9. Tecnologías de remediación ambiental

La implementación de la QV también ha facilitado el avance de tecnologías para la descontaminación de suelos y aguas, fomentando métodos más sostenibles y menos tóxicos para la remediación de contaminantes. A continuación, se expondrán ejemplos de biorremediación y técnicas sostenibles de tratamiento de aguas residuales que ejemplifican la implementación de estos principios.

La biorremediación es un proceso que utiliza microorganismos para degradar o eliminar contaminantes del suelo y el agua. Se basa en la capacidad natural de ciertos organismos para metabolizar compuestos tóxicos, convirtiéndolos en sustancias menos dañinas. Un ejemplo es el uso de bacterias del género *Pseudomonas* para la degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en suelos contaminados. Se ha demostrado que la bioacumulación de HAPs disminuyó cuando se aplicaron estas bacterias en un sitio contaminado (T. X. Xia et al., 2013).

Además, el uso de plantas en la fitorremediación ha mostrado resultados prometedores. Las plantas pueden absorber contaminantes del suelo y del agua, lo que ayuda a limpiar el medio ambiente y permite mejorar la calidad del suelo. Por ejemplo, se ha demostrado que especies como *Canavalia ensiformis* son efectivas para absorber metales pesados y otros contaminantes del suelo (Nedjimi, 2021).

En el ámbito del tratamiento de aguas residuales, la QV ha impulsado el desarrollo de tecnologías que utilizan procesos biológicos y químicos menos dañinos. Se ha reportado el uso de nanomateriales en la remediación de aguas residuales. Se han desarrollado fluidos magnéticos amigables con el medio ambiente que pueden ser utilizados para eliminar contaminantes de aguas residuales. Estos nanomateriales son efectivos para adsorber metales pesados y otros contaminantes, disminuyendo la generación de residuos peligrosos (Nadejde et al., 2015).

Otro método sostenible es el tratamiento de aguas residuales mediante el uso de agentes oxidantes menos tóxicos, como el peróxido de hidrógeno, en lugar de productos químicos más agresivos. Esto ha demostrado ser

efectivo para la eliminación de contaminantes orgánicos en aguas residuales, mejorando la calidad del agua tratada y reduciendo el impacto ambiental (Wagner et al., 2010). Además, los procesos avanzados de oxidación (AOPs), que generan radicales hidroxilo altamente reactivos, representan otra opción sostenible para la degradación de contaminantes. Entre ellos, el reactivo de Fenton, que combina peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con sales de hierro, es ampliamente utilizado por su eficiencia en la producción de radicales hidroxilo en condiciones controladas. Asimismo, la combinación de ozono y peróxido de hidrógeno (O₃/H₂O₂) ha demostrado ser eficaz para degradar compuestos difíciles de eliminar, ya que el H₂O₂ acelera la descomposición del ozono y promueve la formación de radicales hidroxilo (Ma, 2024).

Con respecto a las ventajas ambientales y sanitarias, la aplicación de la QV en la descontaminación de suelos y aguas también ha mostrado beneficios. Mediante la implementación de métodos biológicos y menos tóxicos, se disminuye la exposición a compuestos químicos peligrosos para los trabajadores y para las comunidades cercanas. Adicionalmente, estos procedimientos tienden a ser más sostenibles a largo plazo, dado que fomentan la restauración de los ecosistemas y de la biodiversidad (P. Anastas & Eghbali, 2010; Valmir et al., 2014).

La biorremediación y los tratamientos sostenibles de aguas residuales también contribuyen a la EC. Se ha reportado que el uso de subproductos de la biorremediación puede ser integrado en procesos agrícolas, mejorando la salud del suelo y promoviendo prácticas agrícolas sostenibles (Ferreira et al., 2021).

Las investigaciones citadas demuestran que la QV desempeña un papel central en el desarrollo de tecnologías para la descontaminación de suelos y aguas a través de técnicas como la biorremediación y el tratamiento sostenible de aguas residuales. Estas metodologías optimizan la eficacia de la descontaminación y disminuyen el impacto ambiental, fomentando la salud pública y avanzando hacia un futuro más sostenible en la gestión de contaminantes.

A manera de resumen, la Tabla 2 ofrece un cuadro comparativo que resalta la integración de la QV en diversas áreas industriales y científicas, fomentando la sostenibilidad y disminuyendo el impacto ambiental. Desde la síntesis de compuestos químicos hasta la producción de biocombustibles y fármacos, los principios de la QV se aplican para reducir la toxicidad y la generación de residuos, así como para optimizar la utilización de los recursos. Adicionalmente, la incorporación de disolventes verdes y de materiales biodegradables evidencia una transición hacia procedimientos más ecológicos. En paralelo, las innovaciones en el reciclaje, en la remediación ambiental y en la agricultura evidencian el potencial de la QV para proporcionar soluciones prácticas y sostenibles en diversos sectores.

Tabla 2. Comparación de aplicaciones de la química verde en diversos sectores industriales y científicos.

Tema	Descripción	Ejemplos
Síntesis verde de productos químicos	Implementación de procesos industriales que adoptan principios de química verde, utilizando reactivos más seguros y métodos menos contaminantes para reducir el impacto ambiental.	<ul style="list-style-type: none"> • Síntesis de nanopartículas de plata utilizando extractos de plantas. • Uso de microondas para reducir energía en la síntesis de medicamentos.

Biocombustibles y energía renovable	Producción de biocombustibles a partir de materias primas renovables, con enfoque en la reducción de la huella de carbono en la producción de energía.	<ul style="list-style-type: none"> ● Producción de bioetanol a partir de microalgas. ● Uso de catalizadores eficientes en la transesterificación para la producción de biodiésel.
Diseño de fármacos y productos farmacéuticos	Implementación de química verde en la síntesis de medicamentos para mejorar la sostenibilidad y reducir la toxicidad en la producción farmacéutica.	<ul style="list-style-type: none"> ● Síntesis de quinazolinonas usando catalizadores sostenibles. ● Biocatálisis para la producción de compuestos farmacéuticos complejos.
Uso de disolventes verdes	Desarrollo y aplicación de disolventes eutécticos y otros solventes ecológicos, comparando sus ventajas sobre los solventes tradicionales en diversas industrias.	<ul style="list-style-type: none"> ● Uso de cachaça como disolvente en síntesis orgánica. ● Implementación de disolventes eutécticos en la extracción de compuestos bioactivos de plantas.
Materiales biodegradables y sostenibles	Producción de plásticos biodegradables y materiales para empaques sostenibles, con impacto en la reducción de residuos plásticos.	<ul style="list-style-type: none"> ● Producción de poliéster poli-hidroxibutirato (PHB) a partir de microorganismos. ● Uso de ácido poliláctico (PLA) en empaques biodegradables.
Agentes químicos para agricultura	Desarrollo de bioplaguicidas y fertilizantes verdes, con beneficios ambientales y para la salud en la agricultura mediante el uso de productos químicos más seguros.	<ul style="list-style-type: none"> ● Uso de bioplaguicidas a partir de extractos naturales para el control de plagas. ● Desarrollo de fertilizantes verdes para reducir la dependencia de productos químicos sintéticos.
Industria alimentaria	Aplicación de química verde en la mejora de procesos de extracción y análisis de alimentos, así como en la producción de aditivos alimentarios y colorantes naturales.	<ul style="list-style-type: none"> ● Extracción de fitoquímicos usando disolventes eutécticos. ● Producción de colorantes naturales mediante procesos verdes.
Reciclaje y reutilización de materiales	Procesos de reciclaje que utilizan principios de química verde, enfocándose en la reducción de residuos y la reutilización de materiales.	<ul style="list-style-type: none"> ● Reciclaje de metales usando procesos de baja energía. ● Reutilización de plásticos mediante técnicas de reciclaje sostenibles.
Tecnologías de remediación ambiental	Aplicaciones de la química verde en la descontaminación de suelos y aguas, con ejemplos de biorremediación y tratamientos sostenibles de aguas residuales.	<ul style="list-style-type: none"> ● Uso de biorremediación para limpiar suelos contaminados. ● Aplicación de agentes biodegradables en el tratamiento de aguas residuales.

4. El rol de la inteligencia artificial en la promoción y optimización de la química verde

4.1. Optimización de procesos químicos

Los algoritmos de inteligencia artificial (IA) están revolucionando la optimización de reacciones químicas, mejorando la eficiencia y reduciendo el desperdicio en la industria química. Estas tecnologías permiten la identificación de condiciones de reacción más sostenibles, lo cual se alinea con los principios de la QV, que aspira a reducir el uso de sustancias tóxicas y la generación de residuos. Mediante diversas aplicaciones, la IA está

mostrando su potencial para transformar prácticas químicas tradicionales en procesos más responsables y eficaces.

Un ejemplo es el uso de software de retrosíntesis que emplea IA para explorar secuencias de reacciones alternativas. Este tipo de herramientas permite a los químicos navegar por bases de datos extensas de reacciones conocidas, tales como Reaxys, SciFinder, PubChem, ChemSpider y SPRESI, facilitando la identificación de rutas sintéticas más eficientes y que producen menos residuos (Davies & Hirst, 2024). La adopción de dichas tecnologías puede conducir a una reducción de los subproductos no deseados, contribuyendo de esta manera a la sostenibilidad en el campo químico (Gricourt et al., 2024).

Además, la IA ha sido empleada para optimizar las condiciones de reacción en la síntesis de compuestos químicos. Por ejemplo, se han desarrollado algoritmos que analizan grandes volúmenes de datos experimentales para predecir los resultados de reacciones bajo diferentes condiciones, lo que permite acelerar el proceso de descubrimiento y permite a los investigadores seleccionar condiciones que minimizan el uso de reactivos peligrosos y reducen la producción de desechos (Chiang et al., 2022). La capacidad de la IA para adquirir conocimientos de datos históricos y proponer recomendaciones basadas en patrones observados, constituye el fundamento para optimizar la sostenibilidad de los procesos (J. Guo et al., 2024).

La integración de la IA en el campo de la química también se extiende a la optimización del uso de catalizadores. Investigaciones recientes han demostrado que la IA puede ayudar en el diseño racional de catalizadores abundantes en la Tierra, reduciendo la dependencia de metales preciosos y escasos. En particular, se ha centrado en el desarrollo de catalizadores basados en metales de transición, como hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), manganeso (Mn) y cobre (Cu), así como en catalizadores sin metales, como los basados en carbono y nitruro de carbono (C₃N₄) (J. Guo et al., 2024). Estos avances mejoran la eficiencia de las reacciones químicas y disminuyen el impacto ambiental asociado con la extracción y uso de metales raros y preciosos.

La IA se está empleando para tratar cuestiones relativas a la gestión de residuos químicos. Los sistemas de gestión de residuos impulsados por IA tienen la capacidad de anticipar la generación de residuos y de optimizar la selección de emplazamientos para vertederos, contribuyendo así a una disminución general de los costos asociados con la disposición de residuos (Sikhakhane Nwokediegwu & Ugwuanyi, 2024). Este aspecto adquiere particular relevancia en el marco de la QV, en el que la reducción de los residuos constituye un objetivo prioritario.

Estos estudios rebelan que los algoritmos de IA están desempeñando un papel central en la optimización de las reacciones químicas, facilitando la identificación de condiciones más sostenibles y contribuyendo a las iniciativas de la QV. Estas tecnologías benefician a la industria química a la vez que promueven prácticas más responsables y respetuosas con el medio ambiente, mediante la mejora de la eficiencia y la reducción en la generación de los residuos.

4.2. *Diseño de nuevos materiales y productos verdes*

La aplicación de técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*, ML) en el diseño de materiales biodegradables y productos químicos menos tóxicos está transformando la forma en que se desarrollan y optimizan estos compuestos. La IA permite predecir propiedades y comportamientos de nuevos materiales, a través de modelos computacionales avanzados, acelerando el descubrimiento de compuestos verdes que cumplen con los principios de la química sostenible.

En una investigación se presentó un enfoque basado en ML para diseñar poliamidas biodegradables y resistentes mediante estructuras multibloque. El estudio demostró que la IA fue capaz de identificar los factores críticos que influyeron sobre la biodegradabilidad y la resistencia de los

polímeros, permitiendo la creación de materiales biodegradables con propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones prácticas (Amamoto et al., 2023).

En otro estudio, se utilizaron técnicas de ML para predecir la composición y las propiedades mecánicas de bioplásticos derivados de algas marinas (Ibarra-Pérez et al., 2023). Esto facilitó una comprensión más profunda del comportamiento de estos nuevos materiales, promoviendo la identificación de formulaciones que presentan tanto eficacia como menor impacto en el medio ambiente.

Adicionalmente, se ha explorado la biodegradabilidad de compuestos clorados utilizando un enfoque de relaciones cuantitativas estructura-biodegradabilidad (QSPR) (Erickson et al., 2024), permitiendo predecir la biodegradabilidad de nuevos compuestos en función de sus estructuras químicas, lo cual podría acelerar el desarrollo de productos químicos menos tóxicos y más respetuosos con el medio ambiente. La integración de técnicas de QSPR con modelos de ML establece un marco robusto para la investigación en biodegradabilidad, un aspecto de suma importancia para la QV.

Por último, otra investigación se centró en la determinación de la cristalinidad relativa de polímeros biodegradables mediante el uso de modelos de ML (J. Wang et al., 2022), siendo relevante debido a que la cristalinidad puede tener un impacto en las características mecánicas y de degradación de los materiales. Al emplear múltiples topologías de ML, los investigadores tienen la capacidad de optimizar las condiciones de procesamiento y composición de los polímeros, lo que conduce a la creación de productos más eficaces y sostenibles.

Estas investigaciones demostraron que la implementación de técnicas de ML en el diseño de materiales biodegradables y menos tóxicos está demostrando ser un enfoque innovador y efectivo. La IA está acelerando el descubrimiento de nuevos compuestos verdes, mediante la predicción de propiedades y la optimización de formulaciones, contribuyendo así a la creación de productos más sostenibles que cumplen con los estándares de la QV.

4.3. *Previsión y mitigación de impactos ambientales*

La IA ha sido primordial en la predicción del impacto ambiental de nuevos productos químicos y procesos, facilitando la toma de decisiones de mayor sostenibilidad y optimizando las evaluaciones del ciclo de vida (ECV) de productos químicos. A través de técnicas avanzadas de modelado y de análisis de datos, la IA posibilita a investigadores e industrias una evaluación más precisa de las repercusiones ambientales derivadas de sus actividades.

La aplicación de modelos de ML para estimar el impacto ambiental de diversos compuestos químicos, es un enfoque prometedor de la IA. Por ejemplo, en un estudio se propuso un marco de sostenibilidad ambiental absoluta que cuantifica la presión química sobre los ecosistemas y evalúa la capacidad de estos para soportar dicha presión (Kosnik et al., 2022). Esta modalidad de análisis posibilita a los investigadores la identificación de compuestos que son menos perjudiciales para el medio ambiente, lo que simplifica la elección de alternativas más sostenibles.

La IA también puede ser integrada en el proceso de evaluación del ciclo de vida, como se menciona en otro estudio, en el cual se discute la importancia de herramientas

cuantitativas para comparar la “veracidad” y el impacto ambiental de reacciones químicas (Reyes et al., 2023). Al combinar métricas de ECV con un enfoque de pensamiento sistémico, los investigadores pueden conectar las reacciones químicas con los ODS de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), lo que permite una toma de decisiones de una forma más fundamentada y alineada con los principios de la QV.

La implementación de algoritmos de optimización multiobjetivo también ha demostrado igualmente su eficacia en la evaluación de procesos químicos. En una investigación, se estableció el desarrollo de un marco de referencia para la evaluación del impacto ambiental total, basado en un índice ambiental potencial (Teh et al., 2019). Este marco permitió a los ingenieros de procesos identificar y minimizar los efectos adversos de las operaciones químicas, fomentando de esta manera prácticas más sostenibles.

Por otro lado, la implementación de la IA en el diseño de productos químicos sostenibles también abarca la identificación de condiciones de reacción óptimas que reduzcan la toxicidad y el desperdicio. En un estudio se propuso que la IA puede facilitar la toma de decisiones en la producción de compuestos químicos, destacando la necesidad de enfrentar los desafíos de datos en la evaluación del impacto de la IA en la sostenibilidad (M. Liao et al., 2022). Esto adquiere relevancia en la industria química, donde la optimización de procesos puede resultar en una disminución en la utilización de recursos y la generación de residuos.

En conjunto, estas investigaciones muestran que la IA está transformando la evaluación del impacto ambiental que tendrían nuevos compuestos químicos y procesos, al facilitar una toma de decisiones que tomen en cuenta los principios de la sostenibilidad y al mejorar las evaluaciones del ciclo de vida. La IA ayuda a las empresas en el cumplimiento de las normativas medioambientales, al tiempo que fomenta prácticas más responsables y sostenibles en el sector químico.

4.4. *Desarrollo de catalizadores y reacciones más limpias*

La IA también está transformando el diseño y la optimización de catalizadores, mejorando la eficiencia de las reacciones químicas y reduciendo la formación de subproductos no deseados. Los investigadores pueden identificar patrones y relaciones en grandes conjuntos de datos, a través de la implementación de modelos de ML, facilitando el desarrollo de catalizadores más selectivos y efectivos.

Un estudio sobre catálisis heterogénea identificó parámetros críticos, denominados “materiales genéticos”, que influyen en el rendimiento del catalizador, ya sea facilitando o dificultando su eficacia. La investigación mostró cómo la IA puede detectar estos factores críticos, lo que permitió sintetizar catalizadores de vanadio con diferentes niveles de reactividad en la oxidación de alcanos (Foppa et al., 2021). Los investigadores lograron mejorar la selectividad y eficiencia de las reacciones, al estandarizar protocolos experimentales y utilizar datos consistentes, reduciendo de esta manera la formación de subproductos indeseables.

En otra investigación se desarrollaron nanocristales de fosfato de cobalto como una nanoenzima catalasa para la síntesis de α -cetoácidos. En este estudio, se logró una conversión del 100% de isopropanol sin detectar subproductos, representando una mejora en comparación con sistemas de catálisis convencionales que generan residuos adicionales (Z. Wang et al., 2021). Esta medida facilitó la optimización de la eficiencia de la reacción, simultáneamente eliminando la necesidad de etapas adicionales para la separación de los subproductos.

Otra investigación se centró en la selección de superficies de aleaciones escalonadas para la catálisis de C_1 asistida por IA. Se utilizaron descriptores bien establecidos para predecir la actividad catalítica en aleaciones binarias, lo que permitió a los investigadores identificar rápidamente las combinaciones más prometedoras para reacciones específicas (X. Liu et al., 2022). La capacidad de la IA para predecir el comportamiento de diferentes catalizadores, permite acelerar el proceso de descubrimiento y de optimización, conduciendo a una mayor selectividad y rendimiento.

En otro trabajo, se exploró la conversión electroquímica de CO_2 utilizando marcos organometálicos de cobre. Esto permitió mejorar la eficiencia electrocatalítica y se centró en la generación de productos valiosos a partir de CO_2 , lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental (Zhong et al., 2020). Por lo tanto, la IA se utilizó para optimizar las condiciones de reacción y mejorar la actividad del catalizador, resultando en una mayor eficiencia en la conversión de CO_2 .

Finalmente, en otra investigación se presentó un flujo de trabajo potenciado por modelos de ML para predecir catalizadores de alta selectividad, lo que permitió a los investigadores identificar patrones en grandes conjuntos de datos, acelerando el desarrollo de catalizadores quirales y mejorando la selectividad en reacciones asimétricas (Zahrt et al., 2019). Es por eso que la capacidad de la IA para reconocer patrones complejos en los datos experimentales es importante para el diseño racional de catalizadores más eficientes.

En conjunto, estas investigaciones mostraron que la IA desempeña un papel central en el diseño y optimización de catalizadores y que permite mejorar la eficiencia de las reacciones químicas y reducir la formación de subproductos no deseados.

4.5. *Automatización y control en tiempo real en procesos químicos*

La IA ha sido igualmente empleada en la automatización y el control en la automatización y el control en tiempo real de los procesos químicos, lo cual facilita una supervisión más efectiva y la minimización de riesgos de contaminación. La incorporación de sistemas de IA en plantas químicas ha llevado a procesos más limpios, seguros y eficientes, transformando la forma en que se gestionan las operaciones industriales. La capacidad de respuesta rápida es determinante en la industria química, donde incluso pequeñas variaciones pueden resultar en la contaminación de productos o en la generación de subproductos no deseados (Okuyelu & Adaji, 2024).

Un ejemplo exitoso de la aplicación de la IA en la automatización de plantas químicas es la implementación de sistemas de control adaptativos basados en modelos de ML,

que ajustan las condiciones operativas según factores ambientales y de proceso. En la planta de la empresa *Badische Anilin- und Soda-Fabrik* (BASF), la IA ha potenciado la eficiencia y la seguridad mediante la optimización del consumo de energía y de las materias primas, lo que ha contribuido a la reducción de emisiones y residuos (Namdeti, 2023). Esta circunstancia ha impulsado la sostenibilidad de las operaciones y ha potenciado la rentabilidad de la empresa.

Otra investigación subrayó la manera en la que las tecnologías de manufactura inteligente, propulsadas por la IA, permitieron transformar los procesos industriales mediante la integración fluida de datos provenientes de diversas fuentes, facilitando la toma de decisiones informada y la optimización en tiempo real. En una planta química, por ejemplo, la IA tiene la capacidad de analizar datos de sensores para ajustar automáticamente las condiciones de reacción, lo que disminuye el riesgo de contaminación y optimiza la eficacia del proceso (Verma, 2018).

La evaluación y mantenimiento predictivo de los equipos representa otra implementación exitosa de la IA, facilitando a las plantas químicas la predicción de fallas en los equipos antes de que ocurran. Esta medida disminuye la duración de la inactividad y optimiza la seguridad operativa. Este aspecto es relevante en escenarios donde la contaminación puede constituir un riesgo significativo (Sodiya et al., 2024).

Estas investigaciones muestran como la IA ha transformado la automatización y el control en tiempo real de los procesos químicos, permitiendo una supervisión más efectiva y la minimización de riesgos de contaminación.

4.6. Modelado y simulación avanzados de procesos químicos

La IA ha sido igualmente empleada en el modelado y en la simulación de procesos químicos complejos, con la finalidad de evaluar alternativas más sostenibles previo a su implementación. La IA ayuda a reducir la necesidad de ensayos experimentales costosos y potencialmente dañinos para el medio ambiente, mediante simulaciones avanzadas, optimizando así el diseño y la operación de procesos químicos (Linder, 2017).

Además, el uso de simulaciones basadas en IA ha demostrado ser efectivo en la enseñanza de la ingeniería química al proporcionar herramientas poderosas para el diseño y la operación de plantas químicas (Borreguero et al., 2019). Estas simulaciones permiten a los estudiantes y a los profesionales la exploración de diversos escenarios sin incurrir en los costos asociados a los experimentos físicos, promoviendo así un aprendizaje más profundo y una mejor comprensión de los procesos químicos.

En otra investigación, aplicaron programación cuadrática secuencial basada en un método de conjunto activo para la producción más limpia. Esto permitió optimizar procesos químicos a través de simulaciones que evaluaron diferentes variables y condiciones operativas, resultando en una reducción de los costos y del impacto ambiental (L. Xia et al., 2022). Los ingenieros pueden anticipar problemas y ajustar las condiciones antes de realizar experimentos costosos al utilizar la IA para modelar y simular procesos.

En una investigación adicional, se exploró el uso de técnicas impulsadas por datos y modelos de ML para la predicción en sistemas dinámicos. Esto facilitó el modelado de comportamientos complejos y no lineales, lo que es

crítico para la simulación de procesos químicos donde múltiples variables interactúan de manera dinámica (Ghadami & Epureanu, 2022). Al integrar IA en el modelado, los ingenieros pueden evaluar alternativas sostenibles de manera más efectiva, reduciendo la necesidad de pruebas experimentales extensivas.

Finalmente, en otro trabajo se destacó el impacto que tienen la ciencia de datos y la IA en diversas áreas de la ingeniería química, incluyendo la optimización de procesos y el control (Ashraf et al., 2021). La capacidad de la IA para analizar grandes volúmenes de datos y de identificar patrones facilita a los ingenieros la toma de decisiones fundamentadas en relación con el diseño y la operación de los procesos, lo que conduce a un incremento en la sostenibilidad y eficiencia.

Estas investigaciones demuestran como la IA está transformando el modelado y la simulación de procesos químicos complejos, permitiendo la evaluación de alternativas más sostenibles antes de su implementación, lo cual ha reducido la necesidad de ensayos experimentales costosos y ambientalmente dañinos, promoviendo un enfoque más sostenible en el campo de la ingeniería química.

4.7. Optimización de la cadena de suministro para la química verde

La producción y la distribución de productos químicos también han sido transformadas gracias al uso de la IA, pues ha permitido la optimización de las cadenas de suministro. Al integrar estas tecnologías, las empresas logran reducir su huella de carbono y disminuyen la generación de residuos en sus operaciones. Un aspecto destacado es su capacidad para predecir la demanda y ajustar los inventarios a partir del análisis de datos históricos y patrones de consumo, utilizando modelos de ML (Younis et al., 2022). Esto reduce la sobreproducción, disminuye la generación de residuos y optimiza el uso de recursos en la fabricación de productos químicos.

Por ejemplo, la empresa química BASF (*Badische Anilin- und Sodafabrik*, en alemán) ha integrado soluciones de IA para optimizar su logística y minimizar su impacto ambiental. La empresa utiliza algoritmos de IA para perfeccionar la planificación de la cadena de suministro, lo que reduce los tiempos de entrega y mejora la eficiencia en el uso de recursos (Modgil et al., 2022). De hecho, esta transformación en la cadena de suministro, promovida por el uso de la IA, tiene el potencial de generar valor, optimizando la eficiencia en la logística y en la administración de inventario (P. K. Singh, 2023). Además de potenciar la eficiencia operativa, también favorece la sostenibilidad medioambiental al reducir la huella de carbono derivada del transporte y la producción.

También se ha reportado la conexión entre la IA y la fortaleza de la cadena de suministro con el desarrollo sostenible y la innovación. Las empresas pueden descubrir oportunidades para reducir el desperdicio y mejorar la sostenibilidad de sus operaciones al incorporar IA en la gestión de la cadena de suministro. Por ejemplo, la optimización de las rutas de transporte puede resultar en una notable disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (H. Wang, 2024).

Otra investigación examinó el desarrollo de estrategias de logística verde impulsadas por IA, permitiendo a las empresas evaluar y optimizar sus prácticas logísticas, lo que permitió reducir el impacto ambiental de la distribución de productos químicos (X. Guo & Long, 2023). La implementación de tecnologías de logística verde mejoró la eficiencia operativa.

En otro ejemplo se analizó cómo la IA puede facilitar el análisis de la cadena de suministro durante crisis como la pandemia de COVID-19. La capacidad de la IA para procesar grandes volúmenes de datos y proporcionar información en tiempo real permitió a las empresas adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes del mercado, contribuyendo a minimizar el desperdicio y a optimizar la producción (R. Dubey et al., 2021).

En conjunto, estas investigaciones revelan cómo la IA está transformando la gestión de las cadenas de suministro en la producción y distribución de productos químicos. La Tabla 3 destaca cómo la IA ha sido aplicada en diversas áreas para promover y optimizar la QV. Cada una de las áreas de aplicación muestra cómo la IA permite mejorar la eficiencia de los procesos químicos con un enfoque más sostenible en la creación de materiales, la reducción del impacto ambiental y la optimización de la cadena de suministro. La capacidad de la IA para simular y modelar procesos complejos antes de su implementación reduce riesgos y costos, mientras que su uso en la automatización y control en tiempo real asegura procesos más limpios y seguros.

Tabla 3. Impacto de la inteligencia artificial en la promoción y optimización de la química verde: Áreas de aplicación y ejemplos.

Áreas de aplicación	Descripción	Ejemplos
Optimización de procesos químicos	La IA se utiliza para mejorar la eficiencia de las reacciones químicas, reduciendo residuos y consumo energético.	Algoritmos de IA que identifican condiciones óptimas de reacción para minimizar residuos en la síntesis de productos químicos.
Diseño de nuevos materiales y productos verdes	IA aplicada en el diseño de materiales sostenibles y productos químicos menos tóxicos y más eficientes.	Modelos de aprendizaje automático que aceleran el descubrimiento de polímeros biodegradables y catalizadores más eficientes.
Previsión y mitigación de impactos ambientales	Herramientas de IA que predicen el impacto ambiental de procesos y productos, facilitando decisiones más sostenibles.	Sistemas de IA que evalúan el ciclo de vida de productos químicos para minimizar su huella ecológica antes de la producción a escala industrial.
Desarrollo de catalizadores y reacciones más limpias	Diseño de catalizadores y procesos más limpios a través de la IA para mejorar la selectividad y reducir subproductos.	Uso de IA para crear catalizadores que aumentan la eficiencia de reacciones, reduciendo la generación de residuos tóxicos.
Automatización y control en tiempo real en procesos químicos	Implementación de IA para monitorear y ajustar procesos químicos en tiempo real, previniendo la contaminación.	Sistemas de control basados en IA que optimizan la dosificación de reactivos y minimizan errores en la producción química, garantizando procesos más seguros.
Modelado y simulación avanzados de procesos químicos	Simulación de procesos químicos complejos mediante IA, permitiendo la evaluación de alternativas más sostenibles.	Modelos predictivos que simulan la eficiencia de nuevos métodos de síntesis química antes de la implementación experimental, reduciendo costos y riesgos.
Optimización de la cadena de suministro para la química verde	IA en la optimización de la logística y cadena de suministro, reduciendo la huella de carbono y los residuos.	Algoritmos de IA que optimizan rutas de transporte y gestión de inventarios para minimizar el impacto ambiental en la producción y distribución de productos.

5. Abreviaciones y Acrónimos

2-MTHF	2-Metiltetrahydrofurano
AI	Artificial Intelligence
AOPs	Procesos avanzados de oxidación
AX	Arabinosilanos
BASF	Badische Anilin- und Soda-Fabrik

CFT	Catálisis de Transferencia de Fase
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
CTV	Catalizadores de tres vías
DCM	Diclorometano
EC	Economía circular
ECV	Evaluaciones del ciclo de vida

EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GC-MS	<i>Gas Chromatography-Mass Spectrometry</i>
HAPs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
HC	Hidrocarburos
IA	Inteligencia Artificial
L-L	Líquido-Líquido
L-L-L	Líquido-Líquido-Líquido
ML	<i>Machine Learning</i>
NMR	<i>Nuclear Magnetic Resonance</i>
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PBS	Polibutileno succinato
PE	Polietileno
PET	Polietilentereftalato
PLA	Ácido poliláctico
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Poli(cloruro de vinilo)
QSPR	Relaciones cuantitativas estructura-biodegradabilidad
QV	Química verde
SEP	Disolventes Eutécticos Profundos
SNE	Disolventes Naturales Eutécticos

6. Conclusiones

La QV juega un papel central para fomentar la sostenibilidad en una variedad de sectores industriales, abarcando desde la síntesis química y la generación de biocombustibles hasta la fabricación de materiales biodegradables y la utilización de disolventes más seguros. La implementación de los principios de la QV disminuye el impacto ambiental y potencia la eficiencia de los procesos y de los productos, al tiempo que reduce la toxicidad y la generación de residuos. Adicionalmente, la IA emerge como un catalizador estratégico en este ámbito, optimizando procesos y promoviendo la innovación en la QV, lo que facilita alcanzar un equilibrio entre el desarrollo industrial y la responsabilidad ambiental.

En el futuro, es necesario continuar investigando cómo la IA puede seguir mejorando la QV, particularmente en campos como la anticipación de impactos ambientales, la creación de nuevos materiales sostenibles y la automatización de procesos industriales. La integración de estas tecnologías tiene el potencial de avanzar en la reducción de la huella ecológica de la industria química, además de agilizar la transición hacia una economía más circular y sostenible, en la que los principios de la QV estén firmemente arraigados en todas las fases de producción.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el soporte brindado.

Referencias

- Ahmad, N., & Tariq, H. (2021). Azolla as Waste Decomposer and Bio-fertilizer: A Review. *Journal of Applied Research in Plant Sciences*, 2(1), 108-116. <https://doi.org/10.38211/joarps.2020.2.1.14>
- Alarcón, H., Tolmos, M., Villacrés, N., & Huarote, E. (2021). Química Verde – Una Alternativa Eco-Amigable En La Obtención De Nanopartículas De Ag0. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(3). <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i3.354>
- Ali, S., Al-Rashida, M., Younus, H. A., Moin, S. T., & Hameed, A. (2020). Piperidinium-Based Deep Eutectic Solvents: Efficient and Sustainable Eco-Friendly Medium for One-Pot *N*-Heterocycles Synthesis. *ChemistrySelect*, 5(41), 12697-12703. <https://doi.org/10.1002/slct.202002374>
- Amamoto, Y., Koganemaru, C., Kojio, K., Takahara, A., Yamamoto, S., Okazawa, K., Tsuji, Y., Aritake, T., & Terayama, K. (2023). *A Machine Learning Approach to Designing Tough and Degradable Polyamides Based on Multiblock Structures*. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-jm387>
- Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). Green Chemistry: Principles and Practice. *Chem. Soc. Rev.*, 39(1), 301-312. <https://doi.org/10.1039/B918763B>
- Anastas, P. T. (2018). Origins and Early History of Green Chemistry. En I. T. Horváth & M. Malacria, *Series on Chemistry, Energy and the Environment* (Vol. 0, pp. 1-17). WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789813228115_0001
- Anastas, P. T., & Kirchoff, M. M. (2002). Origins, Current Status, and Future Challenges of Green Chemistry. *Accounts of Chemical Research*, 35(9), 686-694. <https://doi.org/10.1021/ar010065m>
- Ardila-Fierro, K. J., & Hernández, J. G. (2021). Sustainability Assessment of Mechanochemistry by Using the Twelve Principles of Green Chemistry. *ChemSusChem*, 14(10), 2145-2162. <https://doi.org/10.1002/cssc.202100478>
- Armenta, S., Esteve-Turrillas, F. A., Garrigues, S., & de la Guardia, M. (2022). Alternative Green Solvents in Sample Preparation. *Green Analytical Chemistry*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.greac.2022.100007>
- Arteaga-Crespo, Y., Carballo-Abreu, L. R., Sotolongo-Sospedra, R., Hevia-Jiménez, Y., & Tacoronte-Morales, J. E. (2010). Rosin of Cuban Pines for the Control of Tropical Illnesses Transmitted by Mollusks. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVI(1), 31-36. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2009.04.009>
- Ashraf, C., Joshi, N., Beck, D. A. C., & Pfaendtner, J. (2021). Data Science in Chemical Engineering: Applications to Molecular Science. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 12(1), 15-37. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-101220-102232>
- Banger, A., Srivastava, A., Yadav, A., Sharma, R., & Srivastava, M. (2023). Application of Green Solvent in Green Chemistry: An overview. *Green Chemistry & Technology Letters*, 9(1), 01-14. <https://doi.org/10.18510/gctl.2023.911>
- Barna, C., Zbucea, A., & Stănescu, S. M. (2023). Social Economy Enterprises Contributing to the Circular Economy and the Green Transition in Romania. *CIRIEC-España, revista de economía pública, social y cooperativa*, 107, 47-69. <https://doi.org/10.7203/CIRIEC-E.107.21738>
- Bello, M., & Bahena Culhuac, E. (2024). Ecologización de la industria farmacéutica: La química verde en el desarrollo de medicamentos. *Revista Digital Universitaria*, 25(1). <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2024.25.1.9>
- Benitez-Villalba, J. C., Dorival-García, N., Villalba-Villalba, N. M., & Vilchez, J. L. (2018). Validation of an Analysis Method for Benzophenones in a Soil Sample Through Pressurized Liquid Extraction and Liquid Chromatograph Coupled to Tandem Mass Spectrometry. *Reportes científicos de la FACEN*, 9(1), 51-63. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2018.9.1.51>
- Bernini, R., Campo, M., Cassiani, C., Fochetti, A., Ieri, F., Lombardi, A., Urciuoli, S., Vignolini, P., Villanova, N., & Vita, C. (2024).

- Polyphenol-Rich Extracts from Agroindustrial Waste and Byproducts: Results and Perspectives According to the Green Chemistry and Circular Economy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(23), 12871-12895. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c00945>
- Boateng, I. D. (2022). A Critical Review of Emerging Hydrophobic Deep Eutectic Solvents' Applications in Food Chemistry: Trends and Opportunities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(38), 11860-11879. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c05079>
- Bordiga, M., Kelebek, H., & Selli, S. (2023). Special Issue on "Green Chemistry in Food Processing". *International Journal of Food Science & Technology*, 58(7), 3933-3934. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16419>
- Borreguero, A. M., Valverde, J. L., García-Vargas, J. M., & Sánchez-Silva, L. (2019). Simulator-Based Learning in the Teaching of Chemical Engineering. *Computer Applications in Engineering Education*, 27(5), 1267-1276. <https://doi.org/10.1002/cae.22150>
- Cannavacciuolo, C., Pagliari, S., Frigerio, J., Giustra, C. M., Labra, M., & Campone, L. (2022). Natural Deep Eutectic Solvents (NADESs) Combined with Sustainable Extraction Techniques: A Review of the Green Chemistry Approach in Food Analysis. *Foods*, 12(1), 56. <https://doi.org/10.3390/foods12010056>
- Carrillo, G., Eimer, G., Vaschetto, E. G., & Ferrero, G. O. (2022). Síntesis de sílicas mesoporosas a partir de moldeantes renovables para el desarrollo de catalizadores heterogéneos enzimáticos y su aplicación en reacciones de esterificación de interés en química fina. *AJEA*, 15. <https://doi.org/10.33414/ajea.1094.2022>
- Castañedo Hernández, Z. A., Meneses-Marcel, A., Aguila Jiménez, E., Seijo Wals, M., & Diaz Solares, M. (2022). Evaluación de la toxicidad aguda del IHPLUS® sobre Eisenia fetida. *Ciencias Agronómicas*, 39, e019. <https://doi.org/10.35305/agro39.e019>
- Castro-Caicedo, A. J., Alejano, L. R., Monsalve Oliveros, J. E., & Bernal Montiel, A. (2019). Diseño geotécnico de pilares en minas subterráneas de vetas auríferas en casos de Colombia. *DYNA*, 86(209), 337-346. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.74041>
- Chen, T.-L., Kim, H., Pan, S.-Y., Tseng, P.-C., Lin, Y.-P., & Chiang, P.-C. (2020). Implementation of Green Chemistry Principles in Circular Economy System Towards Sustainable Development Goals: Challenges and Perspectives. *Science of The Total Environment*, 716, 136998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136998>
- Chiang, L. H., Braun, B., Wang, Z., & Castillo, I. (2022). Towards Artificial Intelligence at Scale in the Chemical Industry. *AIChE Journal*, 68(6), e17644. <https://doi.org/10.1002/aic.17644>
- Chook, K. Y., Aroua, M. K., & Gew, L. T. (2023). Enzyme Biocatalysis for Sustainability Applications in Reactors: A Systematic Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(28), 10800-10812. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00832>
- Cosio, M. N., Cardenal, A. D., Maity, A., Hyun, S.-M., Akwaowo, V. E., Hoffman, C. W., Powers, T. M., & Powers, D. C. (2020). Exploring Green Chemistry with Aerobic Hypervalent Iodine Catalysis. *Journal of Chemical Education*, 97(10), 3816-3821. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00410>
- Cuevas-García, R., & Bravo Nava, J. (2021). Producción de combustibles renovables. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30), 1e-50e. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69635>
- Cunha, S. D. D., & Silveira Matosa, J. (2017). Além da caipirinha: Cachaça como solvente para síntese orgânica e extração de pigmento. *Química Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170110>
- Davies, J. C., & Hirst, J. D. (2024). Software Tools for Green and Sustainable Chemistry. En *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* (p. B9780443157424000491). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15742-4.00049-1>
- DeVito, S. C. (2016). On the Design of Safer Chemicals: A Path Forward. *Green Chemistry*, 18(16), 4332-4347. <https://doi.org/10.1039/C6GC00526H>
- DeVito, S. C., Keenan, C., & Lazarus, D. (2015). Can Pollutant Release and Transfer Registers (prtrs) Be Used to Assess Implementation and Effectiveness of Green Chemistry Practices? A Case Study Involving the Toxics Release Inventory (tri) and Pharmaceutical Manufacturers. *Green Chemistry*, 17(5), 2679-2692. <https://doi.org/10.1039/C5GC00056D>
- Díaz Molina, J. M., Morales Toscano, A. C., Fernández Rojas, M., Briceno-Gamba, N., Villalba Rey, D., & Sánchez, M. D. R. (2019). Determinación y análisis estadístico de la composición de los gases producidos en un piloto de recobro mejorado. *Revista ION*, 32(1), 63-73. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n1-2019006>
- Domingues, L., Duarte, A. R. C., & Jesus, A. R. (2024). How Can Deep Eutectic Systems Promote Greener Processes in Medicinal Chemistry and Drug Discovery? *Pharmaceuticals*, 17(2), 221. <https://doi.org/10.3390/ph17020221>
- Doria Serrano, Ma. D. C. (2009). Química verde: Un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente. *Educación Química*, 20(4), 412-420. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30044-2](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30044-2)
- Dubey, A. V., & Kumar, A. V. (2018). Cu(II)-Glucose: Sustainable Catalyst for the Synthesis of Quinazolinones in a Biomass-Derived Solvent 2-MethylTHF and Application for the Synthesis of Diproqualone. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(11), 14283-14291. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02940>
- Dubey, R., Bryde, D. J., Blome, C., Roubaud, D., & Giannakis, M. (2021). Facilitating Artificial Intelligence Powered Supply Chain Analytics Through Alliance Management During the Pandemic Crises in the B2b Context. *Industrial Marketing Management*, 96, 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.05.003>
- Dwivedi, K. D., Marri, S. R., Nandigama, S. K., & Chowhan, R. L. (2018). An Efficient Solvent-Free Synthesis of 3-Methyl-4-Nitro-5-Styrylisoxazoles Using Solid Nano-Titania. *Journal of Chemical Sciences*, 130(9), 129. <https://doi.org/10.1007/s12039-018-1534-0>
- Dwivedi, K. D., Reddy, M. S., Kumar, N. S., & Chowhan, L. R. (2019). Facile Synthesis of 3-Hydroxy Oxindole by a Decarboxylative Aldol Reaction of β -Ketoacid and Isatin in Wersa. *ChemistrySelect*, 4(29), 8602-8605. <https://doi.org/10.1002/slct.201900150>
- Erickson, M., Vasyutyn, D., Ngongang, M., Daghighi, A., Szwiec, S., Casañola-Martin, G., & Rasulev, B. (2024). *In Silico Prediction of the Biodegradability of Chlorinated Compounds: Application of Quantitative Structure-Biodegradability Relationship Approach*. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-p7dx4>
- Erythropel, H. C., Börmann, A., Nicell, J. A., Leask, R. L., & Maric, M. (2018). Designing Green Plasticizers: Linear Alkyl Diol Dibenzoate Plasticizers and a Thermally Reversible Plasticizer. *Polymers*, 10(6), 646. <https://doi.org/10.3390/polym10060646>
- Estévez, C. (2005). La química verde ya es una realidad. *Daphnia*, 38. <https://www.daphnia.es/revista/38/articulo/609/La-quimica-verd-e-ya-es-una-realidad>
- Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación. *Madera y Bosques*, 20(3), 11-24. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.203148>
- Fedie, R. L., McNeff, C. V., McNeff, C. V., McNeff, L. C., Greuel, P. G., Yan, B., Jenkins, J. A., Brethorst, J. T., Frost, G. B., & Hoye, T. R. (2022). Hydrothermal Catalysis of Waste Greases into Green Gasoline, Jet, and Diesel Biofuels in Continuous Flow Supercritical Water. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 16(2), 349-369. <https://doi.org/10.1002/bbb.2322>
- Ferreira, L. C., Moreira, B. R. D. A., Montagnolli, R. N., Prado, E. P., Viana, R. D. S., Tomaz, R. S., Cruz, J. M., Bidoia, E. D., Frias, Y. A., & Lopes, P. R. M. (2021). Green Manure Species for Phytoremediation of Soil With Tebutiuron and Vinasse. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 613642. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.613642>
- Flink, W. H., Abraham, M. A., & Matthews, M. A. (Eds.). (2008). *Innovations in Industrial and Engineering Chemistry: A Century of Achievements and Prospects for the New Millennium* (Vol. 1000). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2009-1000>
- Foppa, L., Ghiringhelli, L. M., Girgsdies, F., Hashagen, M., Kube, P., Hävecker, M., Carey, S. J., Tarasov, A., Kraus, P., Rosowski, F., Schlögl, R., Trunschke, A., & Scheffler, M. (2021). Materials genes of heterogeneous catalysis from clean experiments and artificial intelligence. *MRS Bulletin*, 46(11), 1016-1026. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00165-6>
- García-Curiel, L., Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Pérez-Escalante, E., & Paz-Samaniego, R. (2024). Evaluating the application of an arabinoxylan-rich fraction from brewers' spent grain as a release modifier of drugs. *Natural Product Research*, 38(10), 1759-1765. <https://doi.org/10.1080/14786419.2023.2214841>
- Garzón García, G., Guillermo Morales, J., & Lopez, L. A. (2018). Evaluación del grado de verdor de la Síntesis del Complejo CuCl₂(DMSO)₂ a Escala Micro Empleando la Métrica Escala Verde. *BISTUA Revista De La Facultad De Ciencias Básicas*, 16(2). <https://doi.org/10.24054/01204211.v2.n2.2017.2878>

- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Ghadami, A., & Epureanu, B. I. (2022). Data-driven prediction in dynamical systems: Recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 380(2229), 20210213. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0213>
- Gómez, E. A., Ríos, L. A., & Peña, J. D. (2013). Efecto del Pretratamiento de Biomasa Maderera en el Rendimiento a Etanol. *Información Tecnológica*, 24(5), 113-122. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000500013>
- González, F., Retamal, C., Silva, L., Cerda, P., Medel, P., Solari, S., Mellado, R., & Ríos, J. C. (2019). Caracterización de las consultas realizadas a un Centro de Información Toxicológica por productos de aseo y productos cosméticos en niños. *Revista Chilena de Pediatría*, 90(5). <https://doi.org/10.32641/rchped.v90i5.1017>
- Goode, S. R., Wissinger, J. E., & Wood-Black, F. (2021). Introducing the *Journal of Chemical Education* 's Special Issue on Chemical Safety Education: Methods, Culture, and Green Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 98(1), 1-6. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01459>
- Gricourt, G., Meyer, P., Duigou, T., & Faulon, J.-L. (2024). Artificial Intelligence Methods and Models for Retro-Biosynthesis: A Scoping Review. *ACS Synthetic Biology*, 13(8), 2276-2294. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.4c00091>
- Grieger, K., Schiro, A., & Leontyev, A. (2022). Development of the Assessment of Student Knowledge of Green Chemistry Principles (ASK-GCP). *Chemistry Education Research and Practice*, 23(3), 531-544. <https://doi.org/10.1039/D1RP00291K>
- Guajardo, N., Müller, C. R., Schreiber, R., Carlesi, C., & Domínguez de María, P. (2016). Deep Eutectic Solvents for Organocatalysis, Biotransformations, and Multistep Organocatalyst/Enzyme Combinations. *ChemCatChem*, 8(6), 1020-1027. <https://doi.org/10.1002/cctc.201501133>
- Guevara-Fefer, P., Sánchez-Ramos, G., De-Jesús-Romero, Y. A., & Niño-García, N. (2016). Jatropha sotoi-nunyezii y Jatropha curcas, especies de Tamaulipas: Una comparación desde la perspectiva de los biocombustibles. *CienciaUAT*, 11(1), 91. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v11i1.769>
- Guo, J., Haghshenas, Y., Jiao, Y., Kumar, P., Yakobson, B. I., Roy, A., Jiao, Y., Regenauer-Lieb, K., Nguyen, D., & Xia, Z. (2024). Rational Design of Earth-Abundant Catalysts toward Sustainability. *Advanced Materials*, 2407102. <https://doi.org/10.1002/adma.202407102>
- Guo, X., & Long, X. (2023). Research on the Development Strategy of E-Business Green Logistics Based on AHP. *E3S Web of Conferences*, 372, 02003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337202003>
- Hayagan, N., Gaalich, I., Loubet, P., Croguennec, L., Aymonier, C., Philippot, G., & Olchowka, J. (2024). Challenges and Perspectives for Direct Recycling of Electrode Scraps and End-of-Life Lithium-ion Batteries. *Batteries & Supercaps*, 7(6), e202400120. <https://doi.org/10.1002/batt.202400120>
- Hernández Cruz, A., & Santacruz Ortega, H. (2023). Detección de metales en agua a través de teléfonos inteligentes. *EPISTEMUS*, 18(35). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i35.299>
- Ibarra-Pérez, D., Faba, S., Hernández-Muñoz, V., Smith, C., Galotto, M. J., & Garmulewicz, A. (2023). Predicting the Composition and Mechanical Properties of Seaweed Bioplastics from the Scientific Literature: A Machine Learning Approach for Modeling Sparse Data. *Applied Sciences*, 13(21), 11841. <https://doi.org/10.3390/app132111841>
- Jad, Y. E., Kumar, A., El-Faham, A., De La Torre, B. G., & Albericio, F. (2019). Green Transformation of Solid-Phase Peptide Synthesis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(4), 3671-3683. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06520>
- Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N. K., & Meena, R. K. (2021). Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(1), 355-374. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01074-x>
- Kandel Gambarte, P. C., Rovedatti, M. G., Ferloni, A., Pereiro, N., Cruz, M. G., Aragone, S., Figar, S. B., Dawidowski, A. R., & Wolansky, M. J. (2022). Percepción del riesgo de toxicidad por exposición a plaguicidas domésticos en hogares con niños de 0 a 3 años. *Andes Pediatría*, 93(5), 668. <https://doi.org/10.32641/andespediatr.v93i5.4067>
- Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. (2018). The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- Kim, S., Ga, S., Bae, H., Sluyter, R., Konstantinov, K., Shrestha, L. K., Kim, Y. H., Kim, J. H., & Ariga, K. (2024). Multidisciplinary approaches for enzyme biocatalysis in pharmaceuticals: Protein engineering, computational biology, and nanoarchitectonics. *EES Catalysis*, 2(1), 14-48. <https://doi.org/10.1039/D3EY00239J>
- Kohse-Höinghaus, K., Obwald, P., Cool, T. A., Kasper, T., Hansen, N., Qi, F., Westbrook, C. K., & Westmoreland, P. R. (2010). Biofuel Combustion Chemistry: From Ethanol to Biodiesel. *Angewandte Chemie International Edition*, 49(21), 3572-3597. <https://doi.org/10.1002/anie.200905335>
- Kosnik, M. B., Hauschild, M. Z., & Fantke, P. (2022). Toward Assessing Absolute Environmental Sustainability of Chemical Pollution. *Environmental Science & Technology*, 56(8), 4776-4787. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06098>
- Krasnodębski, M. (2023). An unlikely bifurcation: History of sustainable (but not Green) chemistry. *Foundations of Chemistry*, 25(3), 463-484. <https://doi.org/10.1007/s10698-023-09474-x>
- Kumar, S., Honnappanavar, M., & Hn, S. (2024). Impact of in-situ green manuring on soil properties and fertility under regenerative farming: A case study of Akshayakalpa farm in Tiptur, India. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(5S), 112-115. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i5Sb.721>
- Kumarasinghe, K. G. U. R., Kandambi, H. H., & Samaradiwakara, D. M. T. A. (2023). Recent Advances in Green Approaches for Synthesis of Oxindole Derivatives. *Vidyodaya Journal of Science*, 1(s1). <https://doi.org/10.31357/vjs.v1s1.6715>
- Kurańska, M., Ptak, M., Malewska, E., Prociak, A., Barczewski, M., Dymek, M., Fernandes, F. A. O., De Sousa, R. A., Polaczek, K., Studniarz, K., & Uram, K. (2023). Cork Porous Biocomposites with Polyurethane Matrix Modified with Polyol Based on Used Cooking Oil. *Materials*, 16(8), 3032. <https://doi.org/10.3390/ma16083032>
- Leahy, D. K., Tucker, J. L., Mergelsberg, I., Dunn, P. J., Kopach, M. E., & Purohit, V. C. (2013). Seven Important Elements for an Effective Green Chemistry Program: An IQ Consortium Perspective. *Organic Process Research & Development*, 17(9), 1099-1109. <https://doi.org/10.1021/op400192h>
- Li, F., Zhang, K., Hao, A., Yin, C., & Wu, G. (2021). Environmental Behavior Spillover or Public Information Induction: Consumers' Intention to Pay a Premium for Rice Grown with Green Manure as Crop Fertilizer. *Foods*, 10(6), 1285. <https://doi.org/10.3390/foods10061285>
- Li, M., Rao, C., Ye, X., Wang, M., Yang, B., Wang, C., Guo, L., Xiong, Y., & Cui, X. (2023). Applications for natural deep eutectic solvents in Chinese herbal medicines. *Frontiers in Pharmacology*, 13, 1104096. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.1104096>
- Li, Y., Fabiano-Tixier, A. S., Tomao, V., Cravotto, G., & Chemat, F. (2013). Green ultrasound-assisted extraction of carotenoids based on the bio-refinery concept using sunflower oil as an alternative solvent. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2012.07.005>
- Liao, J. C., Mi, L., Pontrelli, S., & Luo, S. (2016). Fuelling the future: Microbial engineering for the production of sustainable biofuels. *Nature Reviews Microbiology*, 14(5), 288-304. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.32>
- Liao, M., Lan, K., & Yao, Y. (2022). Sustainability implications of artificial intelligence in the chemical industry: A conceptual framework. *Journal of Industrial Ecology*, 26(1), 164-182. <https://doi.org/10.1111/jiec.13214>
- Linder, M. (2017). Ripe for disruption: Reimagining the role of green chemistry in a circular economy. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 10(4), 428-435. <https://doi.org/10.1080/17518253.2017.1392618>
- Liu, M., Guo, J., Gu, Y., Gao, J., Liu, F., & Yu, S. (2018). Pushing the Limits in Alcoholysis of Waste Polycarbonate with DBU-Based Ionic Liquids under Metal- and Solvent-Free Conditions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(10), 13114-13121. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02650>
- Liu, X., Cai, C., Zhao, W., Peng, H.-J., & Wang, T. (2022). Machine Learning-Assisted Screening of Stepped Alloy Surfaces for C₁ Catalysis. *ACS Catalysis*, 12(8), 4252-4260. <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c00648>

- Lu, T., Reimonn, G., Morose, G., Yu, E., & Chen, W.-T. (2021). Removing Acrylic Conformal Coating with Safer Solvents for Re-Manufacturing Electronics. *Polymers*, 13(6), 937. <https://doi.org/10.3390/polym13060937>
- Luo, Y., Iqbal, A., He, L., Zhao, Q., Wei, S., Ali, I., Ullah, S., Yan, B., & Jiang, L. (2020). Long-Term No-Tillage and Straw Retention Management Enhances Soil Bacterial Community Diversity and Soil Properties in Southern China. *Agronomy*, 10(9), 1233. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091233>
- Lv, W., Wang, Z., Cao, H., Sun, Y., Zhang, Y., & Sun, Z. (2018). A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(2), 1504-1521. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03811>
- Ma, Q. (2024). Application Of Advanced Oxidation Process Based on Ozone in Water Treatment. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 96, 139–143. <https://doi.org/10.54097/5cnrfy90>
- Mabesoone, M. F. J., Palmans, A. R. A., & Meijer, E. W. (2020). Solute–Solvent Interactions in Modern Physical Organic Chemistry: Supramolecular Polymers as a Muse. *Journal of the American Chemical Society*, 142(47), 19781-19798. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c09293>
- Malafeev, K. V., Apicella, A., Incarnato, L., & Scarfato, P. (2023). Understanding the Impact of Biodegradable Microplastics on Living Organisms Entering the Food Chain: A Review. *Polymers*, 15(18), 3680. <https://doi.org/10.3390/polym15183680>
- Mali, S., Shinde, S., Damte, S., & Patil, S. (2018). Synergistic effect of natural chickpea leaf exudates acids in heterocyclization: A greener protocol for benzopyran synthesis. *Royal Society Open Science*, 5(2), 170333. <https://doi.org/10.1098/rsos.170333>
- Martínez Arellano, A. C., Castillo Miranda, C. A., & Morales Cepeda, A. B. (2017). Geles de Hidroxipropilcelulosa y Poli(Acrilamida) Sintetizados por Radiación de Microondas (MAOS). *Química Hoy*, 7(4), 4. <https://doi.org/10.29105/qh7.4-184>
- Martínez, J., Cortés, J. F., & Miranda, R. (2022). Green Chemistry Metrics, A Review. *Processes*, 10(7), 1274. <https://doi.org/10.3390/pr10071274>
- Martínez-Guerra, E., & Gude, V. (2017). Assessment of Sustainability Indicators for Biodiesel Production. *Applied Sciences*, 7(9), 869. <https://doi.org/10.3390/app7090869>
- Menges, N. (2018). The Role of Green Solvents and Catalysts at the Future of Drug Design and of Synthesis. En H. E.-D. M. Saleh & M. Koller (Eds.), *Green Chemistry*. Intech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71018>
- Meramo-Hurtado, S. I., Moreno-Sader, K., & González Delgado, A. D. (2020). Evaluación ambiental de la producción a larga escala de micropelotas de quitosano modificadas con tiourea como alternativa de valorización de residuos en el sector camaronicultor. *Prospectiva*, 18(1). <https://doi.org/10.15665/rp.v18i1.2100>
- Modgil, S., Gupta, S., Stekelorum, R., & Laguir, I. (2022). AI technologies and their impact on supply chain resilience during COVID-19. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 52(2), 130-149. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2020-0434>
- Morales, C. G., Castolo, A. A., & Rodríguez, M. A. (2020). Designing Safer Chemicals. En A. Sáenz-Galindo, A. O. Castañeda-Facio, & R. Rodríguez-Herrera (Eds.), *Green Chemistry and Applications* (1.ª ed., pp. 60-83). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429291166-5>
- Mozes-Koch, R., Tanne, E., Brodecki, A., Yehuda, R., Gover, O., Rabinowitch, H. D., & Sela, I. (2017). Expression of the entire polyhydroxybutyrate operon of *Ralstonia eutropha* in plants. *Journal of Biological Engineering*, 11(1), 44. <https://doi.org/10.1186/s13036-017-0062-7>
- Mulyani, S., Lutfiyani, A., & Mahardiani, L. (2023). Development of a Virtual Chemistry Laboratory Based on Green Chemistry to Increase Technological Literacy Focusing on Factors Affecting Reaction Rates. *PAEDAGOGIA*, 26(1), 48. <https://doi.org/10.20961/paedagogia.v26i1.71851>
- Nabi, A. A., Magsi, M. A., Ramakrishnan, S., & Tunio, F. H. (2020). *The Role of Raw Material Prices in Renewable Energy Diffusion*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-42420/v1>
- Nadejde, C., Neamtu, M., & Creanga, D. (2015). Environment-Friendly Magnetic Fluids for Wastewater Remediation—Synthesis and Characterization. *Acta Physica Polonica A*, 127(2), 647-649. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.647>
- Namdeti, R. (2023). Artificial Intelligence in Chemical Engineering: Past, Present, and Future Perspectives. *Journal of Chemical Health Risks*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.52783/jchr.v13.i6.2058>
- Narváez-Montañón, M. D. J., Mendoza-López, Ma. R., Sánchez-Viveros, G., Almaraz-Suarez, J. J., & Argumedo-Delira, R. (2023). Actividad inhibitoria de extractos alcohólicos de hongos comestibles contra *Rhizoctonia solani*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(4), 615-625. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i4.3200>
- Nava-Pérez, E., García-Gutiérrez, C., Camacho-Báez, J. R., & Vázquez-Montoya, E. L. (2012). Bioplaguicidas: Una opción para el control biológico de plagas. *Ra Ximhai*, 17-30. <https://doi.org/10.35197/rx.08.03.e2.2012.03.en>
- Navarro-Espinoza, S., Meza-Figueroa, D. M., Pedroza-Montero, M. R., & Soto-Puebla, D. (2022). Catalizadores de tres vías: Historia, funcionamiento y ventajas ambientales. *EPISTEMUS*, 16(33). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.240>
- Ncube, A., Mtetwa, S., Bukhari, M., Fiorentino, G., & Passaro, R. (2023). Circular Economy and Green Chemistry: The Need for Radical Innovative Approaches in the Design for New Products. *Energies*, 16(4), 1752. <https://doi.org/10.3390/en16041752>
- Nedjimi, B. (2021). Phytoremediation: A sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. *SN Applied Sciences*, 3(3), 286. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4>
- Nien, H.-H., & Li, B.-R. (2023). La aplicación y práctica de la química en dispositivos ponibles para el análisis de fluidos corporales. *Revista de Química*, 37(2), 21-32. <https://doi.org/10.18800/quimica.202302.003>
- Obeidat, S. M., Abdalla, S., & Al Bakri, A. A. K. (2023). Integrating green human resource management and circular economy to enhance sustainable performance: An empirical study from the Qatari service sector. *Employee Relations: The International Journal*, 45(2), 535-563. <https://doi.org/10.1108/ER-01-2022-0041>
- Okuyelu, O., & Adaji, O. (2024). AI-Driven Real-time Quality Monitoring and Process Optimization for Enhanced Manufacturing Performance. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*, 39(4), 81-89. <https://doi.org/10.9734/jamcs/2024/v39i41883>
- O'Neil, N. J., Scott, S., Relph, R., & Ponnusamy, E. (2021). Approaches to Incorporating Green Chemistry and Safety into Laboratory Culture. *Journal of Chemical Education*, 98(1), 84-91. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00134>
- Ortiz, A., & Sansinenea, E. (2022). The Role of Beneficial Microorganisms in Soil Quality and Plant Health. *Sustainability*, 14(9), 5358. <https://doi.org/10.3390/su14095358>
- Paiva, A., Craveiro, R., Aroso, I., Martins, M., Reis, R. L., & Duarte, A. R. C. (2014). Natural Deep Eutectic Solvents – Solvents for the 21st Century. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(5), 1063-1071. <https://doi.org/10.1021/sc500096j>
- Pájaro Castro, N. P., & Olivero Verbel, J. T. (2011). Química verde: Un nuevo reto. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 21(2), 169-182.
- Patra, J. K., Das, G., Fraceto, L. F., Campos, E. V. R., Rodríguez-Torres, M. D. P., Acosta-Torres, L. S., Diaz-Torres, L. A., Grillo, R., Swamy, M. K., Sharma, S., Habtemariam, S., & Shin, H.-S. (2018). Nano based drug delivery systems: Recent developments and future prospects. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s12951-018-0392-8>
- Pellegrini Pessoa, F. L., Villardi, H., Da Silva Calixto, E. E., Durão Vieira, E., Barbosa De Souza, A. L., & Souza Machado, B. A. (2020). Integrated Soybean Biorefinery. En V. Beschkov (Ed.), *Biorefinery Concepts, Energy and Products*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88111>
- Peñas-Garzón, M., Moreno-Medina, I., Bedia, J., & Bolver, C. (2023). Síntesis y evaluación de fotocatalizadores TiO₂/carbón activo: Un enfoque multidisciplinar y cooperativo para estudiantes de ingeniería química. *Educación Química*, 34(1), 128-155. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.1.82972>
- Peralta-Yahya, P. P., Zhang, F., Del Cardayre, S. B., & Keasling, J. D. (2012). Microbial engineering for the production of advanced biofuels. *Nature*, 488(7411), 320-328. <https://doi.org/10.1038/nature11478>
- Pérez-Flores, J. G., Castañeda-Ovando, A., Contreras-López, E., Bautista-Avila, M., Velázquez-González, C., & Cariño-Cortés, R. (2017). Desarrollo de biopelículas termoplastificadas a base de arabinosidos extraídos del bagazo de cebada. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 4, 37-43. <https://doi.org/10.29057/aactm.v4i4.9378>
- Pérez-Flores, J. G., Castañeda-Ovando, A., Velázquez-González, C., Bautista-Avila, M., & Contreras-López, E. (2022).

- Arabinosilanos recuperados de bagazo de cebada y su aplicación como vehículos de liberación de metformina. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 5(5), 163-167. <https://doi.org/10.29057/aactm.v5i5.9128>
- Pérez-Flores, J. G., Contreras-López, E., Castañeda-Ovando, A., Pérez-Moreno, F., Aguilar-Arteaga, K., Álvarez-Romero, G. A., & Téllez-Jurado, A. (2019). Physicochemical characterization of an arabinosilanol-rich fraction from brewers' spent grain and its application as a release matrix for caffeine. *Food Research International*, 116, 1020-1030. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.041>
- Pérez-Flores, J. G., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & Olloqui, E. J. (2024). Arabinosilanos matrixes as a potential material for drug delivery systems development—A bibliometric analysis and literature review. *Heliyon*, 10(3), e25445. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25445>
- Pérez-Flores, J. G., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Paz-Samaniego, R., Contreras-López, E., & Hernández-Hernández, A. A. (2022). Integración de Subproductos Agroalimentarios Dentro de una Economía Circular: El Caso de los Arabinosilanos Obtenidos de Subproductos del Procesamiento de Cereales. *Quimiofilia*, 1(1), 12-16. <https://doi.org/10.56604/qfla2022121216>
- Phillips, K. A., Wambaugh, J. F., Grulke, C. M., Dionisio, K. L., & Isaacs, K. K. (2017). High-throughput screening of chemicals as functional substitutes using structure-based classification models. *Green Chemistry*, 19(4), 1063-1074. <https://doi.org/10.1039/C6GC02744J>
- Piątek, J., Afyon, S., Budnyak, T. M., Budnyk, S., Sipponen, M. H., & Slabon, A. (2021). Sustainable Li-Ion Batteries: Chemistry and Recycling. *Advanced Energy Materials*, 11(43), 2003456. <https://doi.org/10.1002/aenm.202003456>
- Pineda, X., Chica, L. P., Sánchez, J. H., Velásquez, J. A., Alarcón, E. A., Villa, A. L., & Martínez, J. J. D. (2015). Desarrollo de un micro-reactor de lecho empacado para la síntesis de acetato de metilo. *Revista investigaciones aplicadas*, 9(1), 37-43. <https://doi.org/10.18566/ria.v09n01.a07>
- Poliakoff, M., & George, M. W. (2020). Manufacturing chemicals with light: Any role in the circular economy? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2176), 20190260. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0260>
- Pražanová, A., Plachý, Z., Kočí, J., Fridrich, M., & Knap, V. (2024). Direct Recycling Technology for Spent Lithium-Ion Batteries: Limitations of Current Implementation. *Batteries*, 10(3), 81. <https://doi.org/10.3390/batteries10030081>
- Pu, J., Li, Z., Tang, H., Zhou, G., Wei, C., Dong, W., Jin, Z., & He, T. (2023). Response of soil microbial communities and rice yield to nitrogen reduction with green manure application in karst paddy areas. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1070876. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1070876>
- Qaswar, M., Huang, J., Ahmed, W., Liu, S., Li, D., Zhang, L., Liu, L., Xu, Y., Han, T., Du, J., Gao, J., & Zhang, H. (2019). Substitution of Inorganic Nitrogen Fertilizer with Green Manure (GM) Increased Yield Stability by Improving C Input and Nitrogen Recovery Efficiency in Rice Based Cropping System. *Agronomy*, 9(10), 609. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100609>
- Quivelli, A. F., Marinò, M., Vitale, P., García-Álvarez, J., Perna, F. M., & Capriati, V. (2022). Ligand-Free Copper-Catalyzed Ullmann-Type C–O Bond Formation in Non-Innocent Deep Eutectic Solvents under Aerobic Conditions. *ChemSusChem*, 15(1), e202102211. <https://doi.org/10.1002/cssc.202102211>
- Rabalao, T. M., Ndaba, B., Roopnarain, A., & Vatsha, B. (2022). Towards a circular economy: The influence of extraction methods on phytosynthesis of metallic nanoparticles and their impact on crop growth and protection. *JSFA Reports*, 2(5), 208-221. <https://doi.org/10.1002/jsf2.44>
- Ratan, Z. A., Haidere, M. F., Nurunnabi, Md., Shahriar, S. Md., Ahammad, A. J. S., Shim, Y. Y., Reaney, M. J. T., & Cho, J. Y. (2020). Green Chemistry Synthesis of Silver Nanoparticles and Their Potential Anticancer Effects. *Cancers*, 12(4), 855. <https://doi.org/10.3390/cancers12040855>
- Ren, D., Ren, S., Lin, Y., Xu, J., & Wang, X. (2021). Recent developments of organic solvent resistant materials for membrane separations. *Chemosphere*, 271, 129425. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129425>
- Reyes, K. M. D., Bruce, K., & Shetranjiwalla, S. (2023). Green Chemistry, Life Cycle Assessment, and Systems Thinking: An Integrated Comparative-Complementary Chemical Decision-Making Approach. *Journal of Chemical Education*, 100(1), 209-220. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00647>
- Ribba, L., Lopretti, M., Montes De Oca-Vásquez, G., Batista, D., Goyanes, S., & Vega-Baudrit, J. R. (2022). Biodegradable plastics in aquatic ecosystems: Latest findings, research gaps, and recommendations. *Environmental Research Letters*, 17(3), 033003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac548d>
- Ribeiro, M. G. T. C., & Machado, A. A. S. C. (2011). Metal-Acetylacetonate Synthesis Experiments: Which Is Greener? *Journal of Chemical Education*, 88(7), 947-953. <https://doi.org/10.1021/ed100174f>
- Rivera, I., Villanueva, G., & Sandoval, G. (2009). Producción de biodiesel a partir de residuos grasos animales por vía enzimática. *Grasas y Aceites*, 60(5), 470-476. <https://doi.org/10.3989/gya.021409>
- Rodríguez-Viveros, N., Paz-Samaniego, R., Hernández-Hernández, A. A., García-Curiel, L., Pérez-Escalante, E., Contreras-López, E., & Pérez-Flores, J. G. (2023). Extracción de arabinosilanos de subproductos agroindustriales adaptada a la estrategia universal de recuperación de compuestos bioactivos. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8(1), 774-784. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.100>
- Roque, R. M. R., Jamanca, K. M. S., & Zamora, V. M. (2023). Productos Químicos en la Estabilización de Suelos: Evaluación del Impacto Ambiental y Prácticas Sostenibles (1.ª ed.). ARCO EDITORES. <https://doi.org/10.48209/978-65-5417-149-6>
- Santiago-Santiago, M., Sánchez-Viveros, G., Santiago Santiago, M., Pariona, N., Hernández-Montiel, L. G., & Chiquito-Contreras, R. G. (2024). ¿La nueva terapia para las plantas? – Los aceites esenciales para control de enfermedades en agricultura. *Información Técnica Económica Agraria*. <https://doi.org/10.12706/itea.2024.005>
- Santos, S. D., Paraiso, C. M., Rodrigues, L. M., & Madrona, G. S. (2021). Agro-industrial waste as a source of bioactive compounds: Ultrasound-assisted extraction from blueberry (*Vaccinium myrtillus*) and raspberry (*Rubus idaeus*) pomace. *Acta Scientiarum. Technology*, 43, e55564. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v43i1.55567>
- Schneider, N., Lowe, D. M., Sayle, R. A., Tarselli, M. A., & Landrum, G. A. (2016). Big Data from Pharmaceutical Patents: A Computational Analysis of Medicinal Chemists' Bread and Butter. *Journal of Medicinal Chemistry*, 59(9), 4385-4402. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.6b00153>
- Schyns, Z. O. G., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*, 42(3), 2000415. <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>
- Sheldon, R. A. (2020). Biocatalysis and biomass conversion: Enabling a circular economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2176), 20190274. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0274>
- Sheldon, R. A., & Norton, M. (2020). Green chemistry and the plastic pollution challenge: Towards a circular economy. *Green Chemistry*, 22(19), 6310-6322. <https://doi.org/10.1039/D0GC02630A>
- Sheldon, R. A., & Woodley, J. M. (2018). Role of Biocatalysis in Sustainable Chemistry. *Chemical Reviews*, 118(2), 801-838. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00203>
- Shen, Y., Chen, B., & Van Beek, T. A. (2015). Alternative solvents can make preparative liquid chromatography greener. *Green Chemistry*, 17(7), 4073-4081. <https://doi.org/10.1039/C5GC00887E>
- Sierra, A., Meléndez, L., Ramírez-Monroy, A., & Arroyo, M. (2015). La química verde y el desarrollo sustentable / Green chemistry and sustainable development. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 5(9), 1. <https://doi.org/10.23913/ride.v5i9.1>
- Sifontes, Á. B. (2015). Biosíntesis de nanomateriales: Hacia el avance de la nanotecnología verde. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 7(13). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2014.13.48709>
- Sikhakhane Nwokediegwu, Z. Q., & Ugwuanyi, E. D. (2024). Implementing AI-Driven Waste Management Systems in Underserved Communities in the Usa. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 794-802. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.903>
- Silveira-Gramont, M. I., Aldana-Madrid, M. L., Piri-Santana, J., Valenzuela-Quintanar, A. I., Jasa-Silveira, G., &

- Rodríguez-Olibarria, G. (2018). Plaguicidas Agrícolas: Un Marco De Referencia Para Evaluar Riesgos a La Salud En Comunidades Rurales En El Estado De Sonora, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1), 7-21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.01>
- Singh, D., Devi, K. B., Ashoka P., Bahadur, R., Kumar, N., Devi, O. R., & Shahni, Y. S. (2023). Green Manure: Aspects and its Role in Sustainable Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 39-45. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113142>
- Singh, P. K. (2023). Digital Transformation in Supply Chain Management: Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) as Catalysts for Value Creation. *International Journal of Supply Chain Management*, 12(6), 57-63. <https://doi.org/10.59160/ijscm.v12i6.6216>
- Sjöström, J. (2006). Green chemistry in perspective—Models for GC activities and GC policy and knowledge areas. *Green Chem.*, 8(2), 130-137. <https://doi.org/10.1039/B511316D>
- Smirnova, S. V., & Apyari, V. V. (2023). Aqueous Two-Phase Systems Based on Cationic and Anionic Surfactants Mixture for Rapid Extraction and Colorimetric Determination of Synthetic Food Dyes. *Sensors*, 23(7), 3519. <https://doi.org/10.3390/s23073519>
- Sodiya, E. O., Umoga, U. J., Amoo, O. O., & Atadoga, A. (2024). AI-driven warehouse automation: A comprehensive review of systems. *GSC Advanced Research and Reviews*, 18(2), 272-282. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.18.2.0063>
- Sotomayor Pineda, J. M., Mora Barrantes, J. C., Afü Méndez, C., López Martínez, J., & Vallejo Salas, M. A. (2021). Evaluación del riesgo químico mediante la aplicación de un índice de seguridad inherente: Un caso de estudio en cursos de docencia de química general en un centro universitario. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5288>
- Stojanović, I., Šimunović, V., Alar, V., & Kapor, F. (2018). Experimental Evaluation of Polyester and Epoxy–Polyester Powder Coatings in Aggressive Media. *Coatings*, 8(3), 98. <https://doi.org/10.3390/coatings8030098>
- Stubbs, S., Yousaf, S., & Khan, I. (2022). A review on the synthesis of bio-based surfactants using green chemistry principles. *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, 30(2), 407-426. <https://doi.org/10.1007/s40199-022-00450-y>
- Sulochana, D. M. (2024). *Green Chemistry Innovations for Sustainable Development*.
- Tabanelli, T., Cespi, D., & Cucciniello, R. (2021). Sustainable and Environmental Catalysis. *Catalysts*, 11(2), 225. <https://doi.org/10.3390/catal11020225>
- Teh, S. Y., Chua, K. B., Hong, B. H., Ling, A. J. W., Andiappan, V., Foo, D. C. Y., Hassim, M. H., & Ng, D. K. S. (2019). A Hybrid Multi-Objective Optimization Framework for Preliminary Process Design Based on Health, Safety and Environmental Impact. *Processes*, 7(4), 200. <https://doi.org/10.3390/pr7040200>
- Tobiszewski, M., Marć, M., Gałuszka, A., & Namieśnik, J. (2015). Green Chemistry Metrics with Special Reference to Green Analytical Chemistry. *Molecules*, 20(6), 10928-10946. <https://doi.org/10.3390/molecules200610928>
- Torres-Gómez, N., Ávila-Avilés, R. D., & Vilchis-Nestor, A. R. (2020). Biosíntesis y caracterización de nanoestructuras por microscopía electrónica. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 13(25), 29-43. <https://doi.org/10.22201/ceich.24485691e.2020.25.69637>
- Umar, A., Munir, M., Riaz, M., Murtaza, M., Sultana, R., Srinivasan, G., Firdous, A., & Saeed, M. (2019). Properties and green applications based review on highly efficient deep eutectic solvents. *Egyptian Journal of Chemistry*, 0(0), 0-0. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.12604.1782>
- Valmir, S., Ricardo, F. B. S., Luiz, C. O., & Vanessa, V. (2014). Alternatives for remediation and decontamination of soils from Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 9(43), 3197-3204. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8920>
- Veleva, V., & W. Cue Jr, B. (2017). Benchmarking green chemistry adoption by “big pharma” and generics manufacturers. *Benchmarking: An International Journal*, 24(5), 1414-1436. <https://doi.org/10.1108/BIJ-01-2016-0003>
- Verma, D. (2018). Analysis of Smart Manufacturing Technologies for Industry Using AI Methods. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 9(2), 529-540. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v9i2.13857>
- Villalobos-González, W., Sibaja-Brenes, J. P., Mora-Barrantes, J. C., & Álvarez-Garay, B. (2021). Evaluación de los riesgos químicos por inhalación de las sustancias utilizadas en una industria gráfica. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4977>
- Vollmer, I., Jenks, M. J. F., Roelands, M. C. P., White, R. J., Van Harmelen, T., De Wild, P., Van Der Laan, G. P., Meirer, F., Keurentjes, J. T. F., & Weckhuysen, B. M. (2020). Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste. *Angewandte Chemie International Edition*, 59(36), 15402-15423. <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>
- Wagner, G. W., Procell, L. R., Sorrick, D. C., Lawson, G. E., Wells, C. M., Reynolds, C. M., Ringelberg, D. B., Foley, K. L., Lumetta, G. J., & Blanchard, D. L. (2020). All-Weather Hydrogen Peroxide-Based Decontamination of CBRN Contaminants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(7), 3099-3105. <https://doi.org/10.1021/ie9019177>
- Wang, H. (2024). Linking AI supply chain strength to sustainable development and innovation: A country-level analysis. *Expert Systems*, 41(5), e12973. <https://doi.org/10.1111/exsy.12973>
- Wang, J., Ayari, M. A., Khandakar, A., Chowdhury, M. E. H., Uz Zaman, S. A., Rahman, T., & Vaferi, B. (2022). Estimating the Relative Crystallinity of Biodegradable Polylactic Acid and Polyglycolide Polymer Composites by Machine Learning Methodologies. *Polymers*, 14(3), 527. <https://doi.org/10.3390/polym14030527>
- Wang, Z., Liu, Y., Dong, X., & Sun, Y. (2021). Cobalt Phosphate Nanocrystals: A Catalase-Like Nanozyme and In Situ Enzyme-Encapsulating Carrier for Efficient Chemoenzymatic Synthesis of α -Keto Acid. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(42), 49974-49981. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c15043>
- Xia, L., Ling, J., Xu, Z., Bi, R., Zhao, W., & Xiang, S. (2022). Application of sequential quadratic programming based on active set method in cleaner production. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(1), 413-422. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02207-8>
- Xia, T. X., Yao, J. J., Zhong, M. S., & Jia, X. Y. (2013). Field Study on Remediation of PAHs Contaminated Soil by *Ex Situ* Technologies at a Coking Site. *Advanced Materials Research*, 773, 744-748. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.773.744>
- Yabré, M., Ferey, L., Somé, I. T., & Gaudin, K. (2018). Greening Reversed-Phase Liquid Chromatography Methods Using Alternative Solvents for Pharmaceutical Analysis. *Molecules*, 23(5), 1065. <https://doi.org/10.3390/molecules23051065>
- Yadav, G. D., & Desai, N. M. (2005). Selectivity Engineering of Phase Transfer Catalyzed Alkylation of 2'-Hydroxyacetophenone: Enhancement in Rates and Selectivity by Creation of a Third Liquid Phase. *Organic Process Research & Development*, 9(6), 749-756. <https://doi.org/10.1021/op050086m>
- Yang, R., Xu, G., Dong, B., Hou, H., & Wang, Q. (2022). A “Polymer to Polymer” Chemical Recycling of PLA Plastics by the “DE-RE Polymerization” Strategy. *Macromolecules*, 55(5), 1726-1735. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c02085>
- Yao, Z., Li, B., & Li, C. (2023). Distribution properties of ultraviolet absorbers in different species of biodegradable plastics. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(9), 1453-1459. <https://doi.org/10.1177/0734242X231159842>
- Younis, H., Sundarakani, B., & Alsharairi, M. (2022). Applications of artificial intelligence and machine learning within supply chains: systematic review and future research directions. *Journal of Modelling in Management*, 17(3), 916-940. <https://doi.org/10.1108/JM2-12-2020-0322>
- Yu, Y., & Flury, M. (2024). Unlocking the Potentials of Biodegradable Plastics with Proper Management and Evaluation at Environmentally Relevant Concentrations. *Npj Materials Sustainability*, 2(1), 9. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00012-0>
- Zahrt, A. F., Henle, J. J., Rose, B. T., Wang, Y., Darrow, W. T., & Denmark, S. E. (2019). Prediction of higher-selectivity catalysts by computer-driven workflow and machine learning. *Science*, 363(6424), eaau5631. <https://doi.org/10.1126/science.aau5631>
- Zamora-Valencia, C. A., Reyes-Valderrama, M. I., Salado-Lesa, D. E., & Rodríguez-Lugo, V. (2023). Síntesis hidrotermal de puntos cuánticos de carbono PEGilados. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(Especial5), 35-43. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial5.11840>
- Zhong, H., Liu, K., Zhang, Q., Meng, F., Bao, D., & Zhang, X. (2020). Copper tetrazolate based metal-organic frameworks as highly

efficient catalysts for artificially chemical and electrochemical CO₂ conversion. *Nano Select*, 1(3), 311-319. <https://doi.org/10.1002/nano.202000041>

Zúñiga-Martínez, S., Ibáñez-Hernández, O. F., Salas Plata-Mendoza, J. A., Flores-Tavizón, E., & Velázquez-Angulo, G. (2022). Métodos de

remoción de metales en aguas para consumo humano: Una revisión. *Cultura Científica y Tecnológica*, 19(2). <https://doi.org/10.20983/culcyt.2022.2.3.1>