

# Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno

[www.revistaestudiosieeg.com](http://www.revistaestudiosieeg.com)

# 03

ENE-JUN 2025  
ISSN: EN TRÁMITE



*Ilustración generada con inteligencia artificial, por Fidel Romero*



UNIVERSIDAD DE  
GUADALAJARA  
Red Universitaria de Jalisco



# Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno

Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno Año 2, No. 3, Enero-Junio 2025, es una publicación semestral, editada por la Universidad de Guadalajara, a través del Departamento de Economía y Ciencias Políticas y por la División de Ciencias Económicas, Empresa y Gobierno del Centro Universitario de Tonalá. Domicilio Av. Nuevo Periférico No. 555, Ejido San José Tateposco, C.P. 45425, Tonalá, Jalisco, México; Tel. 3320002300; página web <https://revistaestudiosieeg.com/index.php/eieeg>, correo electrónico [reieeg@cutonala.udg.mx](mailto:reieeg@cutonala.udg.mx), Editor responsable: Dr. Julio Santiago Hernández. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2024-062016595700-102, ISSN: en trámite, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de éste número: Departamento de economía y ciencias políticas, con domicilio en Av. Nuevo Periférico No. 555, Ejido San José Tateposco C.P. 45425, Tonalá, Jalisco, México, Dr. Julio Santiago Hernández. Fecha de la última modificación 10 de enero de 2025. Tamaño del archivo 1.2 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad de Guadalajara.

# Sobre la revista

## 1. Objetivos

### Objetivo general

La revista será un órgano de difusión cuyo eje articulador trate temas que afecten los núcleos temáticos de mayor relevancia en la agenda pública alrededor de temas contemporáneos en economía, empresa y gobierno que puedan ser abordados desde distintos ámbitos de las ciencias, siendo sociales, naturales o exactas y de interés para la comunidad académica y del público en general.

### Objetivos Específicos.

1. Desarrollar una herramienta de difusión y divulgación de investigación de carácter interdisciplinario para el Centro Universitario a través de la División de Ciencias Económicas, Empresa y Gobierno.
2. Generar identidad y cultura institucional.
3. Generar un espacio para dar a conocer investigaciones e información de carácter académico.
4. Constituir un ámbito de debate técnico, académico y científico alrededor de temas contemporáneos en economía, empresa y gobierno.
5. Informar y actualizar sobre los temas que se llevan a cabo en el Centro Universitario y particularmente los correspondientes a la División y sus investigaciones, donde al mismo tiempo puedan interactuar docentes-estudiantes y realizar búsquedas avanzadas de temas relacionados al medio

## 2. Enfoque

La revista se orientará en los temas inherentes a economía, empresa, gobierno y disciplinas afines.

## 3. Alcance

La revista está dirigida a la comunidad académica primordialmente del Centro Universitario de Tonalá y del público en general.

## 4. Secciones de la revista

- Introducción o editorial
- Ensayo
- Artículo de investigación
- Reseñas

# Equipo editorial

## Director:

- Dr. Julio Santiago Hernández

## Consejo Editorial:

- Mtra. María Felicitas Parga Jiménez
- Mtra. Anisse Jacinta Musalem Enríquez
- Dra. Aimée Pérez Esparza
- Dr. Luis Téllez Arana
- Dr. Edgar Ricardo Rodríguez Hernández
- Dra. María Fernanda Isadora Corona Meraz
- Mtro. Carlos Macías Hernández
- Dr. Arturo Estrada Vargas



# Contenido



- 06** **Introducción**  
*Consejo Editorial*
- 
- 09** **Materiales adsorbentes funcionalizados: una solución basada en química click para la purificación de agua y producción de biocombustibles**  
*Alexis Ubaldo Salas Villalobos y Jesse Yoe Rumbo Morales*
- 
- 17** **Aprovechamiento de la Química Click para soluciones energéticas sostenibles en la transición energética de México**  
*Cinthy Figueroa Rodríguez, Magaly Netzaye Flores Fernández y Alvaro Rafael Pedroza Zapata*
- 
- 25** **La química “Clic” como actor clave en los procesos de monitoreo y remediación ambiental**  
*Diego Iván Aguilar Vázquez y Irma Idalia Rangel Salas*
- 
- 33** **Aplicación de la química click en la detección de glucosa y su beneficio en salud pública**  
*Carolina Salazar-Bucio, Cinthya E. Amador-Pulido, Minerva G. Ventura-Muñoz y Jesús A. Lara-Cerón*
- 
- 39** **Química Click: Impulsando la sostenibilidad y la innovación en la educación superior mediante el uso de disolventes verdes**  
*Patricia Jaquelyne Esparza Vázquez, Daniel Salvador Andrade Arias y José Miguel Velázquez López*
- 
- 45** **Aplicaciones de la química click en el desarrollo de nuevas herramientas terapéuticas**  
*Domínguez Fonseca Estefanía y Gutiérrez Gutiérrez Filiberto*
-

## Introducción

En el número pasado nos dimos a la tarea de publicar, cómo en el primero, el trabajo de académicas, académicos y estudiantes interesadas e interesados en divulgar y compartir sus conocimientos. No nos queda más que agradecer a las personas que han confiado en nuestro espacio editorial para publicar el resultado de su investigaciones. En nuestro equipo consideramos que la decisión de compartir los conocimientos adquiridos por medio de una publicación física o digital cómo ésta, surge de un deseo generoso y desinteresado por democratizar lo aprendido. Y de esta manera, hacer llegar a otros el resultado de procesos educativos y de investigación que no siempre son accesibles para todos. Lo anterior, se suma a la simplificación del proceso de aprendizaje para las personas que pertenecen a otras disciplinas. Abordar un tema desde cero puede implicar tiempo y recursos con los que no siempre se cuenta.

Es por ello que la Revista de Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno es una oportunidad para que académicos, estudiantes y personas del área de Economía y Ciencias Políticas o de cualquier otra área se sensibilicen y aprendan sobre temas que nos afectan a todos como sociedad. El resultado de los esfuerzos del número anterior de la Revista fue la publicación de 6 trabajos que en su conjunto le permiten al lector adentrarse en “Temas actuales de investigación en gobernanza, desarrollo económico y territorial” desde una mirada interdisciplinar. Se incluyó, por primera vez, una sección de Policy Briefs con el objetivo de aportar herramientas de utilidad a las personas, que además de ser nuestros lectores, son servidores públicos o están interesadas en las políticas públicas.

Tuvimos la oportunidad de publicar trabajos sobre economía del transporte en la zona metropolitana de Guadalajara, sobre salud pública en un contexto latinoamericano, desplazamiento forzado interno en México, gentrificación en la zona centro de la capital de Jalisco y la eficacia de suplementos nutricionales en nuestro país. En este tercer esfuerzo, de enero-junio del 2025, nos emociona presentar la primera parte de los resultados de nuestro Dossier especial “Hacia una economía verde y sostenible para el siglo XXI: La contribución de Morten Peter Meldal”.

Dado que uno de los propósitos sustantivos de la Universidad de Guadalajara es buscar la formación integral de los estudiantes asegurando el desarrollo de habilidades y competencias para la vida profesional y la construcción de una ciudadanía ética y con perspectiva global. El presente ejercicio, buscó incentivar a los estudiantes para que propusieran soluciones concretas a problemas sociales, ambientales o económicos en México, mediante el uso innovador de la química click, demostrando cómo esta técnica puede ser aplicada para crear soluciones sostenibles y eficientes en el contexto nacional.

La química click consiste en reacciones químicas que permite la preparación de moléculas, ya sea a escala laboratorio o industrial, utilizando una aproximación de ensamble de bloques de “Lego”. Dicha estrategia permite conectar dos fragmentos moleculares sin que se formen subproductos diferentes al producto principal, minimizando residuos y evitando etapas posteriores de purificación.

En el año 2000, el químico estadounidense Barry Sharpless publicó un manifiesto científico que invitaba a buscar una nueva química sencilla y barata; que usase el agua como base y que funcionase a temperatura de ambiente. Lo llamó química click, porque se trataba de unir dos moléculas como quien abrocha los dos extremos del cinturón del coche. Un año después, Mortel Peter Meldal y Barry Sharpless descubrieron de forma independiente y casi simultánea la cicloadición de azidas-alquino catalizada por cobre; un enrevesado nombre para una reacción sencillísima que une dos moléculas para crear una tercera con propiedades nuevas. El proceso suponía un salto gigante respecto a la química del momento, porque funcionaba casi el 100% de las veces y no dejaba residuos (Domínguez, 2023).

En este contexto y aprovechando la visita del Dr. Morten Peter Meldal, Premio Nobel de Química 2022, en el marco del Foro Ciencia UDG, durante las actividades de la Feria Internacional del Libro 2024. Se propuso un ejercicio, en el que se invitó a estudiantes a realizar un ensayo que presentará una propuesta utilizando la química click para abordar y solucionar un problema social, ambiental o económico.

Como corolario, en esta primera parte del número especial de la Revista de Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno se presenta los primeros seis trabajo que reunieron los requisitos de calidad para ser considerados para su publicación. Cabe

mencionar que la recepción de las contribuciones estuvo en el marco de la convocatoria organizada por la Coordinación General de Investigación Posgrado y Vinculación de la Universidad de Guadalajara, en la que se convocó a todas y todos los estudiantes de la Red de la Universidad de Guadalajara a participar en el concurso: “Aplicaciones de la química click para resolver problemas en México”. A partir de la siguiente pregunta: ¿Cómo se puede utilizar la química click para resolver un problema en México?

No resta más que agradecer a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de esta primera parte del número especial. En particular al Dr. Arturo Estrada Vargas (UdeG-CUTONALA) coordinador del presente número, su apoyo ha sido fundamental para su éxito. A los revisores anónimos les expresamos nuestra profunda gratitud por su valiosa lectura y sus comentarios constructivos, los cuales sin duda han permitido mejorar la calidad de los trabajos presentados.

Consejo Editorial

## **BIBLIOGRAFÍA**

Domínguez Nuño (2023). Morten Meldal, premio Nobel: “La química clic nos ayudará a vencer al cáncer y al alzhéimer”. El país. <https://elpais.com/ciencia/2023-06-16/morten-meldal-premio-nobel-la-quimica-clic-nos-ayudara-a-vencer-al-cancer-y-al-alzheimer.html>

# Materiales adsorbentes funcionalizados: una solución basada en química click para la purificación de agua y producción de biocombustibles

*Functionalized adsorbent materials: a click chemistry-based solution for water purification and biofuel production*

Alexis Ubaldo Salas Villalobos<sup>a</sup> y Jesse Yoe Rumbo Morales<sup>b</sup>

## RESUMEN

La creciente urbanización y el desarrollo industrial han intensificado la crisis hídrica y energética en México. La contaminación del agua y la creciente demanda de energía han puesto en evidencia la necesidad de soluciones innovadoras y sostenibles. Al permitir la modificación precisa de adsorbentes, las reacciones click facilitan la generación de materiales altamente selectivos. La combinación de la química click con tecnologías como la adsorción por oscilación de presión (PSA) ofrecen un camino prometedor para abordar de manera efectiva la contaminación del agua, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover una economía circular.

**Palabras clave:** química click, adsorbentes, purificación de agua, biocombustibles, economía circular.

---

<sup>a</sup> Estudiante de la Maestría en ciencias físico matemáticas con orientación en matemáticas. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Valles. Carr. a Guadalajara Supermanzana El Km. 45.5, 46708 Caimanero, Jalisco, México. Correo: alexis.salas7067@alumnos.udg.mx

<sup>b</sup> Profesor investigador de la Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Valles. Carr. a Guadalajara Supermanzana El Km. 45.5, 46708 Caimanero, Jalisco, México.

## **ABSTRACT**

*Increasing urbanization and industrial development have intensified the water and energy crisis in Mexico. Water pollution and increasing energy demand have highlighted the need for innovative and sustainable solutions. By enabling the precise modification of adsorbents, click reactions facilitate the generation of highly selective materials. The combination of click chemistry with technologies such as pressure swing adsorption (PSA) offer a promising avenue to effectively address water pollution, reduce dependence on fossil fuels and promote a circular economy.*

**Keywords:** *click chemistry, adsorbents, water purification, biofuels, circular economy.*

## **INTRODUCCIÓN**

La forma en que vivimos ha generado una concentración de personas en ciudades, lo que implica una mayor demanda de servicios como transporte, vivienda, energía y agua. Adicionalmente, la industria, con sus procesos productivos y la generación de residuos, se concentra cada vez más en estos mismos espacios limitados. Este desarrollo ha generado un aumento de los problemas ambientales, consecuencia directa de un modelo de consumo cada vez más demandante y poco sostenible. La crisis hídrica y la dependencia de combustibles fósiles son dos de los problemas más desafiantes que enfrenta México. La contaminación del agua no solo pone en riesgo los ecosistemas, sino que también limita la disponibilidad de agua dulce para el consumo humano y la salud pública. Paralelamente, la demanda creciente de energía y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero impulsan la búsqueda de alternativas energéticas más limpias y sostenibles. En este contexto, las soluciones basadas en *química click* emergen como una herramienta versátil con un

enorme potencial para abordar ambas problemáticas. Al permitir la síntesis de materiales adsorbentes altamente selectivos, esta disciplina puede contribuir a la purificación del agua y a la producción eficiente de biocombustibles como el etanol, el metano y el hidrógeno. Estos avances se alinean con las metas de los Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que buscan garantizar el acceso a agua limpia y promover el uso de fuentes de energía renovables.

## DESARROLLO

El progreso en áreas como la agricultura, la ganadería y la industria, ha ido añadiendo complejidad a las problemáticas de la sociedad actual. Se estima que el agua residual que llega a las plantas purificadoras mexicanas presenta más de 800 tipos de contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en el que se destacan: pesticidas, tintes tóxicos, micro plásticos, productos farmacéuticos, metales pesados y hormonas esteroides, entre otros (Aguilar-Aguilar et al., 2023). Las tecnologías disponibles actuales para la purificación de agua contemplan el uso de procesos físicos, químicos y biológicos con alto requerimiento energético y elevados costos. Cabe destacar que, la generación energética en México proviene en su mayoría de combustibles contaminantes, por lo que el aumento en su uso para tratar de solucionar esta problemática solo cambiaría el medio al que contaminamos.

Si queremos proponer soluciones realistas, que se alineen a los principios de una economía circular, es necesario observar toda la cadena de valor. La generación de energía limpia es un objetivo clave para poder solucionar el problema del agua de manera consciente. El aprovechamiento de la energía solar y eólica son por lo regular, los principales candidatos para reemplazar los generadores energéticos actuales. Sin embargo, su implementación implica la reestructuración de la maquinaria que las industrias usan actualmente (calderas, turbinas de gas, etc.) por lo que no suelen ser atractivas para el mercado actual. Una solución realista, que no implica grandes cambios en el modelo actual, es el uso de biocombustibles.

El biometano, es un gas obtenido a partir de biomasa y tiene características similares al gas natural. Puede ser inyectado directamente en la red de gas existente, lo que permitiría una transición energética menos invasiva (Catalano et al., 2024). Por su parte, el hidrógeno

puede ser producido a partir de fuentes renovables, se postula como un vector energético versátil que puede utilizarse tanto en celdas de combustible para generar electricidad como en motores de combustión interna (Senthil Rathi et al., 2024). El bioetanol, un alcohol producido a partir de la fermentación de azúcares provenientes de residuos orgánicos como el olote o el bagazo de azúcar y agave, ha emergido como una alternativa prometedora para reducir la contaminación asociada al uso de combustibles fósiles. Si bien el bioetanol de elevada pureza puede utilizarse como combustible por sí solo, su incorporación como aditivo carburante en la gasolina ha demostrado ser una estrategia eficaz para mitigar los impactos ambientales en Brasil y EE. UU. (Yaverino-Gutiérrez et al., 2024).

Entonces, la solución a estas problemáticas debe de cumplir con tres puntos importantes: ser eficiente, barato y no contaminante. Entre las tecnologías emergentes con este enfoque destaca una, la *adsorción por oscilación de presión* (PSA, por sus siglas en inglés). Este proceso se basa en el fenómeno de la fisisorción, que es la adherencia de partículas a un material poroso, conocido principalmente como adsorbente. Este método permite separar de manera selectiva elementos de mezclas de gases o líquidos, utilizando un conjunto de válvulas para realizar variaciones de presión dentro de un par (o más) de columnas (Figura 1). Así, se pueden separar elementos contaminantes en el agua que por medios comunes no sería posible, y a su vez generar biocombustibles con un elevado grado de pureza para mejorar su rendimiento.

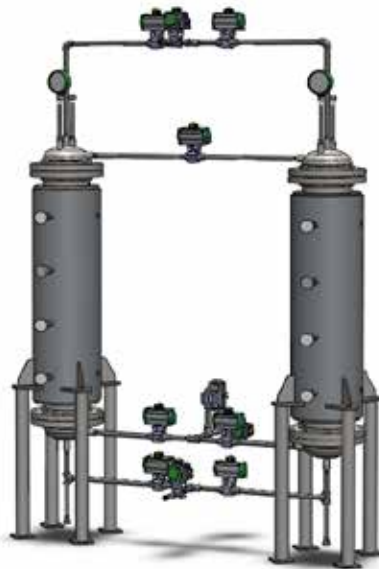


Figura 1. Ejemplo de un sistema completo de PSA.

El material adsorbente resulta de interés pues, suele ser encontrado en la naturaleza o ser aprovechado de subproductos de otros procesos. De la parte de los adsorbentes naturales se destacan dos: el carbón activado y las zeolitas. El primero, resulta de la combustión de residuos orgánicos de distintas fuentes de origen que, dependiendo de la zona geográfica, suele ser barato de producir. Las zeolitas, por su parte, son materiales de tipo rocoso provenientes de las faldas volcánicas y el subsuelo. Suelen ser descartados por la ignorancia de sus elevadas aplicaciones. Dependiendo de la zona, habrá una mayor o menor distribución de estos materiales, por lo que su precio puede variar, pero no suelen ser caros al ser usualmente desechados o utilizados como relleno en la construcción.



Figura 2. Elementos para el tratamiento químico en zeolitas.

Para que estos materiales presenten un alto grado de selectividad para retener compuestos específicos es necesario que pase por un proceso de tratamiento químico (Figura 2). Usualmente, se utilizan catalizadores químicos para que los adsorbentes presenten las características fisicoquímicas deseadas. Las reacciones click, específicamente el acoplamiento tiol-eno (Kehr et al., 2011) y la cicloadición de azidas y alquinos (Aflak et al., 2022), han demostrado ser de gran utilidad para la mejora de zeolitas (Clerc et al., 2020) y carbones activados (Nikita et al., 2020). Estas modificaciones a nivel molecular pueden otorgar a estos materiales nuevas propiedades, tales como mayor selectividad, estabilidad térmica y química, y una mayor capacidad de adsorción. Al funcionalizar estos materiales por medio de reacciones click, se puede modular la afinidad de los sitios activos hacia los componentes de la mezcla gaseosa, optimizando así el proceso de separación. Es precisamente en este escenario donde se vislumbra un gran potencial para mejorar el rendimiento de procesos como el PSA.

## CONCLUSIONES

La demanda de agua potable, el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía eléctrica en áreas urbanas sobrecargadas ponen a prueba la infraestructura existente en México. Es necesario innovar en la búsqueda de soluciones integrales que aborden las causas de estas problemáticas y que generen impactos positivos a largo plazo. En este contexto, la combinación de la química click con enfoques multidisciplinarios surge como una estrategia prometedora para implementar tecnologías innovadoras y eficientes como la PSA. La capacidad de generar enlaces químicos de manera rápida y selectiva ofrece un amplio abanico de posibilidades para la mejora de adsorbentes naturales como la zeolita o el carbón activado. Al unir estos materiales con la ingeniería, la biología, la física y otras disciplinas, se pueden abordar los desafíos relacionados con el agua y la generación de combustible desde una perspectiva más consciente y colaborativa, facilitando el desarrollo de soluciones sostenibles.

## REFERENCIAS

- Aflak, N., El Mouchtari, E. M., Ben El Ayouchia, H., Anane, H., Rafqah, S., Julve, M., & Stiriba, S. E. (2022). Copper-on-Magnetically Activated Carbon-Catalyzed Azide-Alkyne Click Cycloaddition in Water. *Catalysts*, *12*(10), 1244. <https://doi.org/10.3390/CATAL12101244/S1>
- Aguilar-Aguilar, A., de León-Martínez, L. D., Forgiionny, A., Acelas Soto, N. Y., Mendoza, S. R., & Zárate-Guzmán, A. I. (2023). A systematic review on the current situation of emerging pollutants in Mexico: A perspective on policies, regulation, detection, and elimination in water and wastewater. *Science of The Total Environment*, *905*, 167426. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.167426>
- Catalano, G., D'Adamo, I., Gastaldi, M., Nizami, A. S., & Ribichini, M. (2024). Incentive policies in biomethane production toward circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *202*, 114710. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.114710>
- Clerc, A., Bénéteau, V., Pale, P., & Chassaing, S. (2020). Chan-Lam-type Azidation and One-Pot CuAAC under CuI-Zeolite Catalysis. *ChemCatChem*, *12*(7), 2060–2065. <https://doi.org/10.1002/CCTC.201902058>
- Kehr, N. S., El-Gindi, J., Galla, H. J., & De Cola, L. (2011). Click chemistry on self-assembled monolayer of zeolite L crystals by microcontact printing – Applications in nanobiotechnology. *Microporous and Mesoporous Materials*, *144*(1–3), 9–14. <https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2010.11.030>
- Nikita, K., Ray, D., Aswal, V. K., & Murthy, C. N. (2020). Surface modification of functionalized multiwalled carbon nanotubes containing mixed matrix membrane using click chemistry. *Journal of Membrane Science*, *596*, 117710. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2019.117710>
- Senthil Rathi, B., Senthil Kumar, P., Rangasamy, G., & Rajendran, S. (2024). A critical review on Biohydrogen generation from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, *52*, 115–138. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.10.182>
- Yaverino-Gutiérrez, M. A., Wong, A. Y. C. H., Ibarra-Muñoz, L. A., Chávez, A. C. F., Sosa-Martínez, J. D., Tagle-Pedroza, A. S., Hernández-Beltrán, J. U., Sánchez-Muñoz, S.,

Santos, J. C. dos, da Silva, S. S., & Balagurusamy, N. (2024). Perspectives and Progress in Bioethanol Processing and Social Economic Impacts. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 608, 16(2)*, 608. <https://doi.org/10.3390/SU16020608>

# Aprovechamiento de la Química Click para soluciones energéticas sostenibles en la transición energética de México

## *Leveraging Click Chemistry for Sustainable Energy Solutions in Mexico's Energy Transition*

Cinthy Figueroa Rodríguez<sup>a</sup>, Magaly Netzaye Flores Fernández<sup>b</sup> y Alvaro Rafael Pedroza Zapata<sup>c</sup>

### RESUMEN

La transición energética en México se puede beneficiar a través de la Química Click (QC) para volverla más sostenible. El objetivo de este ensayo explora el potencial de la QC para afrontar las barreras claves en la transición energética de México. La eficiencia y la modularidad de la QC es un procedimiento que se adapta, es rentable y sostenible. La QC aporta a la transición sostenible a través de: Diseño de materiales para el almacenamiento de energía, aplicaciones de energía solar, la producción de hidrógeno verde y favoreciendo aspectos sociales y económicos en el país, impactando las ODS 7 y 13.

**Palabras clave:** Química Click, Transición energética, ODS

---

<sup>a</sup> Estudiante del Doctorado en Innovación y sustentabilidad en los negocios. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas, Periférico Norte N° 799, Núcleo Universitario Los Belenes, C.P. 45100, Zapopan, Jalisco, México. Correo: cinhya.figueroa7872@alumnos.udg.mx

<sup>b</sup> Estudiante de la Maestría en Ciencia de Materiales. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas, Periférico Norte N° 799, Núcleo Universitario Los Belenes, C.P. 45100, Zapopan, Jalisco, México. Correo: magaly.flores5452@alumnos.udg.mx

<sup>c</sup> Profesor de asignatura CUCEA. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas, Periférico Norte N° 799, Núcleo Universitario Los Belenes, C.P. 45100, Zapopan, Jalisco, México. Correo: alvaro.pedroza@ucea.udg.mx

## **ABSTRACT**

*Mexico's energy transition can benefit from Click Chemistry (QC) to make it more sustainable. The objective of this paper explores the potential of QC to address key barriers in Mexico's energy transition. The efficiency and modularity of QC is an adaptive, cost-effective and sustainable process. QC contributes to the sustainable transition through: Design of materials for energy storage, solar energy applications, green hydrogen production and favoring social and economic aspects in the country, impacting SDG 7 and 13.*

**Keywords:** *Click Chemistry, Energy Transition, SDG*

## **INTRODUCCIÓN**

La transición energética global es uno de los desafíos más urgentes de la actualidad, requiriendo esfuerzos colectivos de diversos sectores para alcanzar resultados sostenibles. Es esencial implementar estrategias que mejoren la eficiencia energética, impulsen políticas fiscales favorables a las energías renovables y promuevan la innovación industrial mediante prácticas de economía circular. Además, se deben desarrollar políticas internacionales y marcos de gobernanza multinivel para fomentar la colaboración y asegurar la aceptación social de las nuevas tecnologías energéticas (Hofbauer et al., 2022). Estas acciones son clave para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, sobre energía asequible y no contaminante, y 13, sobre acción por el clima.

En México, el compromiso con la energía sustentable se refleja en la meta de lograr un 35% de energías limpias en la matriz energética para 2024 (Secretaría de Energía [SENER], 2023). El país cuenta con ventajas geográficas, como su alto potencial de energía solar, estimado en 5 kWh/m<sup>2</sup> al día, lo que convierte a la energía solar en una solución viable para el consumo doméstico (Seefoó Luján, 2014). Sin embargo, el aumento de la demanda de electricidad, impulsada por el crecimiento poblacional y la expansión industrial, resalta la necesidad de enfoques innovadores en la generación, almacenamiento y distribución de

energía. Ávila (2018) advierte que los recursos naturales son limitados, mientras que las demandas energéticas de una población en constante crecimiento continúan aumentando, lo que contribuye a la contaminación y al agotamiento de recursos.

La pregunta clave es: ¿Cómo puede la química click (QC) contribuir a la transición energética solar en México?

## DESARROLLO

La QC, iniciada por Barry Sharpless a principios de los 2000 (Kolb, Finn y Sharpless, 2001), es una herramienta altamente eficiente y selectiva en la síntesis química, ideal para desarrollar materiales funcionales en la transición energética. La QC permite diseñar materiales avanzados con propiedades específicas, mejorando el almacenamiento de energía, la recolección de energía solar y la catálisis para la producción de hidrógeno verde, contribuyendo significativamente a los objetivos de energía renovable de México.

El país enfrenta el desafío de desarrollar tecnologías de almacenamiento eficientes y sostenibles, ya que la energía solar y eólica, aunque abundantes, son intermitentes y requieren soluciones de almacenamiento avanzadas. Además, la producción de hidrógeno verde, clave en la estrategia de descarbonización, necesita nuevos sistemas catalíticos eficientes y sostenibles. Las comunidades rurales y marginadas, que carecen de acceso a energía asequible, también podrían beneficiarse de estas tecnologías renovables, aunque los altos costos y la limitada escalabilidad de las tecnologías actuales dificultan su adopción generalizada.

La QC, en especial la reacción de ciclo adición azida-alquino catalizada por cobre (I) (CuAAC), ofrece una plataforma versátil para diseñar materiales que aborden estos retos. La reacción CuAAC, pilar de la química click, tiene aplicaciones clave en el ámbito energético:

1. Diseño de materiales para almacenamiento de energía:
  - Facilita la síntesis de polímeros orgánicos porosos (POPs) con alta área superficial y propiedades electroquímicas avanzadas, esenciales para supercondensadores y baterías de iones de litio o sodio.

- Permite la modificación post-sintética de MOFs, incorporando grupos funcionales que incrementan la capacidad de almacenamiento energético y mejoran la estabilidad térmica.

## 2. Producción de hidrógeno verde:

- Se emplea para desarrollar catalizadores híbridos con centros metálicos activos y fracciones REDOX (componentes de un sistema químico o material que participan en reacciones de óxido-reducción), incrementando la eficiencia en las reacciones de electrólisis del agua, particularmente en la evolución de hidrógeno (HER) y oxígeno (OER).

## 3. Aplicaciones en energía solar:

- Contribuye al diseño de tintes orgánicos estables para celdas solares sensibilizadas con colorantes (DSSCs), optimizando la absorción de luz solar y la conversión energética.

Su capacidad para crear materiales estables y funcionales, adecuados para el almacenamiento de energía, las células solares y la catálisis, permite optimizar el rendimiento y reducir los costos. Este ensayo analiza cómo la QC puede superar las barreras de la transición energética en México, promoviendo la sostenibilidad ambiental y la resiliencia económica hacia un futuro energético limpio.

## **PROPUESTA:**

### **1. Diseño de materiales basados en QC para el almacenamiento de energía**

La química click (QC) permite la creación de polímeros orgánicos porosos (POPs) y estructuras metal-orgánicas (MOFs) con gran área superficial y tamaños de poro ajustables, ideales para aplicaciones de almacenamiento de energía, como supercondensadores y baterías. Estos materiales permiten almacenar y liberar energía de manera eficiente, abordando la intermitencia inherente a la energía solar y eólica (Liu, Liu y Yang, 2019).

#### 1.1 Polímeros porosos:

La QC puede producir polímeros hiperreticulados con alta conductividad iónica y estabilidad, lo que los hace apropiados para baterías de iones de litio o sodio (Tan y Tan, 2017). La adición de grupos funcionales, como azidas y alquinos, durante la síntesis permite ajustar las propiedades electroquímicas del polímero, mejorando su capacidad y ciclo de vida.

## 1.2 Estructuras metal-orgánicas (MOFs):

Los MOFs pueden diseñarse para el almacenamiento de energía gracias a su gran superficie interna y su capacidad de incorporar enlazadores conductores (Furukawa et al., 2013). La QC permite la modificación post-sintética de los MOFs, introduciendo grupos REDOX-activos (grupos funcionales o componentes moleculares discretos capaces de participar en reacciones de óxido-reducción) que mejoran sus capacidades de almacenamiento energético (Li, Wang y Zhao, 2019).(ver Figura 1).

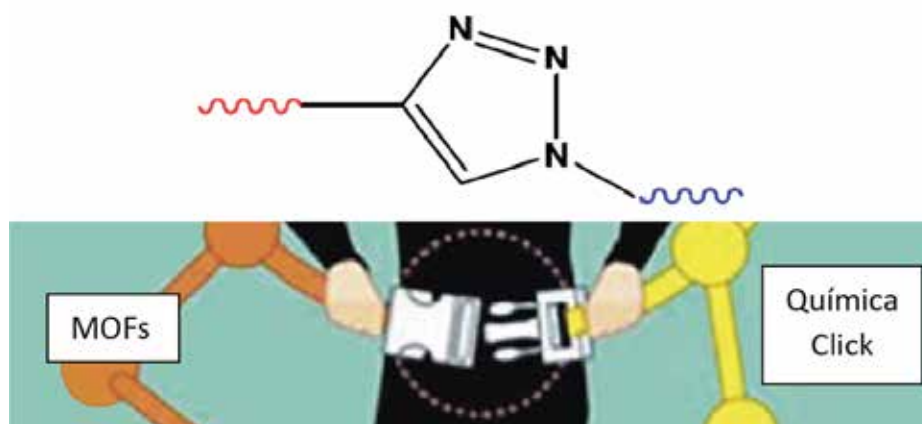


Figura 1. Una coalición de Química Click ↔ MOFs

## 2. La QC en aplicaciones de energía solar:

México, con sus abundantes recursos solares, tiene el potencial de convertirse en un líder global en energía solar. Sin embargo, la eficiencia de las células fotovoltaicas sigue siendo un factor limitante. La QC ofrece soluciones para desarrollar fotovoltaica orgánica (OPVs) y celdas solares sensibilizadas con colorantes (DSSCs), las cuales son más económicas y respetuosas con el medio ambiente que las células solares tradicionales basadas en silicio.

### 2.1 Células solares sensibilizadas con colorante (DSSCs):

En los DSSCs, la QC permite la síntesis de tintes orgánicos altamente estables que absorben un espectro más amplio de luz solar, lo que incrementa la eficiencia de conversión de energía solar. La modularidad de la QC facilita el diseño preciso de tintes ajustados a los niveles de energía necesarios para un rendimiento óptimo (Liu et al., 2019).

## 2.2 Células solares de perovskita:

Las células solares de perovskita son una tecnología prometedora debido a su alta eficiencia y bajo coste de producción. La QC puede modificar la estructura de la perovskita, mejorando su estabilidad y capacidad de absorción de luz, factores esenciales para garantizar la viabilidad a largo plazo en los diversos climas de México (Li et al., 2019).

## 3. Producción de hidrógeno verde a través de la QC:

Un elemento clave en la transición energética de México es la producción de hidrógeno verde, que puede utilizarse como combustible limpio para el transporte y la industria. Para lograrlo, se necesitan catalizadores eficientes para la electrólisis del agua, que genera hidrógeno y oxígeno. La QC se puede utilizar para diseñar nuevos materiales catalíticos que mejoren la eficiencia y la durabilidad de la producción de hidrógeno (Suh et al., 2011; Zhou, et al., 2013).

### 3.1 Desarrollo de catalizadores:

La QC permite la creación de marcos moleculares que pueden actuar como catalizadores altamente activos y selectivos para la reacción de evolución de hidrógeno (HER) y la reacción de evolución de oxígeno (OER) (Furukawa et al., 2013). Mediante la incorporación de fracciones REDOX-activas y centros metálicos a través de reacciones “click”, se pueden crear catalizadores eficientes y ambientalmente benignos.

## 4. Impactos sociales y económicos:

La QC puede acelerar la transición energética en comunidades rurales y desatendidas al desarrollar materiales rentables y escalables para almacenamiento de energía, energía solar y producción de hidrógeno, mejorando su calidad de vida y reduciendo los costos energéticos.

### 4.1 Creación de empleo:

Las tecnologías basadas en QC impulsarán la creación de empleos en investigación, desarrollo, fabricación e instalación en el sector de energías renovables en México.

Ejemplos concretos de tecnologías que involucran QC y MOFs, así como su relevancia en la transición energética son:

- **Fabricación:**
  - Producción de materiales avanzados basados en QC, como electrodos para baterías de flujo REDOX y catalizadores para celdas de combustible.
  - Síntesis de estructuras metal-orgánicas diseñadas para captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, una tecnología crucial para mitigar emisiones en procesos industriales.
- **Instalación:**
  - Integración de sistemas basados en QC, como supercondensadores y baterías en redes de energía renovable.
  - Uso de módulos de celdas solares DSSCs en techos residenciales y comerciales, particularmente en comunidades rurales donde la red eléctrica es limitada.

#### 4.2 Impactos ambientales y económicos:

Impacto ambiental: La QC contribuye a reducir las emisiones de carbono, combatiendo el cambio climático (Liu et al., 2019).

Impacto económico: La integración de QC reduce los costos de generación y almacenamiento de energía, haciendo las energías limpias más accesibles y competitivas globalmente (Li et al., 2019).

Desafíos: Los costos de producción y la durabilidad de los materiales, junto con la necesidad de una producción sostenible, son obstáculos para su escalabilidad.

## CONCLUSIÓN

La química click (QC) es clave para apoyar la transición energética de México mediante el desarrollo de materiales innovadores para almacenamiento de energía, conversión de energía solar y producción de hidrógeno. Su eficiencia y modularidad permiten crear soluciones escalables, rentables y sostenibles, contribuyendo al ODS 7 (energía asequible) y ODS 13 (acción por el clima). La integración de estas tecnologías en la infraestructura energética impulsará el crecimiento económico y mejorará la calidad de vida en México.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ávila, P. Z. (2018). Sustainability: a strong concept for humanity. *Tabula Rasa*, (28), 409-423.
- Furukawa, H., Cordova, K. E., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2013). The chemistry and applications of metal-organic frameworks. *Science*, 341(6149), 1230444. <https://doi.org/10.1126/science.1230444>
- Hofbauer, L., W. McDowall y S. Pye (2022). Challenges and opportunities for energy system modelling to foster multilevel governance of energy transitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 161. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112330>
- Kolb, H.C., Finn, M.G. and Sharpless, K.B. (2001), Click Chemistry: Diverse Chemical Function from a Few Good Reactions. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 40: 2004-2021.
- Li, P. Z., Wang, X. J., & Zhao, Y. (2019). Click chemistry as a versatile reaction for construction and modification of metal-organic frameworks. *Coordination Chemistry Reviews*, 380, 484-518. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.11.006>
- Liu, X., Liu, Y., & Yang, Y. (2019). Porous organic polymers: An emerging platform for advanced adsorption applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(35), 20097-20102. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00592>
- Seefoó Luján, J. Luis. (2014). Hacia la sustentabilidad ambiental de la producción de energía en México. *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, 35(139), 343-350. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-39292014000300015&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-39292014000300015&lng=es&tlng=es).
- SENER. (2023, 20 de abril). [México cumplirá con su meta del 35% de generación eléctrica con energías limpias en 2024: Consejo Consultivo para la Transición Energética | Secretaría de Energía | Gobierno | gob.mx \(www.gob.mx\)](https://www.gob.mx/energia/documentos/mexico-cumplira-con-su-meta-del-35-de-generacion-electrica-con-energias-limpias-en-2024)
- Suh, M. P., Park, H. J., Prasad, T. K., & Lim, D.-W. (2011). Hydrogen Storage in Metal–Organic Frameworks. *Chemical Reviews*, 112(2), 782–835. doi:10.1021/cr200274s
- Tan, L., & Tan, B. (2017). Hypercrosslinked porous polymer materials: Design, synthesis, and applications. *Chemical Society Reviews*, 46(11), 3322-3356. doi: 10.1039/c6cs00851h
- Zhou, T., Du, Y., Borgna, A., Hong, J., Wang, Y., Han, J., ... Xu, R. (2013). *Post-synthesis modification of a metal–organic framework to construct a bifunctional photocatalyst for hydrogen production. Energy & Environmental Science*, 6(11), 3229. doi:10.1039/c3ee41548a

# La química “Clic” como actor clave en los procesos de monitoreo y remediación ambiental

*“Clic” chemistry as a key player in environmental monitoring and remediation processes*

Diego Iván Aguilar Vázquez<sup>a</sup> y Irma Idalia Rangel Salas<sup>b</sup>

## RESUMEN

Con la creciente escala de industrialización y las prácticas de la agricultura moderna, la contaminación del medio ambiente se ha convertido en un problema crítico global, amenazando tanto ecosistemas enteros como la salud e integridad humana. Contaminantes como los metales pesados, toxinas y peligrosos residuos químicos a menudo se acumulan en aguas, suelos y aire, creando la necesidad de robustos sistemas de detección y de remediación. En respuesta, novedosas perspectivas químicas como la “química clic” están siendo integradas en los esfuerzos enfocados en el monitoreo y remediación ambiental. Adicionalmente, los “triazoles”, compuestos centrales en las reacciones de la química clic, son particularmente valiosos debido a su gran espectro de propiedades. Estos compuestos son usados en el diseño de sensores para contaminantes y en el desarrollo de materiales capaces de capturar y eliminar dichas sustancias. Por estas razones y otras por abordar en la extensión de este texto, los triazoles y la química clic juegan un papel importante en la implementación de diversas estrategias para atender los retos ambientales contemporáneos.

**Palabras clave:** química clic, ambiental, remediación, tratamiento de aguas, triazoles, síntesis, sensores, adsorción, metales pesados, tóxicos, contaminación.

<sup>a</sup> Alumno en la Maestría en Ciencias Químicas. Universidad de Guadalajara - CUCEI - Blvd. Marcelino García Barragán #1421, esq. Calzada Olímpica, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco. Correo: [diego.avazquez@alumnos.udg.mx](mailto:diego.avazquez@alumnos.udg.mx)

<sup>b</sup> Profesora investigadora de la Universidad de Guadalajara - CUCEI - Blvd. Marcelino García Barragán #1421, esq. Calzada Olímpica, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco Correo: [idalia.rangel@academicos.udg.mx](mailto:idalia.rangel@academicos.udg.mx)

## **ABSTRACT**

*With the increasing scale of industrialization and modern agricultural practices, environmental pollution has become a critical global problem, threatening entire ecosystems as well as human health and integrity. Contaminants such as heavy metals, toxins and hazardous chemical residues often accumulate in water, soil and air, creating the need for robust detection and remediation systems. In response, novel chemical perspectives such as “click chemistry” are being integrated into efforts focused on environmental monitoring and remediation. Additionally, “triazoles,” compounds central to click chemistry reactions, are particularly valuable due to their broad spectrum of properties. These compounds are used in the design of sensors for pollutants and in the development of materials capable of capturing and removing such substances. For these reasons and others to be addressed in the length of this text, triazoles and click chemistry play an important role in the implementation of various strategies to address contemporary environmental challenges.*

**Keywords:** *click chemistry, environmental, remediation, water treatment, triazoles, synthesis, sensors, adsorption, heavy metals, toxics, pollution.*

## **INTRODUCCIÓN**

### Breve contexto del agua en México

La contaminación de cuerpos de agua en México es un problema ambiental importante que afecta tanto a las fuentes de agua superficial como a las subterráneas. Las actividades industriales, los vertidos agrícolas y las aguas residuales no tratadas son los principales contribuyentes a la contaminación de este recurso (Mahlknecht et al., 2023). Estos contaminantes incluyen metales pesados como plomo y mercurio, fertilizantes químicos y pesticidas, y contaminantes orgánicos provenientes de los desechos urbanos. El río Lerma y el río Santiago son ejemplos claros de cuerpos de agua particularmente afectados por esta problemática, destacando con

altos índices de vertidos industriales de fábricas cercanas. Adicionalmente, estos recursos naturales de México son vulnerables a la contaminación causada por derrames de petróleo y operaciones mineras, lo que degrada aún más la calidad del agua. Esta contaminación no solo amenaza a los ecosistemas acuáticos, sino que también pone en peligro la salud pública, ya que muchas comunidades dependen de fuentes contaminadas para obtener agua potable y las consecuencias de la ingesta de estas están ampliamente documentadas en la bibliografía (Morán-Valencia et al., 2023). Además, la limitada infraestructura de tratamiento de aguas residuales y la nula o escasa aplicación y ejercicio de las normas exacerban el problema, lo que convierte a la contaminación del agua en un desafío crítico para México.

### Importancia de la mitigación y control

Dentro de la gran variedad de estrategias contempladas a lo largo de los años, los esfuerzos en el área del monitoreo ambiental y la remediación son vitales para proteger y restablecer la integridad de los cuerpos de agua, ya que, su contaminación implica riesgos serios para los ecosistemas, la vida salvaje y la salud humana. Particularmente, el monitoreo ayuda a detectar sustancias dañinas como las ya mencionadas, las cuales degradan la calidad del agua de diversas maneras. Por lo tanto, su detección temprana posibilita una intervención oportuna, la cual previene la propagación de contaminantes (UNEP, 2023). Además, las técnicas de remediación, incluyendo métodos físicos, químicos y biológicos, son utilizadas para remover o neutralizar contaminantes con la intención de restaurar la salud de los ecosistemas acuáticos cuando el daño ya está hecho. Partiendo de estas premisas, en áreas como México, se puede observar cómo este tipo de estrategias son una propuesta atractiva y viable para proteger los recursos hídricos, asegurar la salud pública y promover la sustentabilidad ambiental.

### Química Clic para la obtención de triazoles

Las ventajas de la obtención de triazoles y derivados mediante el uso de la química clic son extremadamente atractivas en contraste con otros métodos de síntesis más convencionales. El descubrimiento de la cicloadición de azida-alquino catalizada por

cobre (Figura 1) (CuAAC por sus siglas en inglés) iniciada por Morten Meldal y Barry Sharpless, revolucionó la síntesis de estos compuestos (Meldal & Tornøe, 2008). Este enfoque destaca de los métodos convencionales debido a su eficiencia y selectividad. Métodos tradicionales como la ciclo-adición dipolar-1,3 de Huisgen, a menudo involucran ciertas limitaciones, tales como condiciones duras de reacción, bajos rendimientos y falta de regioselectividad. La CuAAC mitiga las desventajas y ofrece numerosas ventajas, las cuales la han convertido en una de las piedras angulares de la química sintética moderna (Hein & Fokin, 2010). Una de las ventajas más significativas de la química clic es la alta eficiencia y los rendimientos casi cuantitativos. La casi completa conversión de los materiales iniciales en productos bajo condiciones suaves de reacción, incluso a gran escala, hace a esta reacción bastante útil para aplicaciones industriales (Castro et al., 2016). Además de la reducción en el consumo de energía, la eficiencia de la química clic reduce significativamente la necesidad de una purificación extensiva o mediante columnas cromatográficas, simplificando el flujo de trabajo y reduciendo los desechos (Hein & Fokin, 2010). Adicionalmente, la síntesis de triazoles con métodos tradicionales requiere el uso de solventes orgánicos tóxicos en contraste con la CuAAC, que es llevada a cabo en agua, y también carecen de la economía atómica que este enfoque ofrece (Shirame & Bhosale, 2018).

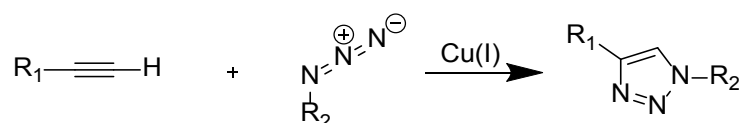


Figura 1 - Reacción CuAAC

Todo esto ha convertido a la CuAAC en el método preferido de muchos investigadores, ya que este método minimiza la producción de subproductos peligrosos y reduce la huella ambiental del proceso de síntesis química per se (Castro et al., 2016). Al implementar la química clic en la producción de compuestos de tipo triazol y derivados para las aplicaciones ambientales, no solo es efectiva, sino también responsable.

## Triazolez como herramienta estrategica

Los triazoles ya juegan un papel importante en el diseño de novedosas técnicas químicas de monitoreo ambiental y la remediación debido a sus propiedades únicas y versátiles. Estos compuestos heterocíclicos son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones relacionadas con el medio ambiente, particularmente, destacan en la ya mencionada detección de contaminantes y en la limpieza de ecosistemas contaminados. Además, los triazoles tienen una remarcable estabilidad bajo una gran variedad de condiciones ambientales, haciéndolos ideales para el uso a largo plazo en los procesos de interés de este trabajo (Puguan & Kim, 2020). Su resistencia a la degradación térmica, luminosa y la provocada por otros compuestos, les permite funcionar en diversos tipos de ambientes y asegura que el material en cuestión mantenga su efectividad a lo largo del tiempo, reduciendo la necesidad de reemplazar o reaplicar, característica clave para proyectos ambientales con perspectiva de larga escala.

## Aplicaciones de interes de los triazoles

En el área ambiental, los triazoles son principalmente utilizados en el desarrollo de sensores químicos con la capacidad de detectar metales pesados, pesticidas y diversos contaminantes orgánicos. Su gran capacidad de enlazarse a metales y otros compuestos los hace bastante efectivos en las aplicaciones de detección. Respecto a esta aplicación, estos compuestos son comúnmente utilizados en sensores electroquímicos y de fluorescencia (Kim et al., 2010). Dichos sensores son capaces de detectar metales pesados tales como el plomo, el mercurio y el cadmio en cuerpos de agua, los cuales son contaminantes de carácter crítico. Por ejemplo, diversos compuestos derivados del 1,2,3-triazol son utilizados en conjunto con técnicas de fluorescencia, en las cuales la unión de los metales induce cambios en la intensidad de esta propiedad, señalando la presencia de estos contaminantes. Adicionalmente, los sensores basados en triazoles son capaces de detectar pesticidas y herbicidas mediante metodologías análogas (Crini et al., 2017).

Respecto a la remediación, los triazoles pueden contribuir a la remoción y/o neutralización de contaminantes a través de una variedad de mecanismos. Por ejemplo, los compuestos derivados de estos, como el benzotriazol, son ampliamente usados como inhibidores de la corrosión

en sistemas industriales de agua, particularmente en tuberías de metales como el cobre y sus aleaciones (Khan et al., 2015). Mediante la formación de una capa protectora en las superficies metálicas, los triazoles reducen la lixiviación de iones metálicos en el ambiente, por consiguiente, previniendo contaminación adicional de los sistemas de agua ocasionada por los mismos medios de transporte de este recurso. Además, ciertos compuestos triazólicos como el “paclobutrazol” y el “hexaconazol” han demostrado su capacidad de incrementar la habilidad de algunas plantas para tolerar y remover contaminantes presentes en suelo y agua (Neamah & Hamad, 2020). Este tipo de triazoles ayuda a las plantas a lidiar con los estresores ambientales como la salinidad, la toxicidad de los metales pesados, y algunos microorganismos hostiles, mejorando la eficiencia de las técnicas de fitorremediación en sitios contaminados (Thabit et al., 2021). Por otro lado, ciertos compuestos químicamente triazoles han sido explorados en su uso como adsorbentes y filtros diseñados para remover los contaminantes presentes en las aguas de desecho. Por ejemplo, materiales dopados o modificados con triazol pueden ser empleados para adsorber metales pesados y toxinas orgánicas de las aguas de desecho industrial, ayudando en el proceso de limpieza antes de que el agua sea liberada de regreso en el ambiente (Crini et al., 2017).

## La química y el ambiente

En el área de la síntesis química, los triazoles también tienen un papel muy importante en la denominada “química clic”, la cual es una categoría de reacciones químicas altamente eficientes que son más amigables con el medio ambiente y producen desechos mínimos (Shirame & Bhosale, 2018). En la remediación, las metodologías de la química clic que involucran triazoles son usadas para crear materiales y avanzados sensores químicos como los que han sido mencionados en la extensión de este trabajo.

## CONCLUSIONES

Los esfuerzos en el monitoreo ambiental y la remediación son estrategias esenciales para lidiar con el problema creciente de la contaminación, particularmente en áreas vulnerables como los cuerpos de agua de México.

De manera general, los compuestos basados en triazoles, principalmente aquellos sintetizados mediante química clic, incrementan significativamente la cantidad de alternativas viables en las tecnologías de monitoreo ambiental y remediación. Su uso como sensores químicos para la detección de contaminantes y su implementación en materiales avanzados para la remoción de estos los hacen herramientas indispensables en el manejo de los problemas relacionados con el tratamiento de aguas. Su integración con las prácticas de la química verde, como la química clic, también se alinea con los objetivos de sustentabilidad de diversos organismos internacionales.

La reacción CuAAC, desarrollada como una parte de la química clic por Meldal y Sharpless, representa una mejora sustancial sobre los métodos tradicionales de obtención de triazoles. Su alta eficiencia, regioselectividad, condiciones suaves de reacción y el bajo impacto ambiental la convierten en una herramienta indispensable para la química sintética moderna, y a su vez en el método de elección para el desarrollo de materiales de triazol enfocados a la implementación de estrategias de remediación y monitoreo ambiental de los cuerpos de agua.

Finalmente, la química clic como estrategia de “primera línea” en el desarrollo de futuras aplicaciones e investigaciones busca no solo impulsar el conocimiento y la innovación en la química, sino también asegurar que esos avances sean sostenibles, éticos y accesibles, maximizando el beneficio para la sociedad y el medio ambiente.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Ahmed, F. & Xiong, H. (2021). Recent developments in 1,2,3-triazole-based chemosensors. *Dyes and Pigments*, 185, 108905.
- Bauer, D., Sarrett, S. M., Lewis, J. S. & Zeglis, B. M. (2023). Click chemistry: a transformative technology in nuclear medicine. *Nature Protocols*, 18(6), 1659–1668.
- Castro, V., Rodríguez, H. & Albericio, F. (2016). CuAAC: An Efficient Click Chemistry Reaction on Solid Phase. *ACS Combinatorial Science*, 18(1), 1–14.
- Crini, G., Exposito Saintemarie, A., Rocchi, S., Fourmentin, M., Jeanvoine, A., Millon, L. & Morin-Crini, N. (2017). Simultaneous removal of five triazole fungicides from synthetic solutions on activated carbons and cyclodextrin-based adsorbents. *Heliyon*, 3(8), e00380.

- Hein, J. E. & Fokin, V. V. (2010). Copper-catalyzed azide–alkyne cycloaddition (CuAAC) and beyond: new reactivity of copper(i) acetylides. *Chemical Society Reviews*, 39(4), 1302.
- Khan, P. F., Shanthi, V., Babu, R. K., Muralidharan, S. & Barik, R. C. (2015). Effect of benzotriazole on corrosion inhibition of copper under flow conditions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 10–19.
- Kim, S. H., Choi, H. S., Kim, J., Lee, S. J., Quang, D. T. & Kim, J. S. (2010). Novel Optical/Electrochemical Selective 1,2,3-Triazole Ring-Appended Chemosensor for the Al<sup>3+</sup> Ion. *Organic Letters*, 12(3), 560–563.
- Mahlknecht, J., Aguilar-Barajas, I., Farias, P., Knappett, P. S. K., Torres-Martínez, J. A., Hoogesteger, J., Lara, R. H., Ramírez-Mendoza, R. A. & Mora, A. (2023). Hydrochemical controls on arsenic contamination and its health risks in the Comarca Lagunera region (Mexico): Implications of the scientific evidence for public health policy. *Science of The Total Environment*, 857, 159347.
- Meldal, M. & Tornøe, C. W. (2008). Cu-Catalyzed Azide–Alkyne Cycloaddition. *Chemical Reviews*, 108(8), 2952–3015.
- Morán-Valencia, M., Flegl, M. & Güemes-Castorena, D. (2023). A state-level analysis of the water system management efficiency in Mexico: Two-stage DEA approach. *Water Resources and Industry*, 29, 100200.
- Neamah, S. I. & Hamad, A. H. (2020). The effects of paclobutrazol on enhancing tolerance of *Plantago major* L. to cadmium stress in vitro. *Australian Journal of Crop Science*, 14(12):2020, 2028–2035.
- Puguan, J. M. C. & Kim, H. (2020). Synthesis of free-standing poly(ionic liquid) bearing 1,2,3-triazole group for the adsorptive elimination of Cr<sup>6+</sup> from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104084.
- Shirame, S. P. & Bhosale, R. B. (2018). Green Approach in Click Chemistry. In *Green Chemistry*. InTech.
- Thabit, T. M. A., Abdelkareem, E. M., Bouqellah, N. A. & Shokr, S. A. (2021). Triazole Fungicide Residues and Their Inhibitory Effect on Some Trichothecenes Mycotoxin Excretion in Wheat Grains. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(6).
- UNEP. (2023). *Measuring Progress: Water-related ecosystems and the SDGs*.

# Aplicación de la química click en la detección de glucosa y su beneficio en salud pública

## *Application of click chemistry in the detection of glucose and its public health benefit*

Carolina Salazar-Bucio<sup>a</sup>, Cinthya E. Amador-Pulido<sup>b</sup>,  
Minerva G. Ventura-Muñoz<sup>c</sup> y Jesús A. Lara-Cerón<sup>d</sup>

### RESUMEN

La química click ha revolucionado la detección de glucosa gracias a su eficiencia y precisión, contribuyendo al manejo de la diabetes, una de las principales preocupaciones de salud pública. Este enfoque ha permitido desarrollar biosensores avanzados, como microchips, sensores fluorescentes y nanomateriales, capaces de realizar diagnósticos tempranos y monitoreo continuo. Estas tecnologías ofrecen soluciones rápidas y no invasivas, destacando su potencial para transformar la gestión de la diabetes a nivel global.

**Palabras clave:** química click, glucosa, diabetes, sensor, ácido borónico. .

### ABSTRACT

*Click chemistry has revolutionized glucose detection thanks to its efficiency and accuracy, contributing to the management of diabetes, a major public health concern. This approach has enabled the development of advanced biosensors, such as microchips, fluorescent*

<sup>a</sup> Departamento de Química, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México.

<sup>b</sup> Departamento de Química, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México.

<sup>c</sup> Departamento de Química, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México.

<sup>d</sup> Departamento de Química, Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán 1421, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México. Correo: [jesusalfredo.lara@academicos.udg.mx](mailto:jesusalfredo.lara@academicos.udg.mx)

*sensors and nanomaterials, capable of early diagnosis and continuous monitoring. These technologies offer rapid and non-invasive solutions, highlighting their potential to transform diabetes management globally.*

**Keywords:** *click chemistry, glucose, diabetes, sensor, boronic acid.*

## INTRODUCCIÓN

La *diabetes mellitus* es una enfermedad crónica que se caracteriza por la incapacidad del cuerpo para regular adecuadamente los niveles de glucosa en la sangre, ya sea por la falta de insulina o la ineficaz utilización de esta hormona. Existen diferentes tipos de diabetes, pero la de tipo 2 es la más común, ya que representa cerca del 95% de los casos a nivel mundial. En 2021, la Federación Internacional de Diabetes (IDF) estimaba que más de 537 millones de personas padecían diabetes en el mundo, y esta cifra podría aumentar a 783 millones para 2045 si no se toman medidas preventivas y correctivas (Federación Internacional de Diabetes, 2021).

El crecimiento de la diabetes está asociado a factores como el envejecimiento de la población, el aumento del sobrepeso, la obesidad, el sedentarismo y las dietas poco saludables, especialmente en países de ingresos bajos y medios donde el acceso a tratamientos es limitado. En México la situación es alarmante ya que el 75% de la población adulta padecen obesidad o sobrepeso y ocupa el sexto lugar en número de personas con diabetes a nivel mundial. Según la Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) 2022, el 14.1% de los adultos mayores de 20 años en México padece diabetes, un aumento significativo comparado con estudios previos. (Instituto Nacional de Salud Pública, 2022).

Debido a lo anterior y a la creciente prevalencia de la diabetes y la complejidad en su manejo, es esencial el desarrollo de nuevas tecnologías y moléculas que faciliten la detección y el monitoreo de la glucosa en la sangre de manera más precisa y eficiente. Un

ejemplo de ello es la química orgánica y la química de materiales que han jugado un papel crucial en la creación de sensores avanzados para la detección de glucosa, permitiendo así mejores soluciones para el diagnóstico y el monitoreo continuo de los pacientes (Sun & James, 2015).

En este contexto, la química click ha emergido como una herramienta revolucionaria para la detección de glucosa ya que se caracterizan por su alta eficiencia, selectividad y rapidez, lo que la hace ideales para aplicaciones biomédicas. Esta tecnología ha permitido el desarrollo de biosensores robustos y sensibles, que se basan en la funcionalización de superficies con moléculas que se unen específicamente a la glucosa. Los avances derivados de la química click han dado lugar a sensores precisos capaces de detectar glucosa en concentraciones muy bajas, lo que es crucial para el diagnóstico temprano y el monitoreo continuo de los niveles de glucosa en la sangre.

## DESARROLLO

A continuación, se presentan algunos ejemplos de la química click en el desarrollo de moléculas y nuevos materiales capaces de realizar la detección de glucosa. Se destaca el diseño de microchips inteligentes, moléculas fluorescentes sensitivas, materiales poliméricos y el uso de nanopartículas para el reconocimiento de glucosa.

### Microchips

Recientemente se ha reportado un diseño rápido y controlable de microchips superwetable (superhidrofóbicos y superhidrofilicos) mediante una reacción de click para aplicaciones en la detección eficiente de o-ftalaldehído y glucosa. El proceso de fabricación involucra la preparación de una película basada en acrilato de propargil y dimetacrilato de etileno utilizando luz ultravioleta (UV) como catalizador. Posteriormente, se crea un micropatrón superhidrofóbico-superhidrofilico mediante la reacción tiol-ino inducida por luz UV. Esta técnica permite una modificación selectiva de la superficie, donde las regiones expuestas se vuelven superhidrofilicas, mientras que las no expuestas permanecen superhidrofóbicas.

La detección de glucosa se basa en una reacción colorimétrica que utiliza glucosa oxidasa (GOx) para producir peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ). El peróxido de hidrógeno generado oxida yoduro de potasio (KI), lo que cambia el color según la concentración de glucosa. El microchip superwetable logra una detección reutilizable de glucosa con un límite de detección de 2 mM en 15 minutos, lo cual es más sensible y rápido que los dispositivos comerciales disponibles (Yang *et al.* 2019).

### Sensores fluorescentes

Adicionalmente, se desarrollaron puntos cuánticos fluorescentes (QDs) de CdZnTeS y un complejo dual emisivo mediante reacciones de química click para la detección de glucosa en sangre. Los QDs, sintetizados en un proceso único utilizando N-acetil-L-cisteína (NAC) y ácido mercapto succínico (MSA) como estabilizantes, demostraron alta estabilidad y un rendimiento cuántico del 73.7% en emisiones verdes. El complejo dual, formado por los QDs funcionalizados con azida y un conjugado de glucosa oxidasa (GOx) y carboxifluoresceína (FAM), combinó emisiones roja y verde, lo que mejoró la estabilidad y la actividad de GOx. Este sistema permitió la oxidación de glucosa por la GOx, generando peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), lo que apagaba la fluorescencia roja de los QDs mientras mantenía constante la emisión verde de FAM. El sensor resultante mostró una relación lineal precisa para concentraciones de glucosa entre 0.3 y 30 mM, con un límite de detección tan bajo como 0.035 mM. Además, permitió la detección visual de glucosa en muestras de suero sanguíneo en menos de 20 minutos con luz UV, destacando por su rapidez y sensibilidad en aplicaciones biomédicas (Yang *et al.* 2019).

### Materiales poliméricos

Por otro lado, se ha reportado la síntesis de un nanogel sensible a la glucosa mediante una copolimerización de química click tiol-eno en un solo paso. Los componentes clave incluyen ácido N-acrilóil-3-aminofenilborónico (PBA), diacrilato de polietilenglicol (PEGDA) y otros monómeros, que forman el nanogel con una estructura núcleo-capa. Este

nanogel tiene alta sensibilidad a la glucosa debido a la alta capacidad del PBA para formar complejos boronato-glucosa estables, generando una mayor hidrofobicidad e hinchamiento del nanogel. Este fenómeno facilita la liberación de fármacos como la insulina, cuya liberación se incrementa a medida que aumenta la concentración de glucosa. Además, se determinaron espectros de fluorescencia de los nanogeles en presencia de Rojo de Alizarina S (ARS), un compuesto que interactúa los grupos de ácido fenilborónico (PBA) formando un complejo fluorescente. En ausencia de glucosa, la ARS está unida al PBA, lo que genera una señal fluorescente fuerte. Sin embargo, cuando se añade glucosa, esta desplaza a la ARS del PBA debido a su mayor afinidad, lo que provoca una disminución en la fluorescencia (Zhao *et al.* 2013).

## Nanopartículas

Notablemente, se desarrolló un nanomaterial híbrido para la detección no enzimática de glucosa, compuesto por nanopartículas de plata (AgNPs) ancladas en nanotubos de carbono (CNTs) recubiertos con un polímero modificado (Ag@polymer/CNTs). Este material se obtuvo mediante reacciones de química click y fotodeposición, utilizando poli(estireno-alt-anhídrido maléico) funcionalizado con amina de furano, aplicado en condiciones suaves sin catalizadores externos. Las nanopartículas de plata, con un tamaño promedio de 10 nm, proporcionaron alta estabilidad y actividad catalítica, permitiendo la oxidación eficiente de la glucosa en medios alcalinos. El proceso mostró una sensibilidad notable, con una actividad electrocatalítica que aumentaba proporcionalmente a la concentración de glucosa y un control difusivo del proceso de oxidación. Ensayos de voltametría cíclica confirmaron la estabilidad del material tras múltiples ciclos de uso, destacando su potencial como sensor reutilizable para aplicaciones biomédicas y analíticas (Cao *et al.* 2022).

## CONCLUSIONES

La diabetes en México es un problema grave, reflejando las tendencias globales pero con características socioeconómicas propias del país. Su creciente prevalencia y complicaciones

requieren estrategias integrales, incluyendo políticas de prevención, mejora del acceso a tratamientos y educación sobre autocuidado. Sin intervenciones efectivas, la diabetes seguirá siendo una de las principales causas de mortalidad y carga económica en el país. Por otro lado, la química click ha revolucionado la detección de glucosa, permitiendo el desarrollo de biosensores avanzados que son rápidos, específicos y sensibles. Estas tecnologías no invasivas mejoran el diagnóstico y monitoreo continuo de pacientes diabéticos, facilitando un mejor manejo de la enfermedad y control de los niveles de glucosa.

## BIBLIOGRAFÍA

- Federación Internacional de Diabetes. (2021). *Diabetes atlas* (10.<sup>a</sup> ed.). <https://diabetesatlas.org/>
- Instituto Nacional de Salud Pública. (2022). *Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2022: Resultados nacionales*. <https://www.insp.mx/>
- (Huang, J., Yang, H., Mao, J., Guo, F., Cheng, Y., Chen, Z., Wang, X., Li, X., & Lai, Y. (2019). Rapid and controllable design of robust superwetable microchips by a click reaction for efficient o-phthalaldehyde and glucose detection. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5(11), 6186-6195. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.9b00821>)
- Sun, X., & James, T. D. (2015). Glucose sensing in supramolecular chemistry. *Chemical Reviews*, 115(15), 8001-8037. <https://doi.org/10.1021/cr500562m> (Yang, Y., Mao, G., Ji, X., & He, Z. (2022). Synthesis of bio-templated clickable quantum dots and a dual-emitting organic/inorganic complex for ratiometric fluorescence visual assay of blood glucose. *Journal of Materials Chemistry B*, 10(22), 4473-4478. <https://doi.org/10.1039/d2tb00435f>)
- Zhao, L., Xiao, C., Ding, J., He, P., Tang, Z., Pang, X., Zhuang, X., & Chen, X. (2013). Facile one-pot synthesis of glucose-sensitive nanogel via thiol-ene click chemistry for self-regulated drug delivery. *Acta Biomaterialia*, 9(5), 6535-6543. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.01.040>
- Cao, X. T., Tran, T. Q. N., Ngo, D. H., Tai, D. C., & Kumar, S. (2022). Click-chemistry-mediated synthesis of silver nanoparticle-supported polymer-wrapped carbon nanotubes: Glucose sensor and antibacterial material. *ACS Omega*, 7(42), 37095-37102. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02832>

# Química Click: Impulsando la sostenibilidad y la innovación en la educación superior mediante el uso de disolventes verdes

*Click Chemistry: Driving sustainability and innovation in higher education using green solvents*

Patricia Jaquelyne Esparza Vázquez<sup>a</sup>, Daniel Salvador Andrade Arias<sup>b</sup>  
y José Miguel Velázquez López<sup>c</sup>

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es demostrar cómo la química “click” ofrece alternativas simples y eficientes para la síntesis de productos químicos, destacando el uso de disolventes no contaminantes como una herramienta para optimizar las prácticas en laboratorios académicos y su posterior aplicación en el ámbito industrial. La integración de la química “click” en la educación no solo promueve una comprensión más profunda de la química sostenible, sino que también prepara a las nuevas generaciones para abordar desafíos ambientales con soluciones innovadoras, seguras y responsables.

**Palabras clave:** Química click, Síntesis, Disolvente orgánico, Disolvente acuoso, Formación académica.

## ABSTRACT

*The objective of this work is to demonstrate how click chemistry offers simple and efficient alternatives for the synthesis of chemical products, highlighting the use of non-polluting*

<sup>a</sup> Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Licenciatura en química. Correo: patricia.esparza8851@alumnos.udg.mx.

<sup>b</sup> Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Licenciatura en química. Correo: daniel.andrade8915@alumnos.udg.mx.

<sup>c</sup> Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Licenciatura en química. Correo: jmiguel.velazquez@academicos.udg.mx

*solvents as a tool to optimize practices in academic laboratories and their subsequent application in the industrial field. The integration of click chemistry in education not only promotes a deeper understanding of sustainable chemistry, but also prepares new generations to address environmental challenges with innovative, safe and responsible solutions.*

**Keywords:** *Click chemistry, Synthesis, Organic solvent, Aqueous solvent, Academic education.*

## INTRODUCCIÓN

El término “química click” fue introducido por Barry Sharpless y Morten Meldal en 2001 para referirse a un conjunto de reacciones altamente eficientes, selectivas, reproducibles y tolerantes a las distintas condiciones de reacción, permitiendo así la obtención de productos que requieren técnicas sencillas de purificación (Guadarrama et al., 2023). Todo ello con el propósito de optimizar la síntesis de compuestos complejos mediante reacciones químicas menos contaminantes, que, a su vez, promueve la innovación de los procesos en los sectores industriales y tecnológicos.

Los disolventes son sustancias comúnmente líquidas que tienen la capacidad de disolver un soluto, para formar una disolución del tipo homogénea (Araiza, 2020). Estos se pueden clasificar de forma general, en suaves o fuertes, en función del material que se desea disolver, que de igual manera se agrupan en familias como lo son los hidrocarburos aromáticos, alifáticos, alicíclicos, halogenados, alcoholes, cetonas, entre otros (Mora-Barrantes et al., 2021). Los disolventes son indispensables a nivel industrial, en laboratorios y en la vida diaria dentro de los hogares, etc. Por desgracia, los disolventes más utilizados son de naturaleza orgánica, por lo que contienen átomos de carbono, y son utilizados para disolver sustancias como pinturas, barnices, grasas y aceites (Mora-Barrantes et al., 2021). Este tipo de disolventes se caracterizan por ser altamente volátiles debido a sus bajos puntos de

ebullición, que han sido utilizados de manera individual o en combinación con otros agentes para su uso corriente como desengrasante, agente de limpieza, plastificante, lubricante, entre otros (Mora-Barrantes et al., 2021).

A pesar de sus múltiples aplicaciones, la mayor parte de disolventes orgánicos influyen en la contaminación del aire y agua, ya que, al evaporarse, estos se oxidan por fotodegradación o por la reacción con radicales gaseosos permaneciendo en el medio ambiente y contribuyendo al calentamiento global y a la disminución de la capa de ozono (Pena-Pereira & Tobiszewski, 2017).

Es por ello, que se ha recomendado el uso de disolventes verdes, que son considerados amigables con el medio ambiente, ya que reducen al mínimo o totalmente el riesgo de generar problemas a la salud a los seres vivos (Morales, 2013). Los disolventes que se han considerado menos problemáticos son el agua, líquidos iónicos, disolventes fluorados y el dióxido de carbono supercrítico (Morales, 2013).

## DESARROLLO

La mayor parte de reacciones químicas del tipo orgánicas utilizan disolventes por varios propósitos, tales como el aumentar la velocidad y/o selectividad de la reacción, o también como un medio de transferencia del calor generado por una reacción exotérmica para reducir los gradientes térmicos en el recipiente de reacción, y permitir una reacción suave y segura (Morales, 2013).

El uso de disolventes en el sector académico es vital en diversas operaciones como la disolución de reactivos, extracciones, lavados y separaciones de mezclas (Mora-Barrantes et al., 2021). Por esta razón, el uso de la química “click” como un principio de la química verde, fomenta la síntesis de compuestos de forma sostenible con el medio ambiente. Este enfoque prioriza el uso de disolventes verdes, evitando aquellos que son altamente contaminantes y que, además de su impacto ambiental, demandan un consumo elevado de energía para su eliminación durante su uso en los diversos procesos (Clarke et al., 2018).

Al implementar el uso de este tipo de disolventes en el área académica puede tener un impacto significativo en la formación de profesionistas, ya que priorizarían el desarrollo de

nuevas metodologías que disminuyan el impacto ambiental de los productos y subproductos generados.

El agua se ha denominado como “disolvente universal” debido a que no es flamable, ni tóxico, además de ser la molécula más abundante en el planeta. En términos químicos el agua es un disolvente eficaz dado a su capacidad de disolver iones y moléculas polares, incluyendo la facilidad que tiene de formar puentes de hidrógeno o interacciones del tipo ion-dipolo (Carbajal & González, 2012). Es común que el agua presente condiciones de reacción sencillas, además de que puede facilitar el intercambio de ligandos en reacciones catalizadas con metales de transición o incluso, con aquellos catalizadores afines al agua, pueden ser reutilizados después de un proceso de filtración o decantación del producto insoluble en el medio (Morales, 2013).

Los líquidos iónicos tienen la característica de ser altamente estables química y térmicamente, pero principalmente tienen la ventaja de presentar una presión vapor prácticamente nula, por lo que pueden ser considerados disolventes benignos al ecosistema. Dado a la gran cantidad de aniones y cationes que se pueden constituir, se pueden generar numerosos líquidos iónicos con diferentes propiedades, que los hacen susceptibles a múltiples aplicaciones en la síntesis química (Morales, 2013).

Un líquido fluorado es el derivado de algunos compuestos orgánicos (tales como alcanos, ésteres y aminas) en el que se han sustituido enlaces C-H por C-F, y poseen la característica de imitar la reactividad de moléculas orgánicas convencionales, debido a las propiedades que le confieren los átomos de flúor, como lo es su electronegatividad, tamaño atómico o su resistencia a la descomposición, sin perder su estabilidad y/o resistencia a condiciones extremas (Morales, 2013).

En contraste, este es el propósito de la química “click”, buscar alternativas simples y eficientes en la generación de productos químicos, ya que, al utilizar disolventes no contaminantes, es una forma de optimizar las prácticas llevadas a cabo en los laboratorios académicos, y posteriormente implementarlos en el área laboral. Al incorporar la química “click” en la educación, se fomenta una comprensión de la química responsable y se prepara a las nuevas generaciones para enfrentar los desafíos ambientales de manera innovadora y segura.

Las universidades mexicanas, al investigar y desarrollar reacciones “click”, pueden disminuir su dependencia de compuestos nocivos y así llevar a cabo la síntesis de compuestos orgánicos en un menor tiempo y posiblemente un menor gasto energético. Esto contribuye a un menor impacto ambiental y mejora la seguridad en los procesos de síntesis, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y salud pública. Esta transición no solo beneficia al entorno, sino que también posicionaría a las instituciones educativas mexicanas como líderes en prácticas químicas sostenibles.

Implementar estas prácticas en el ámbito académico fomenta una cultura de sostenibilidad entre los estudiantes, preparándolos para enfrentar desafíos ambientales de manera innovadora y responsable. Así, se impulsa la investigación y el desarrollo de soluciones más ecológicas en la química, promoviendo un futuro más sostenible.

## CONCLUSIÓN

La química click, junto con el uso de disolventes verdes, ofrece una alternativa eficiente y ambientalmente responsable para la síntesis de compuestos orgánicos. Las reacciones click destacan por su simplicidad, selectividad y eficiencia, mientras que los disolventes verdes, como el agua, líquidos iónicos y líquidos fluorados, reducen de manera notable los riesgos ambientales y de salud vinculados al uso de disolventes orgánicos convencionales, frecuentemente contaminantes.

Este enfoque no solo optimiza los procesos químicos, haciéndolos más seguros y menos contaminantes, sino que también representa una estrategia clave para reducir la contaminación del aire y el agua, contribuyendo a la sostenibilidad y la preservación del medio ambiente. Al implementar la química click en el ámbito académico, se fomenta una cultura de sostenibilidad entre los estudiantes, preparándolos para adoptar prácticas químicas responsables en su futuro profesional. Además, el uso de estos métodos innovadores puede reducir el consumo de energía, el tiempo de síntesis, y la dependencia de compuestos tóxicos, lo que beneficia tanto a las instituciones educativas como a los sectores industriales y tecnológicos.

En resumen, la combinación de la química click y los disolventes verdes no solo mejora la seguridad y eficiencia de los procesos químicos, sino que también impulsa una transición

hacia una química más sostenible, preparando a las nuevas generaciones para enfrentar los desafíos ambientales de manera innovadora y consciente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Araiza, D. (2020). *Procedimiento de operación para el manejo de disolventes*.
- Carbajal, Á., & González, M. (2012). Propiedades y funciones biológicas del agua. In *Funciones biológicas del agua en relación con sus características físicas y químicas*. (2003rd ed., pp. 63–78). Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Clarke, C. J., Tu, W.-C., Levers, O., Bröhl, A., & Hallett, J. P. (2018). Green and Sustainable Solvents in Chemical Processes. *Chemical Reviews*, 118(2), 747–800. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00571>
- Guadarrama, P., López-Méndez, L. J., Cabrera-Quñones, N. C. y Cruz-Hernández, C. A. (2023, enero-marzo). Versátil como ninguna, la química clic y su trascendencia en áreas diversas: de la ciencia de materiales a la investigación farmacéutica. *Educación Química*, 34(1). <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.1.84649>
- Mora-Barrantes, J. C., Morera Ramos, L., Ulate-Salas, M., Núñez-Agüero, V., Acuña-Salazar, E., & Cordero-Carvajal, M. (2021). Clasificación del riesgo químico de solventes orgánicos mediante la aplicación del método “CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents.” *Revista Tecnología En Marcha*, 35(1), 1–16. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5370>
- Morales, X. (2013). *Los disolventes en la química verde*. Instituto Politécnico Nacional.
- Pena-Pereira, F., & Tobiszewski, M. (2017). The need to use solvents. In *The Application of Green Solvents in Separation Processes* (2017th ed., pp. 3–16). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805297-6.00001-2>

# Aplicaciones de la química click en el desarrollo de nuevas herramientas terapéuticas

## *Applications of click chemistry in the development of new therapeutic tools*

Domínguez Fonseca Estefanía<sup>a</sup> y Gutiérrez Gutiérrez Filiberto<sup>b</sup>

### RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es explorar cómo la química “click” ha revolucionado el desarrollo de herramientas terapéuticas avanzadas, con un enfoque en aplicaciones teranósticas que integran simultáneamente la terapia y el diagnóstico. Este trabajo busca analizar el uso de aminoácidos no canónicos modificados con grupos azida para facilitar la conjugación precisa de anticuerpos y fármacos, permitiendo la liberación selectiva de medicamentos en sitios específicos a través del complejo antígeno-anticuerpo. Asimismo, se propone destacar el impacto de esta tecnología en la mejora de la eficacia, potencia y seguridad de tratamientos personalizados, posicionando la química “click” como una solución innovadora en el ámbito farmacéutico.

**Palabras clave:** química click, teranóstico, desarrollo de fármacos, salud.

### ABSTRACT

*The objective of the present work is to explore how click chemistry has revolutionized the development of advanced therapeutic tools, with a focus on theranostic applications that*

<sup>a</sup> Universidad de Guadalajara - Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías- Blvd. Gral. Marcelino García Barragán 1421, Olímpica, 44430 Guadalajara, Jal.

<sup>b</sup> Universidad de Guadalajara - Departamento de Salud-Enfermedad como Proceso Individual y Colectivo, Centro Universitario de Tlajomulco- Carretera Tlajomulco - Santa Fé Km. 3.5 No.595 Lomas de Tejada, 45641 Tlajomulco de Zúñiga, Jal. Correo: filiberto.gutierrez@academicos.udg.mx.

*simultaneously integrate therapy and diagnostics. This work seeks to analyze the use of non-canonical amino acids modified with azide groups to facilitate the precise conjugation of antibodies and drugs, allowing the selective release of drugs at specific sites through the antigen-antibody complex. It is also proposed to highlight the impact of this technology in improving the efficacy, potency and safety of personalized treatments, positioning click chemistry as an innovative solution in the pharmaceutical field.*

**Keywords:** *click chemistry, theranostics, drug development, health.*

## INTRODUCCIÓN

El término “química click” fue acuñado en 2001 para describir reacciones químicas fáciles de llevar a cabo, con alto rendimiento, estereoespecíficas y que generaran solo subproductos inofensivos (Kolb et al., 2001). Desde entonces, las aplicaciones de esta estrategia sintética en la industria farmacéutica han sido un área en constante desarrollo gracias a sus múltiples bondades. Además de las ya descritas, los procesos y productos de la química click se caracterizan por su bioortogonalidad, esto quiere decir que pueden llevarse a cabo dentro de sistemas vivos sin crear interferencia con sus procesos bioquímicos (Moses & Moorhouse, 2007). Por esta razón, la química click presenta múltiples aplicaciones en la industria farmacéutica, desde en sistemas de liberación de fármacos, como farmacóforos en el diseño de nuevas moléculas e incluso para el ensamblado molecular dentro de los propios sistemas vivos (*in situ*) (Kolb & Sharpless, 2003).

## APLICACIONES DE LA QUÍMICA CLICK EN EL DESCUBRIMIENTO DE FÁRMACOS

Entre las reacciones de química click, la más representativa es la cicloadición 1,3-dipolar entre un alquino terminal y una azida, conocida como reacción de Huisgen. Dicha reacción

fue optimizada en 2002, tras el desarrollo por Meldal y colaboradores, de una variante catalizada por especies de cobre (Tornøe et al., 2002). Gracias a este avance, fue posible la creación de bibliotecas basadas en la formación de triazoles, mismas que permitieron una simple y rápida metodología de ensamblajes químicos, resultando en importantes desarrollos industriales, por ejemplo, Lexicon pharmaceuticals, Inc.® llevó a cabo la producción de 200 000 compuestos, cada uno en 1-2 pasos sintéticos, creando una librería útil para el cribado de alto rendimiento de compuestos, el rápido ensamblaje de grupos farmacofóricos, entre otras aplicaciones, lo cual le valió un premio Nobel de química en 2001 al Dr. K. Barry Sharpless (Kolb & Sharpless, 2003). Otro ejemplo, es la preparación de una biblioteca de arilcarbamidias con aplicaciones dopaminérgicas, como ligantes del receptor D4 de dopamina (Löber et al., 2003). Del mismo modo, Pérez-Balderas y colaboradores desarrollaron una biblioteca de glicoconjugados, mono y multivalentes, para el desarrollo de ligantes con unión a receptores celulares, para lo cual emplearon la reacción de Huisgen como bloque farmacofórico para la síntesis de los compuestos (Pérez-Balderas et al., 2003).

Todo esto demuestra la versatilidad de la química click para eficientizar y agilizar el proceso de descubrimiento de fármacos. Esta estrategia presenta como ventajas el uso de reactivos baratos, fáciles de obtener, condiciones de reacción simples y de pocos pasos, lo que reduce los costos y tiempos en el desarrollo de compuestos innovadores. Todo esto contribuye al desarrollo de procesos más limpios y seguros para el medio ambiente, con menos residuos, fáciles de manejar y eliminar, lo que mejora los procesos industriales, reduciendo los costos de infraestructura. Con ello, se permite la producción responsable a menor costo, volviéndolo más asequible y seguro para mantener la salud y bienestar de la población.

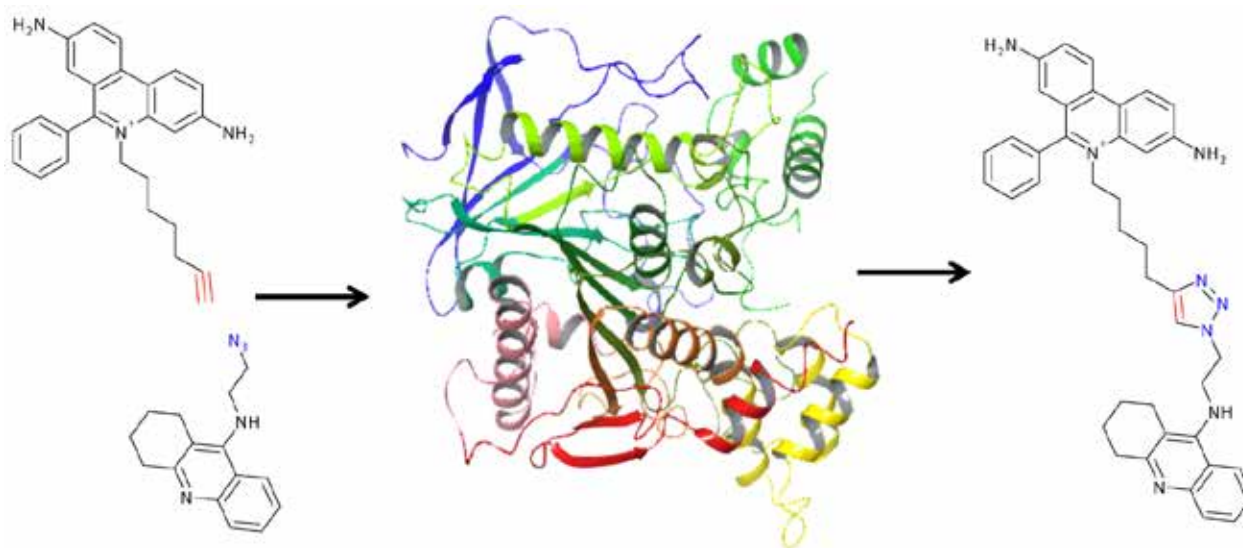
## **APLICACIONES EN LA TERANÓSTICA**

Una de las aplicaciones más importantes de la química click en la farmacología son las aplicaciones teranósticas (que combina terapia y diagnóstico en un solo preparado). Por ejemplo, se han utilizado aminoácidos no canónicos para la conjugación de anticuerpos y fármacos, promoviendo su liberación selectiva en el sitio diana del anticuerpo cuando se

forma el complejo antígeno-anticuerpo, todo esto es posible gracias a la incorporación de un grupo azida en un aminoácido. Esto permite la formación de un sitio de anclaje entre el fármaco y el anticuerpo, haciendo posible su marcaje para el diagnóstico, su liberación selectiva y el tratamiento mejorado, permitiendo incrementar la potencia y la eficacia en fármacos con márgenes de seguridad estrecha (Vanbrunt et al., 2015).

## RETOS EMERGENTES DE LA QUÍMICA CLICK

A pesar de todas las ventajas demostradas con el uso de la química click, siguen existiendo retos emergentes en su implementación, por ejemplo, se ha demostrado que el cobre utilizado en la catálisis puede bioacumularse en algunos organismos, por lo que su uso continuo podría generar un riesgo potencial a la salud. En este sentido, se ha propuesto el uso de enzimas como sustitutas en el proceso de catálisis, entre las cuales destaca la acetilcolinesterasa, la cual es capaz de llevar a cabo el autoensamblaje de su propio inhibidor, con alta selectividad y potencia, incluso por encima de otros inhibidores conocidos, como se muestra en la **Figura 1** (Lewis et al., 2002; Manetsch et al., 2004).



**Figura 1:** Representación esquemática del autoensamblaje por enzimas de su propio inhibidor.

Otra alternativa al uso de cobre en esta reacción fue desarrollada por Bertozzi y colaboradores, en donde se usaron alquinos estéricamente impedidos por la incorporación en ciclos (ciclooctinos), lo que permite la obtención de triazoles de forma eficaz sin necesidad de un catalizador de cobre (Agard et al., 2004). Esto permitió el desarrollo de etiquetas de proteoglicano en la superficie celular, las cuales permiten a las células identificar de forma selectiva a la proteína PTK-7, la cual es un marcador selectivo de cáncer de mama, lo que permite la liberación selectiva de fármacos en las células cancerosas, el diagnóstico y la aplicación combinada en forma de teranósticos (Robinson et al., 2015).

## **INTEGRACIÓN ACADEMIA-INDUSTRIA-GOBIERNO EN EL DESARROLLO DE LA QUÍMICA CLICK CON APLICACIONES FARMACÉUTICAS**

La colaboración entre la academia y la industria es fundamental para aprovechar al máximo estas técnicas. Las universidades e instituciones de investigación pueden desarrollar nuevas metodologías basadas en la química click para la síntesis de moléculas complejas, así como la formación de nuevos profesionistas, con conocimientos técnicos y científicos, desde una visión sostenible y humanista, mientras que la industria farmacéutica puede proporcionar los recursos y la infraestructura necesarios para llevar estos avances al mercado, que respondan a necesidades no solamente económicas, sino también sociales y medioambientales. Además, el gobierno debe apoyar estas iniciativas mediante financiamiento y regulaciones que faciliten la transición de la investigación básica a la aplicación clínica que repercutan directamente en la mejora del acceso a la salud.

## **CONCLUSIONES**

El descubrimiento de compuestos prometedores en el diseño de fármacos es un proceso que requiere la creación de amplias bibliotecas de compuestos, que resultan

costosas, poco versátiles, con procesos de síntesis complejos, con múltiples pasos, que generan gran cantidad de residuos y que toman mucho tiempo hasta conseguir una molécula innovadora. En este sentido, la química click ha demostrado ser una herramienta muy útil para el desarrollo rápido, eficiente, seguro y asequible de bibliotecas de compuestos robustas, que permiten eficientizar el proceso de descubrimiento de nuevos fármacos, lo que es una gran ventaja en la industria farmacéutica. Además, la exploración de nuevas aplicaciones de la química click ha permitido su implementación en el diagnóstico y liberación de fármacos. Lo anterior permite el desarrollo de nuevos preparados farmacéuticos con propiedades teranósticas, potentes, eficaces y específicos, contribuyendo aún más en las alternativas para el desarrollo de nuevos compuestos con aplicaciones farmacéuticas. Sin embargo, para que esto ocurra, es indispensable que la academia, la industria y el gobierno trabajen de manera conjunta y alineada, maximizando los recursos disponibles y creando un entorno propicio para la innovación. Esta colaboración no solo permitirá abordar los desafíos actuales del sistema de salud, sino que también posicionará a México como un referente en el uso de tecnologías avanzadas en farmacología.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agard, N. J., Prescher, J. A., & Bertozzi, C. R. (2004). A Strain-Promoted [3 + 2] Azide–Alkyne Cycloaddition for Covalent Modification of Biomolecules in Living Systems. *Journal of the American Chemical Society*, 126(46), 15046–15047. <https://doi.org/10.1021/ja044996f>
- Kolb, H. C., Finn, M. G., & Sharpless, K. B. (2001). Click Chemistry: Diverse Chemical Function from a Few Good Reactions. In *Angewandte Chemie - International Edition* (Vol. 40, Issue 11, pp. 2004–2021). [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20010601\)40:11<2004::AID-ANIE2004>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20010601)40:11<2004::AID-ANIE2004>3.0.CO;2-5)
- Kolb, H. C., & Sharpless, K. B. (2003). *The growing impact of click chemistry on drug discovery*. 8(24), 1128–1137. [https://doi.org/10.1016/S1359-6446\(03\)02933-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6446(03)02933-7)

- Lewis, W. G., Green, L. G., Grynszpan, F., Radic, Z., Carlier, P. R., Taylor, P., Finn, M. G., & Barry Sharpless, K. (2002). Click Chemistry In Situ: Acetylcholinesterase as a Reaction Vessel for the Selective Assembly of a Femtomolar Inhibitor from an Array of Building Blocks\*\*. In *Angew. Chem. Int. Ed* (Vol. 41, Issue 6). <http://www.angewandte.com>
- Löber, S., Rodriguez-Loaiza, P., & Gmeiner, P. (2003). Click linker: Efficient and high-yielding synthesis of a new family of SPOS resins by 1,3-dipolar cycloaddition. *Organic Letters*, 5(10), 1753–1755. <https://doi.org/10.1021/ol034520l>
- Manetsch, R., Krasinski, A., Radić, Z., Raushel, J., Taylor, P., Sharpless, K. B., & Kolb, H. C. (2004). In Situ Click Chemistry: Enzyme Inhibitors Made to Their Own Specifications. *Journal of the American Chemical Society*, 126(40), 12809–12818. <https://doi.org/10.1021/ja046382g>
- Pérez-Balderas, F., Ortega-Muñoz, M., Morales-Sanfrutos, J., Hernández-Mateo, F., Calvo-Flores, F. G., Calvo-Asín, J. A., Isac-García, J., & Santoyo-González, F. (2003). Multivalent neoglycoconjugates by regiospecific cycloaddition of alkynes and azides using organic-soluble copper catalysts. *Organic Letters*, 5(11), 1951–1954. <https://doi.org/10.1021/ol034534r>
- Robinson, P. V., De Almeida-Escobedo, G., De Groot, A. E., Mckechnie, J. L., & Bertozzi, C. R. (2015). Live-Cell Labeling of Specific Protein Glycoforms by Proximity-Enhanced Bioorthogonal Ligation. *Journal of the American Chemical Society*, 137(33), 10452–10455. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b04279>
- Tornøe, C. W., Christensen, C., & Meldal, M. (2002). Peptidotriazoles on solid phase: [1,2,3]-Triazoles by regiospecific copper(I)-catalyzed 1,3-dipolar cycloadditions of terminal alkynes to azides. *Journal of Organic Chemistry*, 67(9), 3057–3064. <https://doi.org/10.1021/jo011148j>
- Vanbrunt, M. P., Shanebeck, K., Caldwell, Z., Johnson, J., Thompson, P., Martin, T., Dong, H., Li, G., Xu, H., D’Hooge, F., Masterson, L., Bariola, P., Tiberghien, A., Ezeadi, E., Williams, D. G., Hartley, J. A., Howard, P. W., Grabstein, K. H., Bowen, M. A., & Marelli, M. (2015). Genetically Encoded Azide Containing Amino Acid in Mammalian Cells Enables Site-Specific Antibody-Drug Conjugates Using Click Cycloaddition

Chemistry. *Bioconjugate Chemistry*, 26(11), 2249–2260. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.5b00359>



# Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno

# 03

ENE-JUN 2025

ISSN: EN TRÁMITE

[www.revistaestudiosieeg.com](http://www.revistaestudiosieeg.com)

Estudios Interdisciplinarios de Economía, Empresa y Gobierno Año 2, No. 3, Enero-Junio 2025, es una publicación semestral, editada por la Universidad de Guadalajara, a través del Departamento de Economía y Ciencias Políticas y por la División de Ciencias Económicas, Empresa y Gobierno del Centro Universitario de Tonalá. Domicilio Av. Nuevo Periférico No. 555, Ejido San José Tateposco, C.P. 45425, Tonalá, Jalisco, México; Tel. 3320002300; página web <https://revistaestudiosieeg.com/index.php/eieeg>, correo electrónico [reieeg@cutonala.udg.mx](mailto:reieeg@cutonala.udg.mx), Editor responsable: Dr. Julio Santiago Hernández. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo 04-2024-062016595700-102, ISSN: en trámite, otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de éste número: Departamento de economía y ciencias políticas, con domicilio en Av. Nuevo Periférico No. 555, Ejido San José Tateposco C.P. 45425, Tonalá, Jalisco, México, Dr. Julio Santiago Hernández. Fecha de la última modificación 10 de enero de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad de Guadalajara.



UNIVERSIDAD DE  
GUADALAJARA  
Red Universitaria de Jalisco

