

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^a y Irma Idalia Rangel Salas^b

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.

^a 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

^b 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

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).

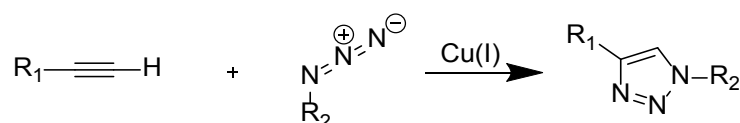


Figura 1 - Reacción CuAAC

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^{3+} 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^{6+} 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*.