

El papel de la innovadora química click y bioortogonal en el desarrollo de tratamientos sostenibles contra el cáncer en México

The role of innovative click and bioorthogonal chemistry in the development of sustainable cancer treatments in Mexico

Francisco Javier Moreno Mora^a, Noé Isaías Gómez Arámbula^b,
Elena Sarahí Chávez Hernández^c y Jorge Sánchez Camarena^d

RESUMEN

El artículo analiza la utilidad de la química click y la química bioortogonal para el tratamiento del cáncer en México, resaltando su relevancia en el campo de la biomedicina. Estas técnicas, creadas por Morten P. Meldal, K. Barry Sharpless y Carolyn R. Bertozzi, facilitan las reacciones químicas en la producción de productos químicos, tales como fármacos. Se identifica como principal desafío los elevados costos de los tratamientos oncológicos, proponiéndose la colaboración internacional entre entidades académicas como el Instituto de Tecnología de Massachusetts (por sus siglas en inglés, MIT) o al Colegio Universitario de Londres (por sus siglas en inglés, UCL) y entidades nacionales como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en el empleo de la química bioortogonal para alcanzar tratamientos más eficaces y potencialmente más asequibles y económicos. Asimismo, se examina la forma en que estas tecnologías pueden contribuir a un sistema de

^a Universidad de Guadalajara, Secretaría de Educación Media Superior (SEMS), Preparatoria No. 9. e-mail: francisco.moreno6058@alumnos.udg.mx

^b Universidad de Guadalajara, Secretaría de Educación Media Superior (SEMS), Preparatoria No. 9. e-mail: noe.gomez6072@alumnos.udg.mx

^c Universidad de Guadalajara, Secretaría de Educación Media Superior (SEMS), Preparatoria No. 9. e-mail: elena.chavez5704@alumnos.udg.mx

^d Coordinador del programa de Internacionalización de la Preparatoria No. 9 (Zapopan). Universidad de Guadalajara, Secretaría de Educación Media Superior (SEMS). e-mail: jorge.scamarena@academicos.udg.mx

salud más equitativo e innovador en México, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave: Química click, Bioortogonal, Cáncer, ODS, Cooperación internacional

ABSTRACT

The article analyzes the usefulness of click chemistry and bioorthogonal chemistry for the treatment of cancer in Mexico, highlighting their relevance in the field of biomedicine. These techniques, created by Morten P. Meldal, K. Barry Sharpless and Carolyn R. Bertozzi, facilitate chemical reactions in the production of chemical products, such as drugs. The main challenge is identified as the high costs of cancer treatments, proposing international collaboration between academic institutions such as the Massachusetts Institute of Technology (MIT) or the University College London (UCL) and national institutions such as the National Autonomous University of Mexico (UNAM) in the use of bioorthogonal chemistry to achieve more effective and potentially more affordable and economical treatments. It also examines how these technologies can contribute to a more equitable and innovative health system in Mexico, aligning with the Sustainable Development Goals.

Keywords: Click Chemistry, Bioorthogonal, Cancer, SDGs, International cooperation.

INTRODUCCIÓN: EL IMPACTO DE LA QUÍMICA CLICK Y BIOORTOGONAL EN LA CIENCIA MODERNA

La química click y la química bioortogonal han emergido como enfoques revolucionarios en el campo de la química moderna, ofreciendo soluciones innovadoras a problemas complejos en biomedicina y otros sectores. Estos conceptos se han consolidado gracias a los trabajos de investigadores como Morten Meldal, K. Barry Sharpless y Carolyn R. Bertozzi, cuyos descubrimientos, incluyendo la cicloadición de azida-alquino catalizada por

cobre (CuAAC) y la cicloadición de azida-alquino sin catalizador de cobre (SPAAC), que permite reacciones químicas dentro de sistemas vivos sin interferir en procesos naturales, han abierto nuevas posibilidades en ramas como la biomedicina, transformado la síntesis de moléculas y el desarrollo de fármacos; por ello les fue otorgado el premio nobel de química 2022 (Royal Swedish Academy of Sciences, 2022). El creciente uso de estas herramientas impulsa la necesidad de fomentar la cooperación internacional, especialmente en países como México, donde su integración podría impulsar la sostenibilidad del sistema de salud al mejorar la eficacia terapéutica y reducir costos a largo plazo.

MARCO TEÓRICO: DEFINICIÓN Y PRINCIPIOS DE LA QUÍMICA CLICK Y BIOORTOGONAL

La química click, propuesta en 2001 por K. Barry Sharpless, se refiere a un tipo de reacciones químicas rápidas, eficientes y muy selectivas que producen productos con alto rendimiento, bajo costo y poca generación de subproductos no deseados; por otro lado, el término química bioortogonal se refiere a cualquier reacción química que pueda ocurrir dentro de los sistemas vivos sin interferir con los procesos bioquímicos naturales (Nobel Prize, 2022).

Uno de los elementos que ha hecho que tenga más importancia este descubrimiento es la sencillez, porque no importa qué tan sofisticado sea algo, o qué tan complejo pueda ser diseñarlo, si al ponerlo en práctica es fácil. Gracias a estas técnicas, se han podido alterar moléculas específicas para crear y mejorar fármacos ya existentes, entre otros tratamientos. “Ha permitido la creación de medicamentos en los cuales lo que se hace es tomar un fármaco que se sabe es aplicable para un determinado cáncer, pudiendo ser más específicos en la destrucción de la célula sin dañar a otros organismos”, destacó Zinser (Sánchez, 2022). Adicionalmente, estas metodologías abren nuevas vías hacia tratamientos de menor toxicidad y mayor sostenibilidad clínica (Mir & Banik, 2025; Li et al., 2024).

La sencillez y eficacia de estas técnicas, como la CuAAC y la SPAAC, han facilitado la modificación de moléculas específicas, optimizando la exactitud de los tratamientos con medicamentos, como en el caso del cáncer.

PROBLEMÁTICA: EL DESAFÍO DEL CÁNCER EN MÉXICO Y LOS COSTOS DEL TRATAMIENTO

A pesar de los avances internacionales sobre las aplicaciones de la química click en países en desarrollo como México, el cáncer sigue siendo una de las enfermedades más costosas y difíciles de tratar. El Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) ha invertido más de 1,850 millones de pesos en equipos médicos para el tratamiento del cáncer (2018), siendo el padecimiento más costoso de acuerdo con los datos de Gastos Médicos Mayores (GMM) de AXA México, con un costo promedio de tratamiento de 386,000 pesos. En el 2023 los costos de tratamiento aumentaron 11% en comparación con el año anterior (Rendón, 2020). Los tratamientos de cáncer de mama ascienden a 245,000 pesos, mientras que los de leucemia pueden llegar a 875,000 pesos. Estos elevados costos llevan a un seguimiento incompleto del tratamiento y por ende un aumento de mortalidad (Accesos, 2024). Según Gutiérrez et al. (2024), el acceso y la calidad de la atención oncológica en México presentan grandes desigualdades entre estados, lo que evidencia la urgencia de adoptar innovaciones tecnológicas sostenibles y equitativas para mitigar esta brecha.

De acuerdo con los datos del Departamento de Hematología del Instituto Nacional de Cancerología (INCan) en México se diagnostican cada año alrededor de 195, 500 casos de cáncer en sus diferentes tipos, 46% de pacientes fallecen por esta causa. Cifras del 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) indican que, en México, la leucemia y el cáncer hematológico representa 50% de los cánceres infantiles y es una de las principales causas de deceso por cáncer en adultos varones (Secretaría de Salud, s.f.).

SOLUCIONES INTERNACIONALES: AVANCES EN EL TRATAMIENTO DEL CÁNCER A TRAVÉS DE LA QUÍMICA CLICK

Diversas instituciones de investigación alrededor del mundo están aprovechando los avances de la química click para desarrollar tratamientos contra el cáncer. Por ejemplo, en Estados Unidos, el *Koch Institute* en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (por sus

siglas en inglés, MIT) es un líder mundial en la investigación del cáncer y el desarrollo de tecnologías para la liberación de fármacos. Utilizan la química click en el desarrollo de nanopartículas y polímeros funcionalizados para mejorar tratamientos dirigidos, reduciendo los efectos secundarios de las quimioterapias (The Johnson Research Group, 2024). En Europa, el Colegio Universitario de Londres (por sus siglas en inglés, UCL) trabaja en colaboración con la Universidad de Stanford para poder unir anticuerpos de las células T para poder identificar células cancerígenas y destruirlas, aunque sólo está mostrando efecto en cáncer sanguíneo (2023).

Estos descubrimientos, plantean la posibilidad de producir tratamientos más efectivos y menos dañinos, así como ser potencialmente más económicos para los pacientes. La cooperación internacional para hacer llegar estos conocimientos a otras partes del mundo, así como permitir ampliar el rango de investigación y de investigadores, es la clave para unir esfuerzos y lograr avances sin precedentes en la cancerología. La aplicación de estas tecnologías permite tratamientos más personalizados, eficaces y potencialmente más accesibles, alineados con una perspectiva de salud sostenible. Esto es respaldado por estudios como el de Li et al. (2024), donde se propone un sistema nanocarreador activado por bioortogonalidad capaz de superar la heterogeneidad tumoral, aumentando eficacia terapéutica con menor carga tóxica.

OPORTUNIDADES PARA MÉXICO: COOPERACIÓN INTERNACIONAL, TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA Y SOSTENIBILIDAD

Pese a que México ya está trabajando en proyectos similares mediante los centros de investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) (2022), el poder cooperar internacionalmente entre instituciones, con una ventaja mayor en la investigación del tema como lo son el MIT y la UCL, generarían avances científicos y tecnológicos gracias a las aplicaciones de la química bioortogonal en el campo de la cancerología, para introducir nuevas áreas de trabajos y a su vez, mejorar la esperanza y calidad de vida de los mexicanos con los resultados obtenidos en estas áreas.

Si bien instituciones como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) o el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (2022) ya participan en proyectos biotecnológicos, la cooperación con centros de excelencia como el MIT podría acelerar la transferencia tecnológica. La integración de la química click y bioortogonal podría reducir el uso indiscriminado de quimioterapia, al permitir tratamientos dirigidos que conllevan menores costos y efectos secundarios. Por ejemplo, Mir y Banik (2025) destacan que el uso de productos naturales y tecnologías como la nanotecnología y la biocatálisis puede fortalecer la sostenibilidad terapéutica, al reducir residuos tóxicos, aumentar la biocompatibilidad y fomentar tratamientos más accesibles.

CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE: INNOVACIÓN EN SALUD Y CIENCIA

La química click y la química bioortogonal representan avances clave en la búsqueda de soluciones innovadoras para mejorar la salud pública en México, alineándose directamente con algunos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, su aplicación contribuye al ODS 3: Salud y Bienestar, al permitir el desarrollo de tratamientos más efectivos y específicos para enfermedades como el cáncer, lo que mejora la calidad de vida y reduce los efectos secundarios de los tratamientos tradicionales. Además, con el apoyo de tecnologías avanzadas provenientes de centros en Estados Unidos y Europa, refuerza el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura, al fomentar la innovación en la biotecnología y la medicina en México. Finalmente, la colaboración entre países y el intercambio de conocimiento científico abonan al ODS 17: Alianzas para Lograr los Objetivos, permitiendo que México acceda a tecnologías y avances que podrían revolucionar su sistema de salud y avanzar hacia un tratamiento más equitativo y eficiente de las enfermedades (Gamez, 2022; Naciones Unidas en México, s.f.).

CONCLUSIÓN: EL FUTURO DE LA QUÍMICA CLICK EN MÉXICO Y SU POTENCIAL PARA COMBATIR EL CÁNCER

La química click y bioortogonal son herramientas clave en el tratamiento de enfermedades como el cáncer, ofreciendo tratamientos más precisos y menos invasivos; la evidencia revisada demuestra que estas tecnologías son viables y necesarias para abortar los tratamientos de cáncer desde una perspectiva innovadora y sostenible. Sin embargo, su implementación está limitada por barreras económicas y la escasa colaboración internacional. Superar estas limitaciones permitirá no sólo reducir costos, sino fortalecer la sostenibilidad del sistema de salud mediante terapias más efectivas.

REFERENCIAS

- Accesos. (2024, 16 de abril). Cáncer, la enfermedad más costosa de 2023 en México. *Accesos*. <https://www.accesos.mx/salud/cancer-la-enfermedad-mas-costosa-de-2023-en-mexico/>
- CINVESTAV. (2022). Hacer fácil lo complicado: sobre el premio Nobel de química 2022. *Conexión CINVESTAV*. <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/hacer-facil-lo-complicado-sobre-el-premio-nobel-de-quimica-2022>
- Gamez, M. J. (2022, 24 de mayo). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Gutiérrez, J. P., García-Saisó, S., Hernández-Ávila, J. E., & Mokdad, A. H. (2024). *Performance evaluation of Mexico's health system at the national and subnational level, 1990–2019: An analysis of the health access and quality index*. The Lancet Regional Health – Americas, 25, 100621. <https://doi.org/10.1016/j.lana.2024.100621>
- Instituto Mexicano del Seguro Social. (2018, marzo 6). IMSS invierte más de 1,850 mdp en equipos de alta tecnología para atender a pacientes con cáncer. <https://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/201803/065>

- Li, Y., Chen, X., Wu, Z., Wang, J., & Liu, H. (2024). *A tumor heterogeneity-independent antigen-responsive nanocarrier enabled by bioorthogonal pretargeting and click-activated self-immolative polymer*. *Nature Nanotechnology*, 19(3), 312–321. <https://doi.org/10.1038/s41565-024-01450-0>
- Mir, M. A., & Banik, B. K. (2025). *Sustainable healing: Natural compounds facilitating the future cancer treatment*. *World Development Sustainability*, 6, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100215>
- Naciones Unidas en México. (s.f.). Objetivos de desarrollo sostenible. *Las Naciones Unidas en México*. <https://mexico.un.org/es/sdgs>
- Nobel Prize. (2022, diciembre 15). *Química “Click” y Bioortogonal: la gran herramienta para desarrollos farmacéuticos y de nuevos materiales* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=tbAuOkCAtvM>
- Rendón, K. (2020, 21 de noviembre). Cáncer: Esto cuesta un tratamiento en México para la enfermedad que golpea duro el bolsillo. *Merca2.0*. <https://www.merca20.com/cancer-cuanto-cuesta-tratamiento-mexico-ernesto-canto-muerte/>
- Royal Swedish Academy of Sciences, The Nobel Committee for Chemistry. (2022, 5 de octubre). *Scientific Background on the Nobel Prize in Chemistry 2022: Click chemistry and bioorthogonal chemistry* [PDF]. Nobel Prize. <https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-chemistryprize2022-2.pdf>
- Sánchez, J. (2022, 13 de octubre). Premio Nobel de Química 2022: por el desarrollo de las técnicas de biología molecular. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/2022/10/13/cien>
- Secretaría de Salud. (s.f.). México registra al año más de 195 mil casos de cáncer: Secretaría de Salud. *Gob.mx*. <https://www.gob.mx/salud/prensa/294-mexico-registra-al-ano-mas-de-195-mil-casos-de-cancer-secretaria-de-salud>
- The Johnson Research Group. (2024). *The Johnson Research Group at MIT*. <https://web.mit.edu/johnsongroup/>
- UCL. (2023, 24 de julio). Potent anti-cancer therapy created using click chemistry. *UCL News*. <https://www.ucl.ac.uk/news/2023/jul/potent-anti-cancer-therapy-created-using-click-chemistry>