

Sistemas Simbóticos de Xenobots para la Degradación de Plásticos

Symbiotic Xenobot Systems for Plastic Degradation

Omar Cano García^a, Iveth Gómez Morales^b, Yajaira Zepeda García^c y Omar Paredes^d

RESUMEN

El creciente problema ambiental generado por la acumulación de micro y nanoplásticos en lagos, lagunas y ríos ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras y efectivas. Entre las diferentes propuestas de resolución, la química click se ha destacado por su enfoque sencillo, permitiendo crear reacciones altamente eficientes y sin dejar residuos. En este trabajo, centramos la posibilidad de emplear la química click como un principio para el diseño de xenobots, organismos especializados capaces de transportar bacterias degradadoras de nanoplásticos con el fin de mitigar la contaminación.

Palabras clave: Biorremediación, Xenobots, Química click, Nanopartículas, PETasa

ABSTRACT

The growing environmental problem generated by the accumulation of micro- and nanoplastics in lakes, lagoons and rivers has prompted the search for innovative and

^a Estudiante Maestría en Ciencias en Química. Biodigital Innovation Lab, Translational Bioengineering Department, CUCEI, Universidad de Guadalajara. e-mail: omar.cano7952@alumnos.udg.mx

^b Estudiante Maestría en Ciencias en Química. Biodigital Innovation Lab, Translational Bioengineering Department, CUCEI, Universidad de Guadalajara.

^c Estudiante Maestría en Ciencias en Química. Biodigital Innovation Lab, Translational Bioengineering Department, CUCEI, Universidad de Guadalajara.

^d Profesor investigador Biodigital Innovation Lab, Translational Bioengineering Department, CUCEI, Universidad de Guadalajara. e-mail: omar.paredes@academicos.udg.mx

effective solutions. Among the different proposals for resolution, click chemistry has stood out for its simple approach, allowing the creation of highly efficient reactions without leaving residues. In this work, we focus on the possibility of employing click chemistry as a principle for the design of xenobots, specialized organisms capable of carrying nanoplastic degrading bacteria in order to mitigate pollution.

Keywords: Bioremediation, Xenobots, Click chemistry, Nanoparticles, PETase.

INTRODUCCIÓN

Los xenobots, son estructuras biológicas programables creadas a partir de células epiteliales y cardíacas de *Xenopus laevis*, ofrecen un enfoque novedoso en la biotecnología moderna. Estos organismos han demostrado que su función depende de la forma que tienen y de la proporción de células, presentando capacidades notables como movimiento autónomo, transporte de pequeños objetos y auto reparación en caso de lesiones. Además, su capacidad para colaborar en grupo sugiere un gran potencial para aplicaciones prácticas (Kriegman et al., 2020).

En busca de potenciar estas capacidades, los xenobots pueden equiparse con receptores químicos a través de nanopartículas plasmónicas, diseñadas específicamente para detectar la presencia de nanoplásticos en ambientes acuáticos (Schiavi et al., 2023). Su capacidad para sobrevivir en agua dulce sin necesidad de alimento durante un tiempo considerable los convierte en una solución prometedora para tareas específicas como la recolección de nanoplásticos. Sin embargo, existe una limitación fundamental: las células musculares y de piel que los conforman, al ser diferenciadas, son menos flexibles y difíciles de modificar genéticamente. Esta característica dificulta la producción continua de enzimas como las PETasas, incluso cuando se logra una modificación exitosa.

Para superar estas limitaciones, la química click representa una herramienta valiosa en el diseño biotecnológico. Esta metodología, que comprende un conjunto de reacciones

químicas modulares y versátiles, se ha establecido como un componente importante en la biología sintética. Basada en principios de eficiencia, especificidad, simplicidad y mínimo desperdicio (Devaraj & Finn, 2021), la química click funciona de manera análoga a un sistema de bloques de construcción: las moléculas o compuestos se ensamblan de forma precisa y complementaria, resultando en reacciones altamente eficientes. Su versatilidad ha permitido aplicaciones exitosas en diversos campos, desde la farmacología hasta innovadoras propuestas de biorremediación (Patra, 2022).

DESARROLLO

Un ejemplo reciente de la aplicación la química click fue propuesto por Qi et al., quienes desarrollaron microrobots a base de algas para la eliminación de nanoplásticos, utilizando una reacción de química click para ensamblar estas algas en microbots con capacidad de movimiento acuático (Qi et al., 2024).

Inspirados por estos avances, planteamos el diseño de un xenobot con nanopartículas ancladas que funcione como vehículo transportador de bacterias capaces de expresar enzimas degradadoras de nanoplásticos. Nuestra propuesta se basa en la generación de bloques funcionales que, al unirse en una forma y dirección específicas, formen xenobots especializados en el movimiento y la captación de plásticos, donde la disposición precisa de las células epiteliales y cardíacas contribuya a la conformación de un xenobot híbrido (Figura 1).

Este enfoque nos lleva a diseñar un sistema simbiótico entre xenobots y bacterias especializadas capaces de expresar PETasas, donde los xenobots actúan como vehículos transportadores hacia áreas contaminadas con plásticos, eliminando la necesidad de modificarlos genéticamente. La química click facilita este proceso al permitir el ensamblaje preciso de las células de los xenobots con nanopartículas receptoras y bacterias especializadas. La química click, y específicamente la reacción conocida como CuAAC (Copper-catalyzed Azide-Alkyne Cycloaddition) (Qi et al., 2024) permite ensamblar los xenobots, las bacterias y las nanopartículas. Los bloques funcionales de los xenobots serían funcionalizados químicamente con grupos alquino mediante un proceso suave que no altera

su viabilidad. Paralelamente, las nanopartículas que recubren su superficie y las bacterias portadoras de PETasas modificadas para portar grupos azida. Al poner ambos componentes en contacto en presencia de un catalizador de cobre, se produce la reacción click CuAAC, uniendo covalentemente las nanopartículas y las bacterias a la superficie del xenobot.

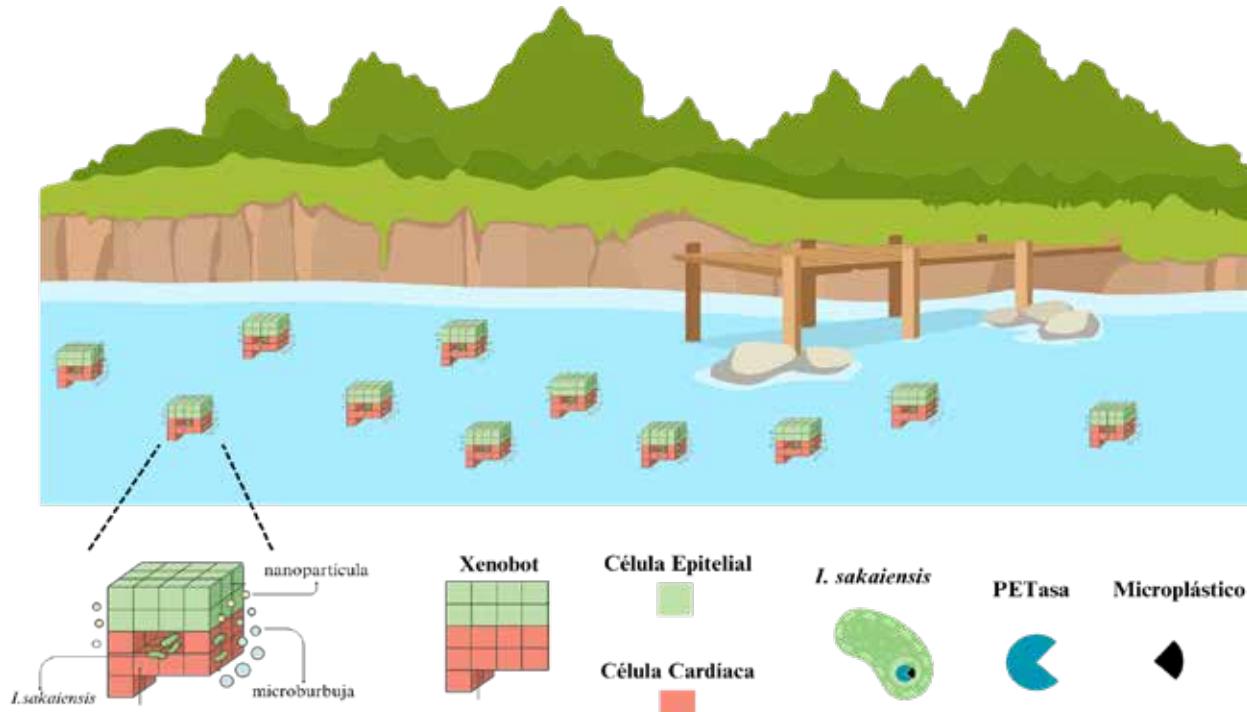


Figura 1. Representación esquemática del sistema simbiótico de xenobots. Autoría Propia.

Esta propuesta se suma a diversas iniciativas existentes en el campo de la biorremediación de plásticos. Empresas como Carbios ya han diseñado enzimas especializadas en la biodegradación de plásticos presentes en el suelo. Adicionalmente, investigaciones previas lograron desarrollar una enzima a partir de mutantes de una proteína formadora de poros de membranas de la anémona de mar, creando nano reactores catalíticos prometedores para filtrar, capturar y descomponer el nano PET (Robles-Martín et al., 2023).

El mecanismo de acción comienza cuando los xenobots, se enlazan a nanopartículas a través de la reacción CuAAC, elegida por su especificidad bioortogonal, alta eficiencia en agua y mínima citotoxicidad (Rostovtsev et al., 2002). Para la captura de nanoplásticos se emplean nanopartículas plasmónicas de oro (AuNPs) recubiertas con HS-PEG-C≡CH,

seleccionadas por su fuerte resonancia de plasmones superficiales que convierte luz en calor local para generar microburbujas que arrastran partículas plásticas (Moon et al., 2024; Lapotko et al., 2011; Huang et al., 2006).

Para el guiado remoto, se incorporan óxidos de hierro superparamagnéticos (Fe_3O_4 o $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), funcionalizados con dopamina–N₃ y PEG–C≡CH mediante CuAAC. Esto permite dirigir los xenobots mediante campos magnéticos externos sin comprometer la integridad celular (Lu et al., 2007). Asimismo, nanopartículas de sílice mesoporosa (SiO₂), silanizadas con (3-azidopropil) trietoxisilano, inmovilizan PETasa–C≡CH mediante CuAAC, estabilizando su actividad en entornos acuáticos gracias a su elevada porosidad (Hartmann & Kostrov, 2013). Finalmente, nanopartículas de quitosano–C≡CH unidas a grupos azida celulares actúan como esponjas hidrofílicas capaces de adsorber nanoplásticos por interacciones hidrofóbicas y electrostáticas.

Este ensamblaje modular y complementario, habilitado por CuAAC, maximiza la captura, concentración y degradación localizada de nanoplástico en ambientes acuáticos. La concentración local de nanoplástico inducida por los xenobots facilita la entrega dirigida de bacterias a zonas altamente contaminadas, optimizando la interacción entre PETasas y sustrato plástico.

Para la degradación de nanoplástico, se plantea utilizar la bacteria *Ideonella sakaiensis* que expresa la enzima PETasa, que le permite descomponer el nanoplástico PET y utilizarlo como fuente de carbono y energía (Yoshida et al., 2016).

CONCLUSIÓN

Esta propuesta integra de manera transversal los avances de la química click a dos escalas complementarias: a nivel micro, mediante la expresión de proteínas que descomponen nanoplástico a través de bacterias especializadas, y a nivel macro, mediante la creación de bloques funcionales que, al ensamblarse, forman xenobots programables y dirigibles. Esta combinación representa una estrategia prometedora que aprovecha el potencial de la biotecnología y la biología sintética de los xenobots para enfrentar uno de los mayores desafíos ambientales de nuestro tiempo.

REFERENCIAS

- Devaraj, N. K., & Finn, M. G. (2021). Introduction: Click Chemistry. *Chemical Reviews*, 121(12), 6697–6698. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00469>
- Hartmann, M., & Kostrov, X. (2013). Immobilization of Enzymes on Porous Silica Materials: Principles and Applications. *Chem. Soc. Rev.*, 42(15), 6277–6289.
- Huang X, El-Sayed IH, Qian W, El-Sayed MA. Cancer cell imaging and photothermal therapy in the near-infrared region by using gold nanorods. *J Am Chem Soc.* 2006 Feb 15;128(6):2115-20. doi: 10.1021/ja057254a. PMID: 16464114.
- Kriegman, S., Blackiston, D., Levin, M., & Bongard, J. (2020). A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 1853–1859. <https://doi.org/10.1073/pnas.1910837117>
- Krishna, R., Wang, J., Ahern, W., Sturmels, P., Venkatesh, P., Kalvet, I., Lee, G. R., Morey-Burrows, F. S., Anishchenko, I., Humphreys, I. R., McHugh, R., Vafeados, D., Li, X., Sutherland, G. A., Hitchcock, A., Hunter, C. N., Kang, A., Brackenbrough, E., Bera, A. K., ... Baker, D. (2024). Generalized biomolecular modeling and design with RoseTTAFold All-Atom. *Science*, 384(6693). <https://doi.org/10.1126/science.adl2528>
- Lapotko D. Plasmonic nanobubbles as tunable cellular probes for cancer theranostics. *Cancers (Basel)*. 2011 Feb 23;3(1):802-40. doi: 10.3390/cancers3010802. PMID: 21442036; PMCID: PMC3063943.
- Lu, A. H., Salabas, E. L., & Schüth, F. (2007). Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 46(8), 1222–1244.
- Moon, S., Martin, L. M. A., Kim, S., Zhang, Q., Zhang, R., Xu, W., & Luo, T. (2024). Direct observation and identification of nanoplastics in ocean water. *Science Advances*, 10(4). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh1675>
- Patra, S. (2022). Biofunctionalized Nanomaterials for Sensing and Bioremediation of Pollutants. En *Biotechnology for Zero Waste* (pp. 343–360). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527832064.ch22>
- Qi, G., Liu, J., Tian, C., & Zhang, S. (2024). Algae-based self-driven microrobot for efficient removal of nanoplastics from water environment. *Chemical Engineering Journal*, 499,

156216. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156216>

Robles-Martín, A., Amigot-Sánchez, R., Fernandez-Lopez, L., Gonzalez-Alfonso, J. L., Roda, S., Alcolea-Rodriguez, V., Heras-Márquez, D., Almendral, D., Coscolín, C., Plou, F. J., Portela, R., Bañares, M. A., Martínez-del-Pozo, Á., García-Linares, S., Ferrer, M., & Guallar, V. (2023). Sub-micro- and nano-sized polyethylene terephthalate deconstruction with engineered protein nanopores. *Nature Catalysis*, 6(12), 1174–1185. <https://doi.org/10.1038/s41929-023-01048-6>

Rostovtsev, V. V., Green, L. G., Fokin, V. V., & Sharpless, K. B. (2002). A Stepwise Huisgen Cycloaddition Process: Copper(I)-Catalyzed Regioselective “Ligation” of Azides and Terminal Alkynes. *J. Am. Chem. Soc.*, 124(23), 6545–6554.

Schiavi, S., Parmigiani, M., Galinetto, P., Albini, B., Taglietti, A., & Dacarro, G. (2023). Plasmonic Nanomaterials for Micro- and Nanoplastics Detection. *Applied Sciences*, 13(16), 9291. <https://doi.org/10.3390/app13169291>

Sevilla, M. E., Garcia, M. D., Perez-Castillo, Y., Armijos-Jaramillo, V., Casado, S., Vizuete, K., Debut, A., & Cerdá-Mejía, L. (2023). Degradation of PET Bottles by an Engineered Ideonella sakaiensis PETase. *Polymers*, 15(7), 1779. <https://doi.org/10.3390/polym15071779>

Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196-1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>