

TÉCNICA INNOVADORA PARA LA CAPTURA DE MICROPLÁSTICOS EN AGUAS CONTAMINADAS USANDO FIBRAS ÓPTICAS

INNOVATIVE TECHNIQUE FOR CAPTURE OF MICROPLASTICS IN CONTAMINATED WATER USING OPTIC FIBERS

R. Zaca-Morán1*, A. Guzmán-Barraza1, P. Zaca-Morán2, J. P. Padilla-Martínez2, J. G. Ortega-Mendoza1**

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 11 -20

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0009-0001-1609-7949>
<https://orcid.org/0000-0002-9410-5852>
<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>
<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>

Año 11 No. 31

Recibido: 06/noviembre/2023
Aprobado: 02/diciembre/2024
Publicado: 20/enero/2025

1División de Posgrados, Universidad Politécnica de Tulancingo,
Hidalgo 43629, México.

2Instituto de Ciencias, BUAP, Puebla 72050, México.
rafaelzcmrn@gmail.com*, gabriel.ortega@upt.edu.mx**

Resumen

En la actualidad, la contaminación por microplásticos representa un problema global con graves implicaciones para el medio ambiente y la salud humana, ya que estas diminutas partículas se encuentran en cuerpos de agua en todo el mundo, desde océanos hasta fuentes de agua potable, amenazando a los ecosistemas acuáticos y la cadena alimentaria. Ante esta preocupación, se ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras para capturar y eliminar eficazmente los microplásticos en aguas contaminadas. Este artículo introduce una novedosa técnica que utiliza fibra óptica, nanopartículas y luz láser para atraer y capturar microplásticos. Las nanopartículas metálicas son depositadas sobre la sección transversal de una fibra óptica y posteriormente calentadas para generar cambios graduales de temperatura que actúan como imanes virtuales, permitiendo la captura eficiente de los microplásticos. Esta innovación no solo facilita su identificación y análisis con técnicas ópticas, sino que también plantea la posibilidad de utilizarla para la purificación del agua, lo que podría contribuir significativamente a la protección del medio ambiente y la salud pública. En resumen, el extremo de una fibra óptica con nanopartículas metálicas funciona como una trampa termo-óptica altamente efectiva para atraer microplásticos, con un potencial prometedor como método de purificación del agua.

Palabras clave: Microplásticos, Fibra Óptica, Trampa Termo-Óptica, Salud.

Abstract

Currently, microplastic pollution is a global issue with serious implications for the environment and human health. These tiny particles are found in bodies of water worldwide, from oceans to sources of drinking water, threatening aquatic ecosystems and the food chain. In response to this concern, there has been a push to find innovative solutions to capture and effectively eliminate microplastics in contaminated waters. This article introduces a novel technique that uses optical fiber, nanoparticles, and laser light to attract and capture microplastics. Metallic nanoparticles are deposited on the cross-sectional area of an optical fiber and subsequently heated to generate gradual temperature changes that act as virtual magnets, allowing for the efficient capture of microplastics. This innovation not only facilitates their identification and analysis using optical techniques but also raises the possibility of using it for water purification, which could significantly contribute to environmental protection and public health. In summary, the end of an optical fiber with metallic nanoparticles can function as a highly effective thermo-optical trap for attracting microplastics, with promising potential as a water purification method.

Keywords: Microplastics, Optical Fiber, Thermo-Optic Trap, Health

Los microplásticos en ecosistemas acuáticos

La contaminación de cuerpos de agua por microplásticos es un problema de dimensiones colosales. Ha sido reportado el hallazgo de estas micropartículas en océanos (Enders, Lenz et al. 2015, Pan, Sun et al. 2019), ríos (Rico and Van den Brink 2015, D'Avignon, Gregory-Eaves et al. 2022) lagos, e incluso se en fuentes de agua potable (Mintenig, Löder et al. 2019, Li, Li et al. 2020). Su presencia no solo altera los ecosistemas acuáticos, sino que también tiene efectos en cascada en la biodiversidad marina y la salud humana, Ver Figura 1 (Mintenig, Löder et al. 2019). La persistencia y la falta de biodegradabilidad de los microplásticos plantean preocupaciones significativas en cuanto a la acumulación a largo plazo de estas partículas y sus consecuencias para el medio ambiente.

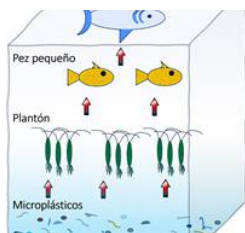


Figura 1. El diagrama muestra un escenario en el que los microplásticos pueden ser transferidos desde organismos de nivel inferior (zooplancton), hasta niveles superiores (peces) mediante la ingesta, lo que, en última instancia conduce a peces y/o mariscos contaminados que son consumidos por los humanos.

Los microplásticos son pequeñas partículas que generalmente miden menos de 5 milímetros de diámetro, y pueden variar en forma y tamaño. Algunos tienden a ser esféricos, mientras que otros son fragmentos irregulares. Los microplásticos comúnmente encontrados en los cuerpos de agua incluyen polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliéster (PET) y polimetacrilato de metilo (PMMA) (Andrady and Neal 2009, Enders, Lenz et al. 2015).

Los microplásticos se clasifican en dos grupos: los primarios, que se producen intencionalmente para aplicaciones

específicas, sobre todo para la industria (Andrady and Neal 2009). Por ejemplo, las microperlas, que son pequeñas esferas de plástico que se encuentran en productos de cuidado personal. Las microfibras textiles: que son fibras de plástico liberadas por la ropa sintética durante el lavado (Koelmans, Besseling et al. 2015). Mientras que los microplásticos secundarios, se forman a partir de la descomposición de plásticos de escala macro en el medio ambiente, este proceso es conocido como fotodegradación. Por ejemplo, el PE y PP son dos de los plásticos ampliamente utilizados para envases, botellas y bolsas de plástico, productos que se descomponen en pequeñas partículas, estas a menudo son tan pequeñas que los sistemas de tratamiento de aguas residuales no pueden filtrarlas.

La fotodegradación ocurre debido a la exposición a la radiación ultravioleta (UV) del Sol, cuyos rayos de luz (fotones) contienen una alta energía que puede romper los enlaces químicos en las moléculas del plástico, alterando sus aspecto físico y mecánico, lo que genera pérdida de flexibilidad, formación de grietas y reducción de su resistencia mecánica, volviéndolos frágiles, descolorados y propensos a desmoronarse (D'Avignon, Gregory-Eaves et al. 2022). Cuando se trata de plásticos en ambientes marinos, el viento y las olas también desempeñan un papel en el proceso de degradación natural.

El tiempo de descomposición o degradación de los plásticos está relacionado con diversos factores, incluido el tipo de plástico, las condiciones ambientales y la influencia de la acción microbiana. Algunas investigaciones han sugerido que los plásticos pueden experimentar una degradación más rápida en entornos terrestres, en comparación con ambientes marinos, donde el proceso puede extenderse durante décadas (Koelmans, Kooi et al. 2017). Es importante subrayar que la descomposición lenta de los microplásticos en el agua plantea un desafío ambiental de gran relevancia debido a su impacto perjudicial en los ecosistemas marinos (Amin, Sohaimi et al. 2020). Esto subraya la necesidad imperante de desarrollar nuevos métodos para la captura o eliminación efectiva de estos microplásticos.

Métodos y técnicas de atrapamiento de microplásticos

La proliferación de microplásticos en cuerpos de agua es un desafío ambiental urgente que requiere soluciones efectivas. En este sentido, los métodos químicos han surgido como una prometedora estrategia para abordar esta contaminación. Estos métodos implican la manipulación de propiedades químicas para atrapar y eliminar los microplásticos. No obstante, también se encuentran los métodos físicos, como la filtración y sedimentación, esenciales en la lucha contra la contaminación por microplásticos. Ambos se describen a continuación.

Métodos químicos

En la captura de microplásticos mediante métodos químicos, se recurre a sustancias químicas que, al modificar las propiedades químicas de los líquidos y los propios microplásticos, permiten su retención y posteriormente su eliminación. Entre las estrategias más empleadas en este contexto se incluyen el uso de polímeros y compuestos óxidos metálicos, como el dióxido de titanio (TiO_2) y el óxido de hierro (Fe_2O_3), además de nanomateriales con la capacidad de establecer nuevos enlaces químicos (Martin, Sheng et al. 2022). También se emplean hidrogeles con propiedades de adsorción que se adhieren a átomos, iones o moléculas en superficies tanto líquidas como sólidas, garantizando la retención tanto de agua como de microplásticos, como se muestra en la Figura 2 (Park, Oh et al. 2022).

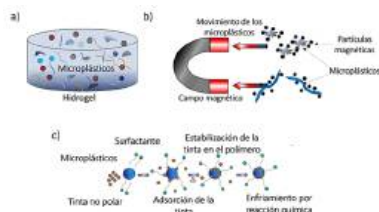


Figura 2. Proceso de adsorción de microplásticos usando a) hidrogeles, b) campos magnéticos y c) compuestos químicos

Otros métodos efectivos abarcan sistemas de alta adsorción basados en carbón activado, polímeros magnéticos que atraen microplásticos mediante campos magnéticos, tratamientos con surfactantes que reducen la tensión superficial de los líquidos, lo que provoca la aglomeración de microplásticos, así como la flotación selectiva, que modifica la superficie de los microplásticos volviéndolos hidrofóbicos (repelentes al agua). Adicionalmente, se emplean técnicas electroquímicas que hacen uso de campos eléctricos en sustancias químicas para lograr la captura eficiente de microplásticos (Andrady and Neal 2009, Koelmans, Besseling et al. 2015, Wagner and Lambert 2018, Rani, Ducoli et al. 2023).

Métodos físicos

Los métodos físicos de atrapamiento de microplásticos en cuerpos de agua se basan principalmente en el uso de técnicas mecánicas, uso de filtros o sedimentación como lo muestra la Figura 3. Estas técnicas comprenden la filtración mecánica, que consiste en pasar el agua a través de filtros contruidos con mallas o membranas diseñadas para retener partículas de acuerdo con su tamaño (esencial que los orificios en las mallas no superen los 5 mm para microplásticos). La implementación de barreras flotantes que aprovechan las corrientes para dirigir los contaminantes hacia un punto de recolección. Bombas de succión que aspiran el agua contaminada para su posterior filtración, y la sedimentación, un proceso natural en el cual los microplásticos tienden a desplazarse hacia el fondo de los cuerpos de agua debido a su densidad. Además, se lleva a cabo una separación por suspensión de microplásticos según su densidad y tamaño, abarcando técnicas como la centrifugación, la generación de ciclones hidráulicos y el uso de tamices de tambor (Koelmans, Kooi et al. 2017).

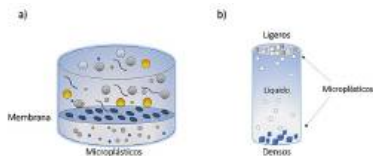


Figura. 3. Proceso de filtración mecánica de microplásticos usando a) membranas o mallas y por b) flotabilidad en función de la densidad de los microplásticos

Los distintos métodos de atrapamiento de microplásticos mencionados anteriormente presentan desventajas, como la ineficiencia selectiva, la generación de subproductos o residuos no deseados, el consumo excesivo de energía, los costos de operación elevados y posibles daños colaterales a la vida acuática, entre otros.

La fibra óptica es un medio de transmisión de información que utiliza a la luz para transmitir datos. Aunque tradicionalmente se ha utilizado en telecomunicaciones y redes de datos, su versatilidad ha llevado a investigaciones en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la detección y monitoreo ambiental.

En este contexto, nuestro grupo de trabajo ha investigado un enfoque prometedor para la captura de cantidades significativas de diminutas partículas de plástico mediante el uso de la fibra óptica. Esta innovadora técnica aprovecha un fenómeno conocido como 'trampa termo-óptica'. En términos sencillos, cuando se expone la fibra óptica a la luz, ciertas partículas metálicas adheridas a la punta de la fibra óptica absorben esta luz y generan un cambio en la temperatura. Como resultado, se forma una fuente de 'atrapa-partículas' en la punta de la fibra óptica, lo que le permite recolectar eficazmente microplásticos presentes en el agua. Este enfoque revolucionario

no solo demuestra un alto potencial en la captura de microplásticos, sino que también podría desempeñar un papel fundamental en la preservación de nuestros ecosistemas acuáticos y la protección de la vida marina.

Atrapamiento de microplásticos con fibra óptica multimodo

En este experimento, se emplean nanopartículas de plata (576832, Sigma-Aldrich) como medio absorbente, las cuales se inmovilizaron en la punta de una fibra óptica multimodo (Thorlabs FG105LVA, 105/125 μm de diámetro del núcleo/revestimiento respectivamente) mediante la técnica de fotodeposición, generando pérdidas de 10 dB (se provoca que salga solo el 10 % de la luz y el resto sea absorbida) (Ortega-Mendoza, Soto-López et al. 2019). Posteriormente, se conecta la fibra óptica a un láser de onda continua cuya longitud de onda es de 450 nm y emite a una potencia de 63 mW. La extremidad de la fibra óptica fotodepositada se introduce en una cavidad de vidrio en una solución con microplásticos, como se ilustra en la Figura 4. Aquí dos mezclas son utilizadas: la primera con 1 mg de partículas de polimetacrilato de metilo (PMMA) y la segunda 1 mg de partículas de polietileno (PE), ambas disueltas en 5 μl de agua destilada y sometidas a un proceso de filtrado y de ultrasonido para provocar una distribución uniforme. Para observar la dinámica de captura de microplásticos, se utilizó una cámara (Moticam 2500, Motic) en un microscopio metalográfico (PT-XJL101, Physical Test Solutions) equipado con un objetivo de microscopio de 40x. Los videos capturados por la cámara son posteriormente analizados mediante el programa Motic Images Plus 2.0.

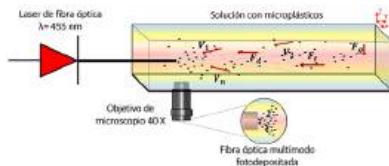


Figura 4: Diseño experimental implementado para el atrapamiento de microplásticos. Donde F_g es la fuerza de gravedad, F_t la fuerza termoforesis (fuerza debido al gradiente térmico provocado por el calentamiento de las nanopartículas metálicas en la punta de la fibra óptica) y F_d la fuerza de arrastre (siguen la trayectoria del movimiento del fluido). Por lo que fuerza resultante es la suma lineal de estas, dada como $F_T = F_t + F_d + F_g$.

Las Figuras 5 y 6 muestran el atrapamiento de dos tipos de microplásticos PMMA y PE en un intervalo temporal de 10 minutos. Se puede observar que, al paso del tiempo en la punta de la fibra óptica se va incrementa la cantidad de microplásticos atrapados. Para llevar a cabo estos experimentos se generaron pérdidas de potencia de 10 dB y se activó el láser a una potencia de 67 mW, que son las condiciones óptimas para trabajar con este método. Potencias o pérdidas menores a las mencionadas genera pequeños cambios de temperatura, haciendo que el proceso de atrapamiento sea lento. Mientras que potencias y pérdidas mayores a las mencionadas, dan paso a la formación de una burbuja de vapor en la punta de la fibra, esparciendo todos los microplásticos atrapados previamente. La formación de la burbuja de vapor es debida a que el gradiente térmico (cambios de temperatura), supera la temperatura del punto de ebullición de la solución.

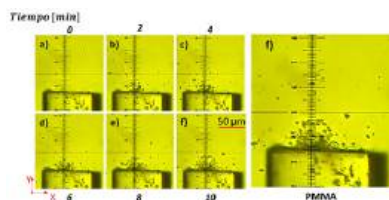


Figura 5: Atrapamiento de microplásticos de PMMA en la punta de la fibra óptica fotodepositada por un tiempo de 10 minutos.

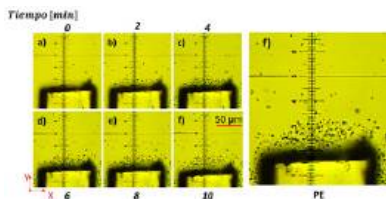


Figura 6: Atrapamiento de microplásticos de PE en la punta de la fibra óptica fotodepositada por un tiempo de 10 minutos.

Para explicar el atrapamiento termo-óptico de los microplásticos en la punta de la fibra óptica, se realizó la simulación del gradiente térmico generado por la radiación láser incidente en las nanopartículas metálicas de plata. Se consideró inicialmente que la fibra está en un ambiente acuoso y sin un material absorbente (Figura 7 a). Posteriormente, se asume que las nanopartículas de plata formaban una película delgada con un grosor de μm (Figura 7 b), las cuales son absorbentes a la longitud de onda de operación ($\mu = 455\text{ nm}$). En ambas simulaciones, tanto con nano o sin nanopartículas metálicas, al láser se le asignó una potencia de emisión de 67 mW. A partir de estas condiciones, la temperatura del líquido circundante a la fibra óptica alcanza una temperatura alrededor de los 80°C , lo que da paso a la formación de corrientes convectivas, estas últimas se muestran en la Figura 7 c) y 7 d) que son los planos YX y ZX respectivamente. Se asume que las corrientes convectivas son el principal factor para el atrapamiento de los microplásticos frente a la punta de la fibra, como lo muestra la figura 7 c).

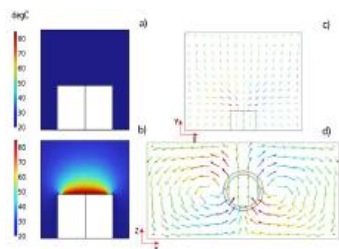


Figura 7. Simulación del gradiente térmico sobre la punta de la fibra óptica multimodo a) sin nanopartículas y con b) nanopartículas, en ambos casos la fuente simulada tiene una potencia de salida de 63 mW. Por otro lado, en c) y d) se muestran las corrientes convectivas generadas en los plano YX y ZX respectivamente, para el caso b).

El gradiente de temperatura induce la convección térmica, conocida como corrientes convectivas, que es el movimiento del fluido debido a las diferentes temperaturas causadas por la absorción de la película metálica. Los cambios de temperatura en la solución se rigen por la ecuación de calor $\mu l c_p U \cdot T = \cdot (\mu T) + Q$, donde c_p representa la capacidad calorífica y μ representa conductividad térmica. En esta ecuación, $Q = I_o \alpha$ es la fuente de calor por unidad de volumen, donde α el coeficiente de absorción (la capacidad del material para absorber la luz) y I_o es la intensidad de la fuente óptica (Nalupurackal, Gunaseelan et al. 2022). El equilibrio entre la fuerza de atracción generada por las corrientes convectivas y las fuerzas generadas por la termofóresis, así como la gravedad, dan como resultado la captura de los microplásticos en la punta de la fibra óptica, como lo muestra la Figura 4. Esto representa un nuevo método para atrapar microplásticos y limpiar aguas contaminadas.

Conclusiones

Este estudio se presenta un enfoque novedoso para la captura de microplásticos en el agua utilizando una fibra óptica multimodo con nanopartículas metálicas en su extremo, que actúan como una trampa termo-óptica al absorber la energía de la luz y retener estas partículas dañinas. Aunque representa un avance en la eliminación de microplásticos en entornos acuáticos, la efectividad de esta técnica puede variar según el contexto, la calidad del agua y la concentración de microplásticos. Es esencial reconocer que, además de soluciones tecnológicas, abordar las fuentes primarias de contaminación de microplásticos, como la reducción de plásticos de un solo uso y la gestión de residuos mejorada, es crucial para abordar de manera integral este problema ambiental.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Conflicto de interés

Los autores participantes en la elaboración de este artículo manifestamos no tener ningún conflicto de interés personal o económico.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo económico brindado en el marco de Estancias

Posdoctorales por México 2022 (3), con CVU 771927.

Referencias

- Amin, R. M., et al. (2020). Microplastic ingestion by zooplankton in Terengganu coastal waters, southern South China Sea. *Marine pollution bulletin* 150: 110616. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110616>.
- Andrady, A. L. and M. A. Neal (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364(1526): 1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>.
- D'Avignon, G., et al. (2022). Microplastics in lakes and rivers: an issue of emerging significance to limnology. *Environmental Reviews* 30(2): 228-244. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0048>.
- Enders, K., et al. (2015). Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine pollution bulletin* 100(1): 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>.
- Koelmans, A. A., et al. (2015). Nanoplastics in the aquatic environment. Critical review. *Marine anthropogenic litter*: 325-340. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16510-3_12.
- Koelmans, A. A., et al. (2017). All is not lost: deriving a top-down mass budget of plastic at sea. *Environmental Research Letters* 12(11): 114028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9500>.
- Li, Y., et al. (2020). Occurrence, removal and potential threats associated with microplastics in drinking water sources. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(6): 104527. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104527>.
- Martin, L. M., et al. (2022). Testing an iron oxide nanoparticle-based method for magnetic separation of nanoplastics and microplastics from water. *Nanomaterials* 12(14): 2348. <https://doi.org/10.3390/nano12142348>.
- Mintenig, S. M., et al. (2019). Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of the total environment* 648: 631-635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.178>.
- Nalupurackal, G., et al. (2022). A hydro-thermophoretic trap for microparticles near a gold-coated substrate. *Soft matter* 18(36): 6825-6835. <https://doi.org/10.1039/D2SM00627H>.
- Ortega-Mendoza, J., et al. (2019). Generating micropatterns onto the core of an optical fiber end with nanoparticles using fiber modes. *Laser Physics Letters* 16(4): 045105. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/ab0c88>.

Pan, Z., et al. (2019). Prevalence of microplastic pollution in the Northwestern Pacific Ocean. *Chemosphere* 225: 735-744. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.076>.

Park, D. H., et al. (2022). In Situ Fluorescent Illumination of Microplastics in Water Utilizing a Combination of Dye/Surfactant and Quenching Techniques. *Polymers* 14(15): 3084. <https://doi.org/10.3390/polym14153084>.

Rani, M., et al. (2023). A Complete Guide to Extraction Methods of Microplastics from Complex Environmental Matrices. *Molecules* 28(15): 5710. <https://doi.org/10.3390/molecules28155710>.

Rico, A. and P. J. Van den Brink (2015). Evaluating aquatic invertebrate vulnerability to insecticides based on intrinsic sensitivity, biological traits, and toxic mode of action. *Environmental Toxicology and Chemistry* 34(8): 1907-1917. <https://doi.org/10.1002/etc.3008>.

Wagner, M. and S. Lambert (2018). Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?, *Springer Nature*. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/42902>.

Thompson, J. D., Higgins, D. G., & Gibson, T. J. (1994). CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids Research*, 22(22), 4673-4680. doi:10.1093/nar/22.22.4673

Trott, O. & Olson, A. J. (2010) AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31(2), 455-461. doi:10.1002/jcc.21334

Waterhouse A. M., Procter J. B., Martin D. M. A., Clamp M., & Barton G. J. (2009) Jalview Version 2 - A multiple sequence alignment editor and analysis workbench. *Bioinformatics* 25 1189-1191. doi:10.1093/bioinformatics/btp033

Webb, B., & Sali, A. Comparative Protein Structure Modeling Using Modeller. *Current Protocols in Bioinformatics* 54, John Wiley & Sons, Inc., 5.6.1-5.6.37, 2016. doi:10.1002/cpbi.3

wwPDB consortium. Protein Data Bank: the single global archive for 3D macromolecular structure data (2019). *Nucleic Acids Research*, 47, D520-D528, doi:10.1093/nar/gky949

QUÍMICA COMPUTACIONAL

COMPUTATIONAL CHEMISTRY

María Corazón Flores Bautista (1)

Ernesto Chigo Anota (1)

Dulce Elena Letras Luna (2)

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 20 - 27

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0000-0002-0683-4079>

<https://orcid.org/0000-0001-6037-7123>

<https://orcid.org/0000-0002-6866-2866>

FECHA DE RECEPCIÓN 08/07/2024

FECHA DE REVISIÓN 2/12/2024

FECHA DE PUBLICACIÓN 20/01/2025

- (1) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química. Área de materiales: química teórica computacional. Ciudad Universitaria. Puebla, México. C.P. 72570. Teléfono: 222 229 5500
- (2) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ciencias Químicas. ICUAP. Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción. Ciudad Universitaria. Puebla, México. C.P. 72570. Teléfono: 222 229 5500
corazon.flores@alumno.buap.mx
ernesto.chigo@correo.buap.mx
dulce.letras@alumno.buap.mx

Resumen

La química computacional es el campo de la resolución de ecuaciones matemáticas complejas de métodos mecánicos-cuánticos con computadoras. Es un tema antiguo y joven al mismo tiempo, antiguo por la historia de los métodos que representan los principios de este campo y joven porque está conectado con los rápidos avances en hardware y software. Actualmente, la química computacional se ha convertido en una herramienta esencial para estudiar y explicar problemas en la mayoría de las ramas de la química. Curiosamente, la química computacional ha ido más allá de ser una herramienta complementaria para los resultados experimentales. Para ahorrar tiempo, esfuerzo y dinero, los químicos necesitan realizar cálculos computacionales antes de disolver los productos químicos en disolventes e instalar el reflujo y el condensador. En la industria, la química computacional se ha convertido en un área importante para desarrollar nuevos productos y ahorrar el alto costo del ensayo y error.

Palabras clave: Química; Computación; Tecnología; Teórico; Desarrollo; Aplicaciones.

Abstract

Computational chemistry is the field of solving complex mathematical equations by using quantum-mechanical methods with computers. It is both old and young due to the history of the methods that represent this field's principles and the rapid advances in computer hardware and software. Today, computational chemistry has become an essential tool for studying and explaining problems in most branches of chemistry. Interestingly, computational chemistry has gone beyond being a complementary tool for experimental results. To save time, effort, and money, chemists need to perform computational calculations before dissolving chemicals in solvents and installing the reflux and condenser. In industry, computational chemistry has become an important unit to develop new products and save the expensive cost of trial and error.

Introducción

La química computacional se ha aplicado con éxito en las investigaciones de diversas propiedades físicas y químicas de diferentes materiales con el fin de tener una comprensión clara a nivel electrónico, atómico y molecular. Por otro lado, el progreso actual del hardware informático junto con el desarrollo de software novedoso hace posible tener investigaciones de sistemas complejos con resultados mucho más realistas.



Química computacional un nuevo enfoque de la investigación y aplicaciones de la industria. <https://www.istockphoto.com/es/search/search-by-asset?assetid=1309776504&assettype=image>

Por lo tanto, al integrar nuestras metodologías computacionales recientemente desarrolladas con el avance de las técnicas computacionales, realizamos simulaciones teóricas de materiales y procesos de importancia en diferentes campos, como en la industria, fisiología, química, farmacología, cosmética, entre muchas más. Se han aplicado programas de química computacional integrada a muchas áreas de investigación de materiales de importancia práctica y económica (Selvam, et al. 2006).

La química teórica o computacional tiene como objetivo desarrollar la teoría química y aplicar el cálculo numérico y la simulación para revelar el mecanismo detrás de los fenómenos químicos complejos a través de la teoría cuántica y la mecánica estadística. La computación es el tercer pilar de la investigación científica junto con la teoría y la experimentación. La computación permite a los científicos probar, descubrir y construir modelos/teorías de los fenómenos químicos correspondientes. La química teórica y computacional

ha avanzado a una nueva era debido al desarrollo de instalaciones computacionales de alto rendimiento y enfoques de inteligencia artificial.



La química teórica permite optimizar recursos gracias al uso de herramientas computacionales. <https://www.pexels.com/es-es/foto/codigo-html-270366/>

La tendencia a fusionar la teoría estructural electrónica con la dinámica química cuántica y la mecánica estadística es de creciente interés debido al rápido desarrollo de simulaciones dinámicas sobre la marcha para sistemas complejos más la teoría estructural electrónica de baja escala (Abdallah, 2016). Otro problema desafiante radica en la transición del orden al desorden, de la termodinámica a la dinámica y del equilibrio al no equilibrio. A pesar de un surgimiento cada vez más rápido de avances en el poder computacional, aún deben desarrollarse criterios detallados para bases de datos, estrategias efectivas de intercambio de datos y flujos de trabajo de aprendizaje profundo (Lu y Shuai, 2021).

La química computacional es actualmente un conjunto simultáneo de cálculos ab initio, simulación, aprendizaje automático y estrategias de optimización para describir, resolver y predecir datos químicos y fenómenos relacionados. Éstos incluyen búsquedas aceleradas de literatura, análisis y predicción de propiedades químicas, físicas y cuánticas, estados de transición, estructuras químicas, reacciones químicas y también nuevos catalizadores o candidatos a fármacos.



La aplicación de la química computacional permite el desarrollo de experimentos para el desarrollo de productos, fármacos, vacunas entre muchos otros en menor tiempo y a un menor costo. <https://www.pexels.com/es-es/foto/tecnologia-blanco-negocio-mercado-5878482/>

La información producida por la combinación de la química y el aprendizaje automático, a través de análisis basados en datos, predicciones de redes y monitoreo de sistemas químicos, permite (i) impulsar la capacidad de comprender la complejidad de los datos químicos, (ii) agilizar y diseñar experimentos, (iii) descubrir nuevos objetivos moleculares y materiales, y también (iv) planificar o repensar los próximos desafíos químicos. De hecho, la optimización engloba todas estas tareas directamente (Cova y País, 2019).

Desarrollo

En las últimas décadas, los recursos computacionales se han vuelto cada año más poderosos y, además, el desarrollo de la metodología ha llevado a técnicas mucho más eficientes. Los estudios experimentales y computacionales combinados generalmente brindan una perspectiva más amplia de un problema químico y lo analizan desde diferentes ángulos y perspectivas que los estudios experimentales independientes no pueden considerar. Por lo tanto, los estudios computacionales proporcionan información adicional importante junto con la experimentación y ayudan en la interpretación de los datos experimentales. Además, con la química cuántica computacional se pueden investigar intermediarios catalíticos de vida corta, nube electrónica de átomos

y sus patrones de reactividad, lo que, junto con el trabajo experimental, puede explicar las distribuciones de productos y las velocidades de reacción. Además, el trabajo computacional puede hacer predicciones que alientan futuros estudios experimentales.

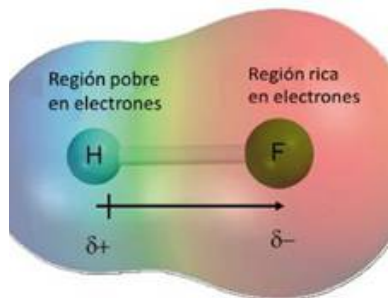


Figura 1. Representación de las nubes electrónicas de los átomos con diferente electronegatividad: molécula polar (rojo: mayor carga negativa, azul: mayor carga positiva) (autoría propia).

Esta colaboración de experimento y teoría ha dado lugar a un gran campo de investigación, donde los teóricos y los experimentalistas trabajan juntos. Como resultado de eso, ya no es raro que los estudiantes de doctorado y los investigadores postdoctorales realicen una combinación de experimento y computación para un solo proyecto multidisciplinario. Sin embargo, aunque muchos grupos basados en la experimentación están comenzando a utilizar métodos de química computacional, casi de manera rutinaria, hoy en día existen algunas advertencias serias con los métodos y técnicas, a menudo, estos estudios computacionales no se pueden realizar a través de procedimientos de "caja negra", sino que requieren la supervisión de expertos (Visser, 2013).

La química computacional es el campo de la química que utiliza aproximaciones matemáticas y programas informáticos para resolver problemas de interés químico.

Se denomina Química Computacional a la obtención de información estructural de sistemas químicos por medio de cálculos matemáticos basados en leyes fundamentales de la física (Young, 2001). La química computacional busca caracterizar

y predecir la estructura y estabilidad de los sistemas químicos (Lipkowitz, 2001), estudiando diferencias de energía entre diferentes estados para explicar propiedades espectroscópicas y mecanismos de reacción a nivel atómico (Figura 2).

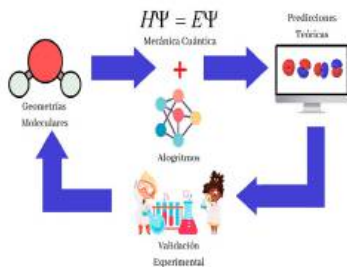


Figura 2. Esquema simplificado de cómo funciona la investigación en la Química Computacional. Algunas geometrías moleculares construidas a partir de visualizadores moleculares se utilizan para hacer predicciones teóricas de las propiedades estructurales, químicas, ópticas y electrónicas de las moléculas utilizando programas que incluyen la formulación cuántica. Los resultados son comparados con experimentos, validando o rechazando las predicciones teóricas. Después, los pronósticos anteriores permiten dar guía a nuevos experimentos. Mecanismo de reacción a nivel atómico. <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/de-la-quimica-computacional-a-la-computacion-cuantica/>

Los premios nobel de 1998 y 2013 han sido otorgados a esta especialidad. El Nobel de química de 1998 lo recibieron John Pople (Northwestern University) y Walter Kohn (University of California at Santa Barbara). John Pople por su contribución al primer programa que realizaba cálculos ab initio y su desarrollo para permitir la aplicación de éstos a la resolución de problemas. John Pople es denominado el padre de la química computacional de aplicación generalizada, el primer programa de cálculos Ab initio desarrollado fue Gaussian 70 (Cuevas, 2003). Walter Kohn fue premiado por el desarrollo de la teoría funcional de densidad, conocida como DFT, de gran aplicación en el campo de la química teórica (Cuevas, 2003). En 2013 los ganadores del Nobel fueron Arieh Warshel (University of Southern California), Michael Levitt (Stanford University)

y Martin Karplus (Harvard University). Su investigación se centró en el desarrollo de un modelo que combina la mecánica cuántica y la mecánica molecular y da un significado físico a la unión entre zonas, permitiendo realizar cálculos en grandes proteínas (Nobel Prize in Chemistry 2013).

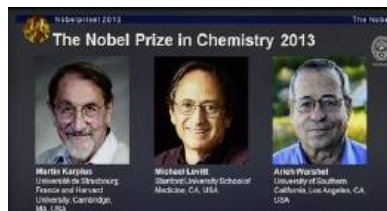


Figura 3. Galardonados con el Nobel de Química por el desarrollo de modelos multi rangos en el equipo de cómputo que permiten entender y predecir procesos químicos complejos. (Nobel Prize in Chemistry 2013). <https://vovworld.vn/es-ES/noticias/tres-cientificos-reciben-el-premio-nobel-de-quimica-2013-186749.vov>

Los principales tipos de métodos usados en los cálculos son: mecánica molecular y mecánica cuántica. A su vez, los métodos de mecánica cuántica incluyen métodos semi-empíricos y métodos ab initio. Los métodos de mecánica molecular y semi-empíricos poseen algunas ventajas sobre los métodos ab initio. La más importante es la rapidez. La exactitud de la mecánica molecular o de los métodos semi-empíricos depende de los parámetros usados. En muchos casos tenemos que encontrar los parámetros antes de comenzar los cálculos.

Los métodos ab initio son métodos computacionales basados en química cuántica, la IUPAC los define como métodos de cálculo de mecánica cuántica independientes de cualquier experimento usado para la determinación de las propiedades físico-químicas fundamentales. Estos métodos están basados en el uso de la ecuación completa de Schrödinger para tratar todos los electrones de un sistema químico. Ab initio es un término en latín que significa "primeros principios". Los cálculos de ab initio se realizan, sin suposiciones adicionales ni parámetros determinados

experimentalmente. Los cálculos de los métodos Ab initio se basan en resolver el estado electrónico de un sistema a partir de la ecuación de Schrödinger y de esta manera, obtener varias propiedades de las especies químicas (Nic, 2002).

La Teoría del Funcional de la Densidad (DFT) (Peter, 2011) aplicada a sistemas electrónicos es un procedimiento variacional alternativo a la solución de la ecuación de Schrödinger, donde el funcional de la energía electrónica es minimizado con respecto a la densidad electrónica. Originalmente, la DFT se desarrolló en el marco de la teoría cuántica no relativista (ecuación de Schrödinger independiente del tiempo) y de la aproximación de Born-Oppenheimer. La teoría fue extendida posteriormente al dominio de la mecánica cuántica dependiente del tiempo, desarrollándose así la Teoría del Funcional de la Densidad Dependiente del Tiempo (TD-DFT, por sus siglas en inglés), la cual permite estudiar sistemas en estados excitados. Los resultados obtenidos a partir de la DFT son satisfactorios. No se requiere ningún tipo de parámetro adicional ni ajuste obtenido de resultados experimentales. Toda esta tecnología tiene muchos tipos de aplicaciones en diferentes ramas de la vida cotidiana, desde el área de investigación hasta la industria, tanto como enfoques ambientales.

Como el diseño tradicional de fármacos requiere una gran cantidad de tiempo de investigación y gastos de desarrollo, los métodos computacionales en auge, que incluyen la biología computacional, el diseño de fármacos asistido por computadora y la inteligencia artificial, tienen el potencial de acelerar la eficiencia del descubrimiento de fármacos al minimizar el tiempo y el costo financiero. En los últimos años, los métodos computacionales se están utilizando ampliamente para mejorar la eficacia y efectividad del descubrimiento y la elaboración de nuevos fármacos, lo que ha llevado a la aprobación de muchos nuevos fármacos para su comercialización (Zhang, et al. 2022) (Figura 4).



Figura 3. Galardonados con el Nobel de Química por el desarrollo de modelos multi rangos en el equipo de cómputo que permiten entender y predecir procesos químicos complejos. (Nobel Prize in Chemistry 2013). <https://vovworld.vn/es-ES/noticias/tres-cientificos-reciben-el-premio-nobel-de-quimica-2013-186749>. vov

En la química orgánica, la química computacional desempeña un papel indispensable en la elucidación de los mecanismos de reacción y los orígenes de diversas selectividades, como la quimio-, regio- y estereoselectividad. En consecuencia, la comprensión de mecanismos de reacción mejora la síntesis y ayuda al diseño racional de nuevos catalizadores (Zhang, et al. 2016) (Figura 5).

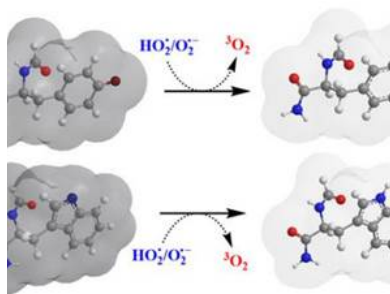


Figura 5. Mecanismos de reacción. <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/events/spanish-webinars/slides/2020-11-18-radical-molecules.pdf>

Conclusiones

La química computacional es el campo de la resolución de ecuaciones matemáticas complejas de los métodos mecano-cuánticos con ordenadores. Es un tema antiguo y joven al mismo tiempo, antiguo por la historia de los métodos que representan los principios de este campo y joven porque está conectado con los rápidos avances en hardware y software de computadoras. Actualmente, la química computacional se ha convertido en una herramienta esencial para estudiar y explicar problemas en la mayoría de las ramas de la química. Es una herramienta complementaria para los resultados experimentales. Para ahorrar tiempo, esfuerzo y dinero. En la industria, la química computacional permite desarrollar nuevos productos, diseñar nuevos métodos, procesos, productos y evaluaciones que disminuyen la probabilidad de error. Así como las nuevas aplicaciones de la química computacional en el campo de la astrofísica, la biología, el diseño de fármacos y la nanotecnología, entre otras.

Conflicto de intereses

Los autores de este manuscrito declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

Especiales agradecimientos al Cuerpo Académico de Ingeniería en Materiales (BUAP-CA-177) y la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (Beca: 100378777-VIEP2021).

Referencias

- Abdallah, H. (2016). Computation chemistry as a tool for academic and industrial chemists. . <https://doi.org/10.4172/2469-9764.C1.003>.
- Cova, T. Pais, A. (2019). Deep Learning for Deep Chemistry: Optimizing the Prediction of Chemical Patterns. *Frontiers in Chemistry*, 7. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00809>.
- Cuevas, G. C. (2003). Introducción a la química computacional. 968-16-7105-8.
- Lipkowitz, K. B. (2001). *Reviews in Computational Chemistry*. Weinheim: VCH.
- Lu, Y. Deng, G. Shuai, Z. (2021). Future directions of chemical theory and computation. *Pure and Applied Chemistry*, 93, 1423 - 1433. <https://doi.org/10.1515/pac-2020-1006>.
- Nic, e. a. (2002). *Gold Book. IUPAC Compendium of Chemical Terminology*. Triagle Park: Miloslav.
- Peter, W. A. (2011). *Molecular quantum mechanics*. Reino Unido: Oxford university press.
- Selvam, P. Tsuboi, H., Koyama, M. Endou, A. Takaba, H. Kubo, M. Carpio, C. Miyamoto, A. (2006). Computational chemistry for industrial innovation. *Reviews in Chemical Engineering*, 22, 377 - 470. <https://doi.org/10.1515/REVCE.2006.22.6.377>.
- Visser, S. (2013). Getting started in computational quantum chemistry. *Frontiers in Chemistry*, 1, 14. <https://doi.org/10.3389/FCHEM.2013.00014>.
- Young, D. (2001). *Computational Chemistry: A Practical Guide for Applying Techniques*. New York: Wiley-Interscience.
- Zhang, X., Chung, L., & Wu, Y. (2016). New Mechanistic Insights on the Selectivity of Transition-Metal-Catalyzed Organic Reactions: The Role of Computational Chemistry. *Accounts of chemical research*, 49 6, 1302-10. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00093>.
- Zhang, Y., Luo, M., Wu, P., Wu, S., Lee, T., & Bai, C. (2022). Application of Computational Biology and Artificial Intelligence in Drug Design. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms232113568>.

USO DE UNA RED NEURONAL EN LA DETECCIÓN DE TRANSACCIONES FRAUDULENTAS REALIZADAS SOBRE UNA PLATAFORMA EN LÍNEA

USE OF A NEURAL NETWORK IN THE DETECTION OF FRAUDULENT TRANSACTIONS CARRIED OUT ON A ONLINE PLATFORM

Guillermo De Ita Luna
Diego Saldaña Ulloa

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 29 - 38

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0009-0004-1428-6625>
<https://orcid.org/0000-0001-7948-8253>

Año 11 No31

FECHA DE RECEPCION: 29/01/2024

FECHA DE REVISIÓN: 2/012/2024

FECHA DE PUBLICACIÓN: 20/01/2025

Facultad de Ciencias de la Computación, Edif. CCO1 – 14 Sur y Av. Sn.
Claudio, C.U.

Doctorado en Ingeniería del lenguaje y del conocimiento
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
guillermo.deita@correo.buap.mx
diego.ulloa13@hotmail.com

Resumen

El problema de los fraudes cibernéticos ha ido en aumento y es ya una problemática económica para las empresas que usan pagos electrónicos. Se han propuesto modelos y algoritmos dentro del área del aprendizaje automático con la finalidad de detectar patrones en las transacciones digitales que pudiesen exhibir las transacciones fraudulentas. Explicamos aquí una propuesta del uso de redes neuronales que usan estructuras de grafos para modelar y realizar la clasificación de usuarios fraudulentos.

Palabras Clave: Aprendizaje automático, red neuronal de grafos, detección de fraude, transacciones en línea.

Abstract

The problem of cyber fraud has been increasing, and it is already an economic problem for companies that use electronic payments. Machine learning has proposed models and algorithms to identify patterns in digital transactions that may indicate fraudulent transactions. Here, we propose using neural networks that use graph structures to model and classify fraudulent users.

Keywords: Machine learning, Graph neural network, Fraud detection, Transactions on line.

introducción

En un proceso antagónico, los defraudadores continúan buscando diferentes formas de allegarse de recursos mal habidos, mientras que el sistema legal intenta reconocer y proteger al público de las transacciones fraudulentas.

Con el advenimiento de las compras por internet, surgió todo un sistema de defraudación digital donde se aplican diferentes mecanismos. Desde el engaño vía páginas web falsas, suplantaciones de identidad donde se espera que el usuario digital sea quien realiza las primeras transacciones vía el engaño. Hasta los fraudes donde el usuario ya no es el que realiza las primeras transacciones que llevan al fraude, dado que más bien, sufrió del robo de su información personal sin que participara de forma directa en el proceso de robo de su información.

En este último caso, existe una red oscura donde se comercializan datos para aquellos cibercriminales que buscan acceder a datos confidenciales del usuario digital. O bien, grupos de cibercriminales, o hacker solitarios, que se quieren allegar de aquella información crítica de usuarios para realizar fraudes cibernéticos.

En este artículo trataremos solo de uno de este tipo de sistemas fraudulentos, y comentaremos algunas de las estrategias digitales que se están usando en busca de reconocer y detener los movimientos digitales fraudulentos. Habremos de comentar, que la propuesta presentada es parte de los trabajos en la aplicación de algoritmos de aprendizaje que se están realizando recientemente en la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Trataremos en este artículo de las llamadas transacciones monetarias digitales fraudulentas. Las transacciones digitales que se realizan a través de la banca en línea, las compras por internet y las transferencias monetarias vía sistemas de pago digitales son las principales fuentes del intento de cibercriminales por realizar transacciones falsas que les reditué en ganancia monetaria.

Con el acceso a las apps proporcionadas por las principales instituciones bancarias, las apps de la nueva industria llamada fintech (empresas relativamente nuevas que utilizan la tecnología digital para brindar servicios financieros), o incluso cualquier plataforma digital en línea, se ha incrementado la industria de los fraudes en las transacciones digitales. El fraude transaccional en las plataformas digitales puede resultar del uso no autorizado de tarjetas bancarias y del acceso a cuentas de usuarios para realizar transacciones no autorizadas. Estos procesos generalmente se originan fuera de las plataformas digitales, mediante la venta de información bancaria (producto de hackeos a estas entidades) o en foros ilegales como en la red oscura.

Otro sector que también participa en este tipo de transacciones es el comercio online, es decir, empresas dedicadas a prestar un servicio no financiero que utiliza métodos de pago digitales.

Este fenómeno afecta no solo a comercios o entidades financieras, sino también a usuarios de plataformas digitales debido a la vulnerabilidad de la información o situaciones en las que el dinero robado tiene que ser reintegrado por el mismo usuario. Las pérdidas económicas globales acumuladas por esta situación fueron de 38 mil millones de dólares americanos para el cierre de 2023. Además, las tendencias indican que para 2028, la cantidad aumentará a 362 mil millones de dólares americanos (Malone, 2023).

En el caso de fraude debido al acceso no autorizado a cuentas de usuarios, las causas pueden ser diversas. Desde vulnerabilidades informáticas en el lado comercial que se aprovechan para extraer información de acceso a cuentas, robo de dispositivos de usuario (que contienen acceso a cuentas digitales), hasta programas maliciosos que infectan los dispositivos de los usuarios para extraer información personal. Una vez que el acceso a una cuenta se ha visto comprometido, existe el riesgo de que se realicen transacciones fraudulentas.

Actualmente, las empresas absorben la mayor parte de las pérdidas monetarias a medida que los bancos les transfieren

esta deuda. Si no se aborda el problema, la empresa puede adquirir una gran cantidad de deuda debido a este tipo de transacciones. Además, la reputación empresarial se ve afectada en diferentes niveles, desde la perspectiva social hasta los mecanismos implementados por los bancos que perjudican la tasa de aceptación de las transacciones comerciales.

El fenómeno de las transacciones fraudulentas ha provocado que las entidades que utilizan pagos online establezcan medidas para combatir este comportamiento. Entre las herramientas digitales que han permitido tener resultados sobresalientes en la detección y prevención de transacciones fraudulentas, ha sido el modelado matemático de las transacciones digitales, por ejemplo, usando grafos, y el uso de algoritmos de aprendizaje automático para reconocer patrones en los modelos gráficos que caracterizan transacciones fraudulentas.

Grafos

El origen de la palabra grafo es griego y su significado etimológico es 'trazar'. Un grafo se refiere a un conjunto de entidades (aristas y vértices) que puede ser utilizado para modelar relaciones entre ellos. Los grafos tienen utilidad al analizar problemas de diversa índole (ciencias sociales, química, física, biología, etc.), en donde aristas y vértices adquieren diferentes significados dependiendo del área de estudio.

Un grafo puede considerarse como un objeto geométrico, aunque en realidad es un objeto combinatorio, es decir, se conforma por un conjunto de puntos (vértices) y un conjunto de líneas (aristas) que conectan a esos puntos.

Formalmente, un grafo se define como un par ordenado formado de vértices y aristas, en donde ambos son un conjunto de elementos numerables. El tamaño del grafo se determina de acuerdo al número de vértices. Las aristas expresan relaciones entre vértices.

Un grafo puede ser dirigido si las aristas poseen una dirección (las aristas conectan un vértice fuente con un vértice destino). Un grafo no dirigido corresponde al caso

donde no existe distinción en el orden de conexión. Por otro lado, se pueden obtener particiones de los vértices y aristas que forman un grafo de tal forma que estos elementos forman una representación más pequeña del grafo original. Esto es llamado un subgrafo y es un concepto útil, ya que en ocasiones se necesita operar solo sobre subgrafos de un grafo principal.

Los grafos tienen dos tipos de representación tomando en cuenta la información para construir el grafo, esto es mediante una matriz de adyacencia o una lista de adyacencia. La Figura 1 muestra un ejemplo de ambos tipos de representación. La matriz de adyacencia es una tabla en donde las filas y columnas dan como referencia la conexión entre vértices de un grafo. Por otro lado, las listas de adyacencia, como su nombre lo indica, son listas que almacenan los vértices adyacentes unos de otros. Ambos tipos de representación pueden ser útiles al momento de implementar algoritmos basados en grafos.



Figura 1. Ejemplo esquemático de un grafo temporal (TG) con la información que consideramos. Para este trabajo, siete diferentes tipos de grafos se construyeron. Aquellos con solo un tipo de evento de interacción (por ejemplo registro de tarjeta) contienen como tipos de vértices a Usuarios y Tarjetas. En esta figura el grafo corresponde a un registro de tarjeta-dispositivo-cuenta de banco.

Los grafos permiten representar objetos matemáticos y sus relaciones, por ejemplo, representar relaciones binarias, la topología de redes de carreteras o de enlaces ferroviarios, redes aéreas, o la red eléctrica de una localidad. Los grafos han permitido modelar, visualizar y analizar problemas de diferentes índoles. En nuestro caso, hemos utilizado la estructura de grafos para representar transacciones digitales que se realizan a través de una

plataforma online. Por ejemplo, en nuestro modelo de grafos, los vértices representan; usuarios, dispositivos, direcciones de IP, tarjetas y cuentas bancarias.

Normalmente, se asocian etiquetas para identificar cada uno de los vértices y aristas en un grafo. Pero además, dependiendo de la aplicación, es posible asociar a cada uno de los vértices del grafo un vector de características que representa el estado actual de ese vértice. Similarmente, para cada una de las aristas del grafo se le puede asociar también un vector de características. Por ejemplo, asociar a cada arista información estructural sobre la transacción representada por la arista. Así, los grafos son estructuras de datos no lineales que tienen una naturaleza generalmente dinámica.

En la Figura 2 se ilustra una vista parcial del grafo que modela las transacciones digitales que pueden realizarse en una plataforma de pago en línea.

En nuestra aplicación, se desea estudiar la topología de cada una de las transacciones fraudulentas. Es por esto que necesitamos usar el concepto de vecindad de un vértice v que se define, para grafos dirigidos, como todos los vértices adyacentes al vértice v . Diremos que un grafo es bipartito si puede dividirse en dos subconjuntos de forma que cada arista tiene a sus vértices extremos en un subconjunto distinto.

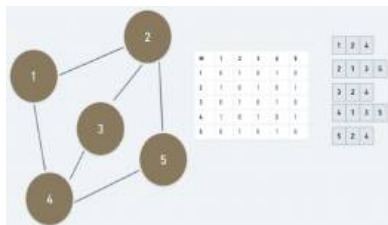


Figura 2. Matriz de adyacencia (izquierda en blanco) y lista de adyacencia (derecha en gris) de un grafo.

Además de lo anterior, los grafos pueden dividirse dependiendo de las características que los definen. Por ejemplo, si el grafo posee un conjunto de diferentes tipos

de vértices y diferentes tipos de aristas, es llamado un grafo heterogéneo. En contraposición, grafos con un único tipo de vértice y arista se definen como grafos homogéneos. Dentro de los grafos heterogéneos podemos encontrar a los grafos bipartitos mencionados anteriormente. En general los grafos heterogéneos tienen un gran número de aplicaciones en la vida cotidiana, desde interacciones sociales para modelar fenómenos económicos, sistemas de recomendación de compras en línea, hasta el mismo proceso de detección de fraude tratado en este trabajo.

De manera adicional a la clasificación anterior, los grafos también pueden ser del tipo cuyos elementos están asociados a marcas temporales, es decir, existe una secuencia temporal sobre la forma en que vértices y aristas se conectan entre sí. Este tipo de grafos son llamados grafos dinámicos. Corresponden a un tipo más general de grafos, a su vez, los grafos dinámicos pueden ser homogéneos o heterogéneos.

Redes Neuronales

Las redes neuronales son un conjunto de algoritmos que tienen como finalidad el aproximar alguna función, tomando en consideración una serie de datos de entrada de tal modo que con base en esos datos se identifique que función podría generar esos datos. Esta es una forma sencilla de entender a una red neuronal, sin embargo, de manera histórica el término se concibió como una analogía al funcionamiento de las neuronas, formando redes y conexiones entre sí para el intercambio de información.

De manera típica una red neuronal está formada por el encadenamiento de múltiples funciones, de ahí el porqué recibe el nombre de red. Cada una de estas funciones son llamadas capas de la red y son comúnmente conocidas como redes neuronales multicapas. El término “neuronal”, en analogía a las neuronas del cerebro, se debe a que cada uno de los datos de entrada se asocia al concepto de neurona. De esta forma, las neuronas intercambian esta información mediante las diferentes capas (funciones) de esta red.

Para poder obtener la aproximación de esta función, las redes neuronales necesitan de un conjunto de datos de los cuales aprender o extraer información. El método mediante el cual una red neuronal lleva a cabo este proceso se denomina entrenamiento. Durante el entrenamiento, los parámetros de las funciones que forman parte de la red se inicializan y los datos de entrada se procesan por cada una de estas funciones hasta obtener un resultado. Este resultado es comparado con el resultado real, de tal modo que se puede obtener un error o diferencia entre ambos. El algoritmo continúa mediante el método llamado propagación hacia atrás, en donde los parámetros de cada función se modifican tomando en consideración la retroalimentación debida a los resultados predichos y los resultados reales. Esta retroalimentación hace que durante la siguiente iteración del algoritmo, los resultados predichos se vayan acercando cada vez más a los resultados reales.

La forma específica en que están organizadas la secuencia de operaciones en una red neuronal se denomina arquitectura. Existen diferentes tipos de arquitecturas de redes neuronales sin embargo, existen algunas que están plenamente identificadas y que se ha probado que funcionan para procesar la información de diferentes fuentes (por ejemplo texto, imágenes o datos estructurados como tablas).

Se pueden clasificar las redes neuronales de acuerdo a su arquitectura. Por ejemplo, las redes neuronales convolucionales (LeCun, Bengio, Hinton, 2015) generalmente se utilizan en tareas que implican imágenes. Esto es debido a que las convoluciones (operaciones de transformación) ayudan a hacer más eficiente el procesamiento y a su vez generalizan conceptos como la dependencia de los datos sobre su vecindario. En el caso de las imágenes los datos de entrada corresponden a los valores de los píxeles, entonces existe una dependencia de unos píxeles respecto de la información de sus píxeles vecinos). También se tienen las redes neuronales formadas por más de una capa, estas son llamadas redes neuronales profundas. Este tipo de redes son las de interés para el área de aprendizaje profundo.

Otro tipo de arquitectura de red neuronal

son las llamadas redes neuronales recurrentes (Jordan, 1986; Rumelhart, Hinton, Ronald, 1985; Hochreiter, Schmidhuber, 1997) que están enfocadas en el procesamiento de datos secuenciales, por ejemplo, texto o información estructurada de manera histórica (clima, información económica, etc.). Las redes neuronales recurrentes son llamadas de esta manera porque aplican operaciones de manera recursiva sobre sí misma, de esta manera también son útiles para tener un tipo de contexto sobre los datos de entrada. Por ejemplo, en tareas de texto donde el contexto de una frase u oración son de suma importancia, de igual manera en tareas de pronósticos temporales.

Los transformadores son otro tipo de arquitectura basada en mecanismos de atención (Vaswani, et al, 2017). Generalmente, este tipo de arquitecturas trabajan sobre datos de texto. Los mecanismos de atención ayudan a mejorar el proceso del contexto de la información, ya que otorgan mayor o menor importancia a las secuencias de información

De esta forma, las redes neuronales se pueden aplicar para diferentes propósitos que van desde la clasificación de imágenes, detección de rostros, sistemas de recomendación, generación o clasificación de texto, entre otras aplicaciones. En nuestro caso, nos interesa aplicar las redes neuronales para realizar un proceso de clasificación automática de transacciones fraudulentas, esto mediante el uso de información relacionada al comportamiento de un usuario.

Por ejemplo, un enfoque sencillo consiste en utilizar algoritmos de machine learning convencionales (como árboles de decisión o redes neuronales), obtener características extraídas de un grafo y combinarlas con otro tipo de características relacionadas a transacciones. Sin embargo, a pesar de utilizar información extraída directamente del grafo, este enfoque falla en considerar la información estructural del contexto del vecindario de vértices y aristas, es decir, a qué tipos de vértices o aristas están conectados unos con otros.

Para la detección de transacciones fraudulentas, entre las técnicas del área de aprendizaje automático que han obtenido

mejores resultados, se encuentran las redes neuronales que usan estructuras de grafos (Zhao, Fu, Wu, Li, & Li, 2019) para la detección de transacciones fraudulentas dentro de un sistema de grafos que modele transacciones digitales.

El aplicar algoritmos de aprendizaje tiene la intención de detectar particularidades, que en el área de aprendizaje automático se le llama: 'reconocer patrones'. La idea es identificar qué patrones pueden exhibir las transacciones fraudulentas. Así, por ejemplo, a través del análisis de todo tipo de transacciones, se quiere características como: tipos de cuentas, tipos de compras, tipos de usuarios, etc... que son los que pueden llegar a tener relación como parte de un proceso fraudulento.

El análisis incluye comparar transacciones válidas versus fraudulentas e identificar los patrones más comunes que tienen estas últimas. Este análisis no es sólo de tipo estadístico, sino precisamente los algoritmos de aprendizaje permiten correlacionar diferentes atributos asociados a las transacciones con la clase de fraudulentas, en búsqueda de los patrones subyacentes en este tipo de transacciones.

Al considerar un enfoque de aprendizaje automático con estructuras de grafos para la detección de la clase fraude, se deben tomar en cuenta consideraciones específicas relacionadas con la heterogeneidad del grafo y su evolución en el tiempo. El enmascaramiento del comportamiento fraudulento como comportamiento a reconocer, el método de entrenamiento (ya que en aplicaciones reales los grafos son masivos) y el considerar el problema de la baja disponibilidad de observaciones fraudulentas en comparación con las observaciones normales (clases no balanceadas)

Redes Neuronales de Grafos

Los tipos de vértices que se pueden utilizar para un proceso de detección de fraude, dependen de la plataforma, pero generalmente corresponden a usuarios, tarjetas, dispositivos o direcciones de IP. Los tipos de aristas pueden ser aquellas que representen una interacción con

alguna tarjeta, dispositivo, dirección IP o inclusive transacciones monetarias. De manera adicional, cada vértice y arista puede ser representado por vectores de características relacionados con el comportamiento transaccional de las entidades involucradas (como los usuarios) dentro de la plataforma.

La intención de combinar grafos con redes neuronales es encontrar los patrones que los estafadores pudiesen exhibir (entre estos patrones, las semejanzas que se pudiesen dar de acuerdo a la topología del grafo que modela las transacciones), con el propósito de hacer identificable las transacciones fraudulentas. A pesar de esto, el comportamiento fraudulento cambia con el tiempo y hay situaciones en las que los estafadores logran mimetizarse como buenos usuarios (camuflaje) (Zexuan, Guodong, Yang, Wei, Bailing, 2022).

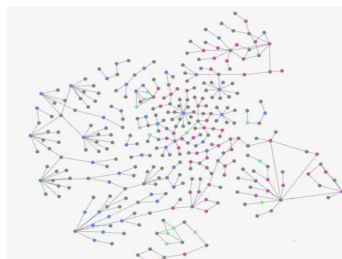


Figura 3. Subgrafo que contiene Tarjetas-Dispositivos-Cuentas de Banco. Los vértices grises representan a Usuarios, los vértices azules representan Dispositivos, los vértices verdes representan Tarjetas y los vértices púrpuras corresponden a Cuentas de Banco

Para identificar transacciones fraudulentas se puede utilizar las denominadas Redes Neuronales de Grafos (Graph Neural Networks - GNN), utilizando la información de la topología del grafo y combinándola con redes neuronales para obtener una herramienta de detección de fraude (transacciones y usuarios). Esta tarea se puede realizar teniendo en cuenta algunas consideraciones importantes como la estructura dinámica del grafo, el problema del camuflaje del fraude, la baja disponibilidad de eventos fraudulentos (en comparación con los eventos regulares) la perspectiva heterogénea del grafo y la estrategia de muestreo a seguir durante

el entrenamiento del algoritmo (debido al uso de datos reales, es decir, un grafo masivo), así como a la dependencia temporal existente.

Por otro lado, un grafo puede modelarse mediante un enfoque estático o dinámico. Si los datos contienen marcas de tiempo que representan el momento en que una arista conecta dos vértices, y esto se encuentra asociado a un evento de interacción (por ejemplo, en una plataforma en línea; un evento puede ser el momento en que un usuario se hace amigo de otro usuario o un usuario realiza un pago a otro usuario) entonces la información puede modelarse mediante un Grafo Temporal Basado en Eventos (ETG por sus siglas en inglés). Este tipo de representación tiene la ventaja de incorporar el parámetro temporal como un parámetro adicional que puede resultar útil en un proceso de detección, como es el fraude.

El uso de una red neuronal de grafos temporales (Temporal Graph Neural Network - TGNN) con datos de un ETG enfocado a prevención de fraude, puede realizarse de manera directa mediante la clasificación de cuentas de usuarios fraudulentos. En este caso, el algoritmo se alimenta de todos los tipos de eventos de interacción disponibles. Las marcas de tiempo de múltiples eventos, incluidos los mencionados anteriormente son almacenadas por las plataformas en línea en diferentes bases de datos.

Una forma típica al trabajar con los algoritmos de aprendizaje, en este caso con una ETG, es dividir el conjunto de transacciones en subconjuntos para realizar el entrenamiento, la validación y el conjunto de pruebas. Por ejemplo, se puede dividir el conjunto de transacciones mediante una partición cronológica; 70%, 15%, 15%, esto es, el conjunto de entrenamiento corresponde al 70% inicial de los datos en orden cronológico, el siguiente 15% corresponde al conjunto de validación de igual forma en orden cronológico y el 15% restante al conjunto de prueba. Durante cada iteración del proceso de entrenamiento, el algoritmo toma una muestra de los datos para realizar el proceso de manera más óptima, tal y como se propone en (Hamilton, Ying, Leskovec, 2017).

La forma más común para construir un ETG es mediante listas de adyacencia ya que mediante este tipo de estructura es más óptimo realizar el proceso de entrenamiento de una TGNN. De manera adicional, la estructura debe incluir las marcas de tiempo de cada evento de interacción en las tuplas que representan los vértices adyacentes. El proceso para la construcción del algoritmo TGNN puede realizarse en cualquier lenguaje de programación, sin embargo, en la actualidad el área de redes neuronales en su mayoría se aborda con el lenguaje Python e implementaciones que permiten el trabajo sobre operaciones matriciales, tal como torch o tensor flow.

En general, los algoritmos de GNN hacen uso de la información de la red local mediante el 'paso de mensaje', que es un tipo de implementación que permite compartir información hacia vértices y aristas vecinas respecto de un vértice objetivo. En una TGNN este procesamiento se combina con una serie de módulos (memoria, agregación y actualización) que permiten obtener información del contexto temporal de un vértice. La memoria es una lista en donde se guarda la información del contexto temporal local de un vértice. Durante cada iteración del algoritmo, se agrega información del vecindario local de un vértice tomando en consideración la memoria. Esta información es agregada y sintetizada de manera conjunta y posteriormente actualizada de manera recursiva en la memoria. De esta forma el entrenamiento de una TGNN toma en consideración siempre la información temporal del grafo.

Con estas consideraciones se tomaron los datos provenientes de una plataforma de pagos en línea y se construyeron diferentes ETG para eventos como el registro de tarjetas, dispositivos y cuentas de banco. Adicionalmente se formaron diferentes combinaciones de los eventos anteriores con la finalidad de procesar un algoritmo TGNN en cada uno de estos grafos. La idea se centró en averiguar si la incorporación de diferentes eventos ayudaba al proceso de clasificación de usuarios fraudulentos. Los resultados corroboraron esta información debido a que la incorporación de más eventos ayuda a tener más información estructural que ayuda a diferenciar entre usuarios fraudulentos y usuarios normales.

Conclusiones

En este artículo se aborda cómo modelar las transacciones digitales de una plataforma de pagos en línea mediante una Red Neuronal de Grafos Temporal (Temporal Graph Network - TGN). La TGN considera un conjunto de eventos de interacción que representan el registro de tarjetas, dispositivos y cuentas de banco por parte de los usuarios, es decir, tres tipos de aristas fueron tomadas en cuenta.

Mediante el uso de la TGN se utilizó un algoritmo de TGNN, tomando como base el algoritmo propuesto en (Rossi, et al, 2020), para realizar un proceso de clasificación de usuarios fraudulentos en una plataforma de pagos en línea. Con los eventos mencionados anteriormente, se pudo formar diferentes combinaciones de TGN que incorporan eventos y sus tiempos de acción, esto con la finalidad de determinar si la cantidad de eventos era determinante para los resultados de la clasificación.

Debido a que las clases no se encontraban balanceadas (usuarios fraudulentos y usuarios normales) se incorporó una ponderación sobre cada una de las clases con el objetivo de otorgar mayor importancia sobre la clase con menor número de observaciones. Los resultados arrojaron que la información estructural y temporal de la combinación de diferentes tipos de eventos logra mejorar el proceso de clasificación.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

Agradecimientos

Agradecemos a Moneypool por los datos proporcionados para la realización de este artículo.

Referencias

- Hamilton WL, Ying R, Leskovec J (2017) Inductive representation learning on large graphs. In: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, NIPS 17, p 1025–1035
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997) Long Short-Term Memory. *Neural Comput.* 9, 8, 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Jordan, Michael I. (May 1986). Serial order: a parallel distributed processing approach. Tech. rep. ICS 8604. San Diego, California: Institute for Cognitive Science, University of California.
- LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G. (2015) Deep learning. *Nature* 521, 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Malone, C. (2023). Online payment fraud: Market forecasts, emerging threats and segment analysis 2023-2028. Accessed: 2023-06-08 12:00 CST. Retrieved from <https://www.juniperresearch.com/researchstore/fintechpayments/online%5C%5C-payment-fraudresearch-report>
- Rossi E, Chamberlain B, Frasca F, et al (2020) Temporal graph networks for deep learning on dynamic graphs. CoRR abs/2006.10637. URL <https://arxiv.org/abs/2006.10637>, 2006.10637
- Rumelhart, David E; Hinton, Geoffrey E, & Williams, Ronald J (Sept. 1985). Learning internal representations by error propagation. Tech. rep. ICS 8504. San Diego, California: Institute for Cognitive Science, University of California.
- Zexuan, D., Guodong, X., Yang, L., Wei, W., & Bailing, W. (2022). Contrastive graph neural network-based camouflaged fraud detector. *Information Sciences*, 618, 39–52. doi:10.1016/j.ins.2022.10.072
- Zhao, P., Fu, X., Wu, W., Li, D., & Li, J. (2019). Network-based feature extraction method for fraud detection via label propagation. 2019 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp), 1–6.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017) Attention is all you need. In Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'17). Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, 6000–6010.

EDICIÓN GENÉTICA PARA TERAPIA CONTRA EL CÁNCER

GENE EDITING FOR CANCER THERAPY

Alejandro E. Cardoso-Martínez
Regina A Hernández-Alor
Luis F. Reyes-Huerta

<https://orcid.org/0000-0003-1439-2589>
<https://orcid.org/0000-0002-3570-5399>
<https://orcid.org/0000-0003-3149-2418>

Fecha de recepción: 00/02/2024

Fecha de revisión: 2/12/2024

Fecha de publicación: 20/01/2025

Licenciatura en Biotecnología, Facultad de Ciencias Biológicas,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
alejandro.cardosom@alumno.buap.mx*, regina.hernandezalo@
alumno.buap.mx, luis.reyeshu@alumno.buap.mx

Resumen

En la última década, los sistemas CRISPR-Cas han sido una herramienta líder de edición de genes, beneficiándose de los descubrimientos sin precedentes de la investigación bacteriana básica. Sin embargo, la complejidad de los sistemas CRISPR va mucho más allá del ámbito original de la defensa inmunitaria. Los sistemas CRISPR-Cas están implicados en influir en la expresión de genes fisiológicos y de virulencia y, posteriormente, en alterar la formación de biopelícula bacteriana, la resistencia a los fármacos, la potencia invasiva y las características fisiológicas propias de las bacterias. El sistema CRISPR-Cas ha permitido la realización de terapias génicas y celulares, la búsqueda de nuevas dianas farmacológicas, una nueva generación de modelos de enfermedades, el esclarecimiento de los mecanismos de resistencia a los fármacos y la comprobación de la eficacia de estos.

Palabras clave. Inmunoterapia del cáncer, CRISPR-Cas, Cas9, Cáncer, genética, inmunidad.

Abstract

Over the past decade, CRISPR-Cas systems have been a leading gene editing tool, benefiting from unprecedented discoveries in basic bacterial research. However, the complexity of CRISPR systems goes far beyond the original scope of immune defense. CRISPR-Cas systems are involved in influencing the expression of physiological and virulence genes and subsequently altering bacterial biofilm formation, drug resistance, invasive potency, and physiological characteristics specific to bacteria. The CRISPR-Cas system has enabled gene and cell therapies, the search for new drug targets, a new generation of disease models, the elucidation of drug resistance mechanisms, and the testing of drug efficacy.

Keywords. Cancer immunotherapy, CRISPR-Cas, Cas9, Cancer, genetics, immunity, immunity

Cáncer

El término cáncer agrupa padecimientos de diverso origen, como cáncer de mama, neuroblastomas, osteosarcomas, leucemias, entre otras; desde que se iniciaron los estudios de esta condición (alrededor de 1838), se describió al tejido canceroso como aquel que está formado por células con alteraciones morfológicas, (Sánchez et al., 2020); y al cáncer en sí como el crecimiento anormal y descontrolado de células, que no solo implica la transformación de la célula sana, sino la incapacidad de las células del sistema inmune de identificar y destruir las células cancerosas recién formadas (Hausman et al., 2019).

- El cáncer en estadísticas

A nivel mundial, el cáncer es la principal causa de muerte, matando a una de cada seis personas, se estima que causa 10 millones de muertes cada año (Kaligotla et al., 2021). Para 2022, la proyección de nuevos casos de cáncer y muertes alcanza la cifra estimada de 1,9 millones de nuevos casos diagnosticados y por lo menos 609 360 muertes en Estados Unidos (Siegel et al., 2022).

- Tipos de cáncer

De acuerdo al Instituto Nacional de Cáncer de Estados Unidos, el cáncer de mama es el tipo más común en el mundo, con una estimación de 290,560 nuevos casos para 2022, seguido del cáncer de próstata, que es uno de los más frecuentes en hombres en países desarrollados (Albayrak et al., 2018). Otros tipos de cáncer que tienen mayor incidencia en la población son el de pulmón, con una proyección de 236,740 para este año, el colorrectal con 151,030 casos estimados, así como melanomas con 99,780 casos diagnosticados. (National Cancer Institute, 2022).

- Cáncer en México

El panorama de este padecimiento en México es atemorizante, de acuerdo a cifras proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se diagnostican alrededor de 191,000 casos de cáncer al año, de los

cuales 84,000 mueren; estas cifras lo posicionan como la tercera causa de muerte en el país y la segunda en Latinoamérica. Según los datos proporcionados por la Secretaría de Salud, en 2020, el tipo de cáncer que es más recurrente en el país es el de mama, con 27, 500 casos y 7,000 defunciones; siendo consecutivo el de próstata con 25,000 casos y 6,9000 muertes; el de colon con 15,000 y 7,000; el tiroideo que alcanza la cifra de 12,000 y 900 decesos; el cervicouterino, 7,870 y 4,000 fallecimientos y el de pulmón con 7,810 casos y 6,7000 defunciones. Datos facilitados por el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), en 2020, el cáncer de mama fue la quinta causa de muerte en la población general y el primer lugar en mujeres. El IMSS detectó en 2021, cuatro mil 780 casos nuevos y dos mil 225 defunciones, con una tasa de incidencia de 25.14 por cada 100 mil y una tasa de mortalidad de 11.70 por cada 100 mil. Las tasas de mortalidad más altas se encuentran en Nuevo León (15.55), Quintana Roo (15.53), Tamaulipas (15.41) y Durango (15.19).

Tratamientos del cáncer

- Tratamientos convencionales y novedosos.

Las estrategias de tratamiento convencional del cáncer más recomendadas incluyen la resección quirúrgica de los tumores, seguida de radioterapia con rayos X y/o quimioterapia; de estas opciones, la cirugía es más efectiva en una etapa temprana de la enfermedad; mientras que la radioterapia utiliza partículas o semillas radiactivas para destruir las células cancerosas, ya que estas crecen y se dividen más rápido en comparación con las células normales del cuerpo. Debido a que la radiación es más perjudicial en las células que crecen rápidamente, la radioterapia daña más las células cancerosas que a las células normales, conduciendo a la muerte de los tejidos tumorales (Briceno Morales et al., 2022). Por otro lado, la quimioterapia reduce la morbilidad y la mortalidad, ya que prácticamente todos los agentes quimioterapéuticos dañan las células sanas, especialmente aquellas que se dividen y crecen rápidamente, las limitaciones de la modalidad quimioterapéutica convencional son: la dificultad

de selección de la dosis, la falta de especificidad, el rápido metabolismo del fármaco y, principalmente, los efectos secundarios nocivos (Li, F.et al., 2019). Entre los obstáculos que presenta el tratamiento del cáncer, se encuentra la resistencia a los medicamentos, ya que las células que anteriormente habían sido suprimidas por un fármaco, reducen la captación y aumentan el flujo de salida del mismo, además de que la modalidad de administración también representa un conflicto (Debela, D. T., et al., 2021).

Por lo tanto, a continuación se discuten de manera breve nuevos enfoques en tratamientos y medicamentos existentes. La nanomedicina es una rama de la ciencia que se ha destacado en esta área por su versatilidad en sistemas de administración de fármacos quimioterapéuticos convencionales, por ser biodegradables y biocompatibles con el organismo, aumentando la accesibilidad y concentración de estos alrededor de los tejidos tumorales (Pucci C., et al., 2019). La inmunoterapia es un tipo de tratamiento que aprovecha la capacidad del cuerpo para combatir infecciones, utilizando las sustancias producidas por él, para ayudar al sistema inmune a combatir de una manera más específica al cáncer (Juan, M.,et al., 2020). También, se encuentra la terapia fotodinámica, en la que una persona recibe una inyección de un medicamento inactivo sensible a cierto tipo de luz. Este permanece por mayor tiempo en las células cancerosas que en las sanas, luego, el médico dirige hacia las células la luz de un láser o de una lámpara especial, activando al medicamento y destruyendo a las células cancerosas.(Gunaydin, G.,et al., 2021)

- Tasa de supervivencia y tasa de mortalidad de los cánceres más comunes

De acuerdo a las cifras presentadas en la Tabla 1, la tasa de supervivencia a cinco años del cáncer de pulmón (18.6 %) es mucho más baja que la de otros tipos de cáncer, como el colorrectal (64.5 %), el de mama (89.6 %) y el de próstata (98.2 %). Mientras que la tasa de supervivencia para el cáncer de pulmón a cinco años es del 56% para los casos de detección temprana (cuando aún no hay metástasis

y el tumor se encuentra contenido en los pulmones).

Tabla 1.Tasa de supervivencia y de mortalidad en los cánceres más comunes

Tipo de cáncer	Tasa de supervivencia y tasa de mortalidad
Cáncer de mama	La tasa de supervivencia promedio a 5 años para las mujeres con cáncer de mama invasivo no metastásico es del 90%, mientras que la tasa de supervivencia promedio a 10 años para las mujeres con cáncer de mama invasivo no metastásico es del 84 %.(Nguyen, M .,et al., 2022) En 2015, la tasa media de mortalidad por cáncer de mama fue de 13.77 por cada 100,000 y la pendiente general de la tasa de mortalidad fue de 0.7 por 100,000 entre 2015 y 2020. Los resultados mostraron que América Latina y el Caribe tienen la mayor tendencia creciente de la tasa de mortalidad por cáncer de mama durante los años 2015 a 2020 (1.48 por 100,000) (Azamjah N et al., 2020).

Cáncer de próstata	La tasa de supervivencia a 5 años para las personas con cáncer de próstata es del 98 %. La tasa de supervivencia a 10 años también es del 98%. Aproximadamente el 84 % de los cánceres de próstata se detectan cuando la enfermedad afecta únicamente a la próstata y los órganos cercanos. Esto se conoce como la etapa local o regional (Ashrafizadeh M et al., 2022). La tasa de mortalidad es del 7 %. Cuando se diagnostica en su etapa más temprana, todas las personas (100 %) con cáncer de próstata sobrevivirán a la enfermedad durante cinco años o más, en comparación a cuando la enfermedad se diagnostica en etapas más avanzadas, sobreviviendo aproximadamente 1 de cada 2 personas (49 %) (Sekhoacha, M et al., 2022).
Cáncer de pulmón	La tasa de supervivencia a cinco años del cáncer de pulmón corresponde al 18.6 %. Las estimaciones de la Sociedad Estadounidense del Cáncer para el cáncer de pulmón para 2022 son: alrededor de 236,740 casos nuevos (117,910 en hombres y 118,830 en mujeres) y cerca de 130,180 muertes (68,820 en hombres y 61,360 en mujeres) (Mazzone, P. J,et al., 2021).

Cáncer colorrectal	La tasa de supervivencia a cinco años del cáncer colorrectal es del 64.5 %. Cuando el cáncer es diagnosticado en una etapa localizada, la tasa de supervivencia es del 91 %. Cuando el cáncer se disemina a los tejidos u órganos circundantes y/o a los ganglios linfáticos regionales, la tasa de supervivencia a 5 años es del 72 %. Si el cáncer de colon ha invadido partes distantes a su tejido de origen, la tasa de supervivencia a 5 años es del 14 %.(GBD, 2019)
--------------------	---

- Estrategias de prevención en México

La Organización Mundial de la Salud (OMS), realizó las siguientes recomendaciones para evitar este padecimiento: evitar el consumo de tabaco y alcohol, promover la actividad física y buenos hábitos alimenticios, rehuir a los carcinógenos ocupacionales (humo de tabaco, asbesto, benceno, entre otros), eludir las fuentes de radiación, ambientes con alta tasa de contaminación, así como el tratamiento de infecciones que podrían desencadenar en cáncer, tal es el caso de la hepatitis y el virus del papiloma humano.

México se ha adherido a la OMS implementando estrategias preventivas, por ejemplo, con la ayuda de sus directrices, en 2008, se aprobó la ley general para el control de tabaco (Diario Oficial de la Federación, 2008) la cual establece que los empaques de cigarrillos y productos que contengan tabaco deben incluir pictografías que informen sobre el potencial daño que conlleva su consumo; esta misma ley aplicó un aumento del precio en los artículos tabacaleros mediante la aplicación de impuestos (OMS, 2009). Si bien, en los discursos políticos, la información se enfoca en la prevención, la realidad es otra, los nuevos casos siguen en aumento, reflejando la ineficiencia de los programas de prevención. Una de las razones es la

falta de regulación y políticas públicas para compuestos carcinogénicos, tanto de uso cotidiano como industrial, donde los principales afectados son los trabajadores que tienen contacto directo con estas sustancias (Padilla-Ratgoza, et. al., 2020). En cuanto a los tóxicos medioambientales, México cuenta con: La Estrategia Nacional para la Calidad del Aire 2017-2030, el Inventario Nacional de Criterio de Emisiones de Contaminantes (INEM) y programas como ProAire que buscan el mejoramiento en la calidad de aire, sin embargo, muchas empresas incumplen las emisiones de contaminantes establecidos siendo el

Aplicación de la tecnología CRISPR/Cas9 en la inmunoterapia en cáncer

- CRISPR/Cas9

CRISPR (Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente Interespaciadas) se utiliza como una herramienta de edición genética propio de las bacterias en donde forma parte del sistema inmunitario adaptativo, ayudando al huésped a defenderse de material genético externo; la estructura de CRISPR en *Escherichia coli* fue reportada por Ishino en 1987, pero fue hasta 2002 cuando Jansen lo identificó en otros microorganismos y se le dio el nombre con el que actualmente se conoce, finalmente en 2012 su funcionamiento fue esclarecido por Doudna y Charpentier, investigación por la que fueron galardonadas con el Nobel de Química en 2020 (Wu et al, 2018).

Un grupo de científicos japoneses que trabajó en *E. coli* y Francisco Mojica con *Haloferax mediterranei* fueron quienes descubrieron cómo actúa este sistema de defensa en los sistemas biológicos: un bacteriófago (virus capaz de infectar bacterias) al infectar una célula, está inserta su ADN y se introduce en el ADN de la bacteria, justamente en el sitio CRISPR, creando un archivo de infección, los trozos virales insertados son heredados para protegerlos contra los mismos virus que causaron la primera infección, logrando que estos organismos se defiendan contra reinfecciones por

virus (Martínez-Oliva, 2020).

- Definición de sistema CRISPR/Cas9

El sistema CRISPR/Cas9 está compuesto por dos partes, una enzima endonucleasa (enzima Cas9) que se encargará de abrir a los enlaces de la doble hélice y cortar al ADN a partir de un molde de ARN (Yin, 2021 y Volobueva et al, 2019). El ARN guía, primero reconocerá a un patrón de pares de bases de ADN, llamada PAM, el cual al unirse hará más fuerte el punto de corte de la enzima Cas9. Posteriormente, la maquinaria interna de reparación de ADN realice su trabajo, lo que podría conducir, a errores aleatorios, o incluso en la reparación completa de esa secuencia si acaso se usa una plantilla de reparación de ADN que venga de fuera del organismo; dependiendo del modo en como se aplique el sistema, se puede activar o inactivar un gen (Wu et al, 2018); así como insertar, invertir, reordenar o sustituir secuencias para poder tener los efectos deseados (Santa María D'Angelo et al, 2020).

-

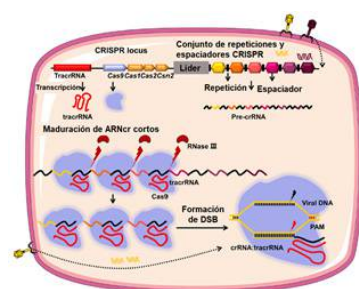


Figura 1. El ARNcr: nucleasas Cas9 guiadas por ARNcr mediadas por sistemas inmunitarios adaptativos. Modificada de Tang, N et al, 2022.

- ¿Por qué CRISPR/Cas9?

En la actualidad, además del sistema CRISPR/Cas9, han surgido una serie de tecnologías para la edición genética, tales como las nucleasas con dedos de zinc (ZFN) y las nucleasas efectoras similares a activadores de la transcrip-

ción (TALEN). Sin embargo, estas dos tecnologías emplean una estrategia de modificación de proteínas, misma que complica su fabricación y costo. Mientras que Cas9 es una nucleasa que es guiada por pequeños ARN a través del emparejamiento de bases objetivo, representando un sistema con un diseño más fácil, alta especificidad y adecuado para edición de genes multiplexada y de alto rendimiento para una variedad de tipos celulares (Ran, F., 2013).

Gracias al sistema CRISPR/Cas9 se han identificado varios objetivos terapéuticos del cáncer, genes implicados en la tumorigénesis, resistencia a los fármacos, y letalidad sintética (Yin, 2021).

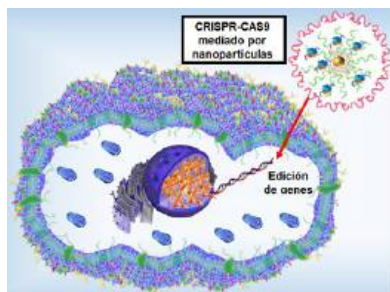


Figura 2. Representación gráfica de un vehículo de entrega a nanoescala para CRISPR-Cas9. Modificada de Ratan, Z. A et al, 2019.

- Aplicación del sistema CRISPR/Cas en el tratamiento de otras enfermedades

La terapia génica es el proceso de reemplazar un gen defectuoso con ADN exógeno y editar el gen mutado en su ubicación original; es el último desarrollo en la revolución de la biotecnología médica y desde 1998 hasta 2019, se han aprobado 22 nuevas terapias génicas, donde se incluye a CRISPR/Cas9 para el tratamiento de enfermedades humanas (Asmamaw, M. et al., 2021), siendo de gran importancia, ya que hasta el momento se conocen más de 6000 trastornos genéticos para los que aún carecen de estrategias de tratamiento eficaces (Jackson M., 2018).

El sistema CRISPR/Cas9 se ha investigado

para el tratamiento de la artrosis, enfermedad crónica que degrada progresivamente al cartílago articular, en donde fue aplicada para disminuir los niveles de la proteína conexina 43 (Cx43), disminuyendo los procesos de dediferenciación y senescencia celular en los que se veía implicada la proteína (Varela-Eirín et al., 2019).

También se ha explorado en el tratamiento del VIH-SIDA, que aunque ya existe la terapia antirretroviral de gran actividad y capaz de suprimir la replicación del virus, no puede erradicar los reservorios virales latentes en pacientes con esta afección. Sin embargo, con el sistema CRISPR/Cas9 es posible apuntar a cofactores celulares o al genoma del VIH para reducir la infección por el virus o incluso eliminar a aquel integrado al ADN humano, así como para inducir su activación para su eliminación (Xiao, Q., 2019).

Así mismo, una angiogénesis anormal, puede estar implicada en enfermedades como: degeneración macular, retinopatía diabética, artritis, crecimiento de tumores y metástasis; en un estudio realizado en Japón, aplicando un virus adenoasociado con el sistema CRISPR/Cas9, se logró disminuir la expresión del VEGFR2 (receptor 2 del factor de crecimiento endotelial vascular), reduciendo hasta en un 80% su expresión, demostrando que puede reducir la angiogénesis patológica relacionada a los padecimiento antes mencionados (Martínez-Oliva, 2020).

Además, a través de CRISPR/Cas9 se logró editar células madre derivadas de la sangre del cordón umbilical para que estas secreten sRAGE, un receptor que reduce la muerte neuronal y poder contribuir en el tratamiento del Parkinson (Martínez-Oliva, 2020).

Finalmente, CRISPR-Cas9 podría usarse para la investigación de tratamientos de diversas enfermedades hereditarias humanas como la hemofilia, la β -talasemia, fibrosis quística, Alzheimer, Huntington, Parkinson, tirosinemia, distrofia muscular de Duchenne, Tay-Sachs y trastornos del síndrome X frágil. (Mani, I., 2021) quedando un gran campo que explorar con grandes esperanzas.

- Aplicación del sistema CRISPR/Cas9 en células inmunes para el tratamiento del cáncer

Los linfocitos T CD8+, son de gran importancia protectora frente a patógenos y tumores. Durante el avance del cáncer, al estar constantemente expuestos contra anticuerpos e inflamación desarrollan agotamiento funcional, impidiendo el control óptimo de los tumores, por lo que se ha estudiado la terapia celular adoptiva con células T con receptores de antígenos quiméricos (CAR-T) que impulsa la activación de células T con buenos resultados en el tratamiento de tumores (Yin, 2021 y Wu et al, 2018).

Las células T CD8+ expresan muchos receptores inhibidores, incluyendo la proteína 1 de muerte celular programada (PD-1), antígeno 4 de linfocitos T citotóxicos (CTLA-4), entre otros; bloqueando las rutas de PD-1 o CTLA-4 por medio de CRISPR/Cas9 es posible restaurar la función de los linfocitos T y mejorar las defensas del huésped; por lo que la terapia de bloqueo de puntos de control, ha mostrado buenos resultados en pacientes con múltiples tipos de cáncer, algunos con respuestas positivas duraderas (Yin, 2021 y Wu et al, 2018).

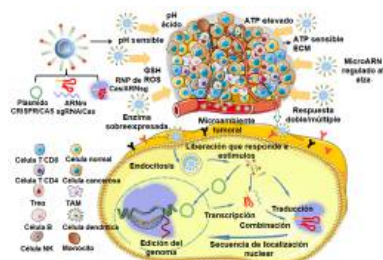
Sabiendo las implicaciones que tiene el agotamiento, anergia y en algunos casos, la senescencia en células T, se han manipulado a través del sistema CRISPR/Cas9 inhibiendo algunos genes (TRAC, TRBC y PDCD1 endógenos) mientras transduce NY-ESO-1 TCR, para aumentar los niveles de transcripción del receptor de la célula T y evitar el agotamiento celular (Finck et al., 2020).

Las células NK, son linfocitos del sistema inmune innato, que juega un papel importante contra tumores y virus, teniendo directamente actividad citotóxica o produciendo citocinas efectoras, reconociendo en el proceso, células estresadas, transformadas, o infectadas a través de los patrones moleculares en su superficie (Afolabi et al., 2019); a través de su edición genética es posible añadirles CAR, que son fragmentos específicos para tumores que indican y activan a las células NK, los cuales han presentado efectos antitumorales in vivo e in vitro (Afolabi

et al., 2019 y Finck et al., 2020); así como el formar moléculas semejantes a CAR, para que reconozca múltiples ligandos, evitando la evasión tumoral (Afolabi et al., 2019), ofreciendo una oportunidad contra distintos tipos de cáncer como leucemia mieloide, o linfomas de células T y leucemias (Finck et al., 2020).

CRISPR/Cas9 también puede ser utilizada para reemplazar alelos completos del complejo principal de histocompatibilidad (MHC) para el trasplante celular (Wu et al, 2018).

Las terapias de células CAR-T (células T diseñadas con receptores de antígenos quiméricos) y TCR-T (células T diseñadas con receptores de células T) se han convertido en modalidades terapéuticas poderosas e innovadoras para pacientes con cáncer. Los CAR son receptores recombinantes que redirigen la actividad de las células T hacia las células diana que expresan un antígeno de superficie específico, independientemente de los patrones clásicos de reconocimiento de péptidos/MHC-TCR. Mientras que las células TCR-T están dirigidas a reconocer epítomos de péptidos específicos de tumores generados desde el interior de las células con la dependencia de las moléculas MHC (Gao et al., 2019). Para este tipo de terapia se utilizaban células T autólogas debido a las limitaciones por el MHC, por lo que para evitar tiempos de producción y costos se concibe la idea de células CART listas para usar, donde la técnica de CRISPR/Cas9 se ha usado para inhibir a los genes TRAC y B2M para generar células CAR-T universales, aumentando la eficiencia de selección de genes para la fabricación de células CAR-T (Gao et al., 2019).



administración de CRISPR/Cas desencadenados por el microambiente del tumor (como el ejemplo de CRISPR/Cas9). Treg: célula T reguladora, TAM: macrófago asociado a macrófagos asociados a tumores, célula NK: célula asesina natural. Modificada de Tang, N et al, 2022.

- Observaciones con el sistema CRISPR/Cas9

La terapia con células CAR T a pesar de mostrar una gran actividad antitumoral contra la leucemia linfoblástica aguda (LLA) de células B y el linfoma no Hodgkin, muestra cierta neurotoxicidad y puede dar lugar al síndrome de liberación de citoquinas. Esto además que el tratamiento depende de instalaciones y técnicos bien calificados (Wu et al, 2018), asimismo la mala calidad y cantidad de células T junto con el tiempo y el costo de fabricarlas dificultan en gran medida la aplicación de la terapia. Por lo que ha surgido la célula T CAR "universal", la cual a partir de la edición de la célula de un paciente, puede ser administrada a otros múltiples, sin embargo, el receptor de células T ab endógeno (TCR) podría reconocer antígenos de histocompatibilidad del receptor, donde junto con la expresión de HLA (antígeno leucocitario humano, podrían rechazar el injerto.

A pesar de que el sistema CRISPR/Cas9 ha facilitado mucho la manipulación genética, se sospecha qué podría causar cáncer sin darse cuenta, ya se que observó que la entrega de Cas9 RNP (ribonucleoproteínas) desencadena una respuesta al daño del ADN dependiente de p53 que suprime la corrección del gen (Gao et al., 2019).

Así como que al ser usada terapéuticamente, el sistema inmune podría desencadenar una inmunidad adaptativa contra las proteínas Cas9, preocupación considerable para futuros ensayos usándola (Gao et al., 2019).

La proteína, al permanecer dentro de la célula posterior a su modificación por un periodo de tiempo, se teme que por mutagénesis su especificidad pueda cambiar, alterando genes normales (Gao et al., 2019).

Los rendimientos in vivo de las células modificadas con CRISPR/Cas9 no es aún satisfactoria, además que la edición de genomas múltiples y la incorporación de fragmentos grandes es muy difícil (Gao et al., 2019).

Conclusión

La edición de genes mediada por CRISPR-Cas ha mostrado un gran potencial en el desarrollo de fármacos de nueva generación y en el tratamiento de trastornos genéticos y varios tipos de cáncer. Al enfocarnos en el impacto del cáncer a nivel nacional y mundial, es posible vislumbrar las oportunidades que ofrece el sistema CRISPR-Cas9 en el tratamiento mencionado y de otras enfermedades, así como nuevos caminos que seguirán avanzando y creciendo en el futuro para ofrecer una mejor calidad de vida para todos.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

Agradecimientos

Nos gustaría empezar agradeciendo y darle las gracias al Dr. Enrique González Vergara por todas las enseñanzas que nos ha dado a lo largo de este semestre, lo que nos permitió poder realizar este trabajo, así mismo a nuestra alma mater la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por habernos permitido formarnos en sus aulas, compartiendo ilusiones y anhelos. Con constancia, dedicación y esfuerzo alcanzamos el objetivo planteado.

Referencias

- Afolabi, L. O., Adeshakin, A. O., Sani, M. M., Bi, J. & Wan, X. (2019). Genetic reprogramming for NK cell cancer immunotherapy with CRISPR/Cas9. *Immunology*, 158(2), 63-69. <https://doi.org/10.1111/imm.13094>.
- Albayrak, G., Konac, E., Ugras Dikmen, A. & Bilen, C. Y. (2018). FOXA1 knock-out via CRISPR/Cas9 altered Casp-9, Bax, CCND1, CDK4, and fibronectin expressions in LNCaP cells. *Experimental Biology and Medicine*, 243(12), 990-994. <https://doi.org/10.1177/1535370218791797>.
- Aregger M, Xing K, Gonatopoulos-Pournatzis T. Application of CHyMERa Cas9-Cas12a combinatorial genome-editing platform for genetic interaction mapping and gene fragment deletion screening. *Nat Protoc.* 2021;16(10):4722–65. <https://doi.org/10.1038/s41596-021-00595-1>.
- Ashrafizadeh M, Paskeh MDA, Mirzaei S, et al. (2022). Targeting autophagy in prostate cancer: preclinical and clinical evidence for therapeutic response. *J Exp Clin Cancer Res.* ;41(1):105. Published 2022 Mar 22. doi:10.1186/s13046-022-02293-.
- Asmamaw, M., & Zawdie, B. (2021). Mechanism and Applications of CRISPR/Cas-9-Mediated Genome Editing. *Biologics : targets & therapy*, 15, 353–361. <https://doi.org/10.2147/BTT.S326422>.
- Azamjah N, Soltan-Zadeh Y, Zayeri F. Global Trend of Breast Cancer Mortality Rate: A 25-Year Study. *Asian Pac J Cancer Prev.* 2019 Jul 1;20(7):2015-2020. doi: 10.31557/APJCP.2019.20.7.2015. PMID: 31350959; PMCID: PMC6745227.
- Briceño Morales, X., & Briceño Morales, C. (2022). Implicaciones de la pandemia en la radioterapia para el cáncer de mama. Radioterapia hipofraccionada [Implications of the pandemic in radiotherapy for breast cancer. Hypofractionated radiation therapy]. *Revista De Senología Y Patología Mamaria*, 35(2), 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.senol.2021.12.008>.
- Bernheim A, Bikard D, Touchon M, Rocha EPC. Atypical organizations

and epistatic interactions of CRISPRs and cas clusters in genomes and their mobile genetic elements. *Nucleic Acids Res.* 2020;48(2):748–60. <https://doi.org/10.1093/nar/gkz1091>.

Chaudhary M, Mukherjee TK, Singh R, Gupta M, Goyal S, Singhal P, et al. (2022) CRISPR/Cas technology for improving nutritional values in the agricultural sector: an update. *Mol Biol Rep.* <https://doi.org/10.1007/s11033-022-07523-w>.

D'Angelo, R. S. M., Osorio, J. D. Q., Flor, A. T., & Escalante, A. C. P. (2020). Las técnicas crispr/cas9 aplicadas al mejoramiento genético humano: Un diálogo biotecnológico, antropológico-filosófico y jurídico. *Cuadernos de Bioética*, 31(103).

Debela, D. T., Muzazu, S. G., Heraro, K. D., Ndalama, M. T., Mesele, B. W., Haile, D. C., Kitui, S. K., & Manyazewal, T. (2021). New approaches and procedures for cancer treatment: Current perspectives. *SAGE open medicine*, 9: 1-10. <https://doi.org/10.1177/20503121211034366>

Diario Oficial de la Federación. (2008). Decreto por el que se expide la Ley General para el Control del Tabaco; y deroga y reforma diversas disposiciones de la Ley General de Salud. <https://docs.mexico.justia.com/estatales/puebla/ley-general-para-el-control-del-tabaco.pdf>

Elliott EK, Haupt LM, Griffiths LR. Mini review: genome and transcriptome editing using CRISPR-cas systems for hematological malignancy gene therapy. *Transgenic Res.* 2021;30(2):129–41. <https://doi.org/10.1007/s11248-020-00232-9>.

Finck, A., Gill, S. I. & June, C. H. (2020). Cancer immunotherapy comes of age and looks for maturity. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17140-5>

Ferlay J, Colombet M, Soerjomataram I, et al. Cancer statistics for the year 2020: an overview. *Int J Cancer.* 2021;149(4):778–789. <https://doi.org/10.1002/IJC.33588>

Gao, Q., Dong, X., Xu, Q., Zhu, L., Wang, F., Hou, Y. & Chao, C. (2019). Therapeutic potential of CRISPR/Cas9 gene editing in engineered T cell therapy. *Cancer Medicine*, 8(9), 4254-4264. <https://doi.org/10.1002/cam4.2257>

Gunaydin, G., Gedik, M. E., & Ayan, S. (2021). Photodynamic Therapy for the Treatment and Diagnosis of Cancer-A Review of the Current Clinical Status. *Frontiers in chemistry*, 9, 686303. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.686303>

GBD 2019 Colorectal Cancer Collaborators (2022). Global, regional, and national burden of colorectal cancer and its risk factors, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The lancet. Gastroenterology & hepatology*, 7(7), 627-647. [https://doi.org/10.1016/S2468-1253\(22\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S2468-1253(22)00044-9)

Hausman D. M. (2019). What Is Cancer?. *Perspectives in biology and medicine*, 62(4), 778-784. <https://doi.org/10.1353/pbm.2019.0046>

Instituto Mexicano del Seguro Social. (24 de octubre de 2022). Epidemiología del cáncer de mama. <https://www.gob.mx/imss/articulos/epidemiologia-del-cancer-de-mama-318014>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (17 de octubre de 2022). Estadísticas a propósito del día internacional de la lucha contra el cáncer de mama (19 de octubre). Comunicado de prensa núm. 591/22. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2022/EAP_CANMAMA22.pdf

Jackson M., Marks L., May G.H.W. & Wilson J.B.. (2018). The genetic basis of the disease. *Essays Biochem*. 62 (5): 643-723. <https://doi:10.1042/ebc20170053>.

Juan, M., & Rives, S. (2020). Inmunoterapia CAR-T en hemato-oncología pediátrica... presente y futuro [CAR-T immunotherapy in pediatric hemato-oncology... present and future]. *Anales de pediatría*, 93(1), 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2020.04.023>

Kaligotla, V. S. A., Jasti, T. & Kandra, P. (2021). CRISPR/Cas9 in cancer: An attempt to the present trends and future prospects. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 69(3), 1238-1251. <https://doi.org/10.1002/bab.2200>

Li, F., Aljahdali, I., & Ling, X. (2019). Cancer therapeutics using survivin BIRC5 as a target: what can we do after over two decades of study?. *Journal of experimental & clinical cancer research : CR*, 38(1), 368. <https://doi.org/10.1186/s13046-019-1362-1>.

Loureiro, A., & da Silva, G. J. (2019). CRISPR-Cas: Converting A Bacterial Defence Mechanism into A State-of-the-Art Genetic Manipulation Tool. *Antibiotics (Basel, Switzerland)*, 8(1), 18. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8010018>

Mani I. (2021). CRISPR-Cas9 for treating hereditary diseases. *Progress in molecular biology and translational science*, 181, 165–183. <https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2021.01.017>

Mazzone, P. J., Silvestri, G. A., Souter, L. H., Caverly, T. J., Kanne, J. P., Katki, H. A., Wiener, R. S., & Detterbeck, F. C. (2021). Screening for Lung Cancer: CHEST Guideline and Expert Panel Report. *Chest*, 160(5), e427–e494. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2021.06.063>

National Cancer Institute. (10 de mayo de 2022). Common cancer types. <https://www.cancer.gov/types/common-cancers>

NgNidhi, S., Anand, U., Oleksak, P., Tripathi, P., Lal, J. A., Thomas, G., Kuca, K., & Tripathi, V. (2021). Novel CRISPR-Cas Systems: An Updated Review of the Current Achievements, Applications, and Future Research Perspectives. *International journal of molecular sciences*, 22(7), 3327. <https://doi.org/10.3390/ijms22073327>

Nguyen, M., & Osipo, C. (2022). Targeting Breast Cancer Stem Cells Using Naturally Occurring Phytoestrogens. *International journal of molecular sciences*, 23(12), 6813. <https://doi.org/10.3390/ijms23126813>

Martínez Oliva, B. G. (2020). Crispr, una herramienta para editar genomas. *Gaceta Médica Boliviana*, 43(2), 179-183. <https://doi.org/10.47993/gmb.v43i2.66>

Mizuki, H., Shimoyama, Y., Ishikawa, T., & Sasaki, M. (2022). A genomic sequence of the type II-A clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR)/CRISPR-associated system in *Mycoplasma salivarium* strain ATCC 29803. *Journal of oral microbiology*, 14(1), 2008153. <https://doi.org/10.1080/20002297.2021.2008153>.

Organización Mundial de la Salud. (2 de febrero de 2022). Cáncer. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer>

Organización Mundial de la Salud. (2009). El Convenio Marco de la OMS para el Control del Tabaco: un panorama general. https://www.who.int/fctc/WHO_FCTC_summary_January2015_SP.pdf

Padilla-Ratgoza, N., Monroy-Torres, R., Sandoval-Salazar, C., et al. (2020)- Cancer prevention programmes in México: are we doing enough?. *ecancer*. 14(1). <https://doi.org/10.3332/ecancer.2020.997>.

Pucci, C., Martinelli, C., & Ciofani, G. (2019). Innovative approaches for cancer treatment: current perspectives and new challenges. *Ecancermedalscience*, 13, 961. <https://doi.org/10.3332/ecancer.2019.961>.

Ran, F., Hsu, P., (2013). Wright, J. et al. Genome engineering using the CRISPR-Cas9 system. *Nat Protoc* 8, 2281–2308. <https://doi.org/10.1038/nprot.2013.143>

Ratan, Z. A., Son, Y. J., Haidere, M. F., Uddin, B. M. M., Yusuf, M. A., Zaman, S. B., ... & Cho, J. Y. (2019). CRISPR-Cas9: a promising genetic engineering approach in cancer research. *Therapeutic advances in medical oncology*, 10, 1758834018755089. <https://doi.org/10.1177/1758834018755089>

Rehman U, Parveen N, Sheikh A, et al. Polymeric nanoparticles-siRNA as an emerging nano-polyplexes against ovarian cancer. (2022). *Colloids Surf B Biointerfaces.* ;218:112766. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112766>.

Sánchez C., (2013). Conociendo y comprendiendo la célula cancerosa: fisiopatología del cáncer. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 24(4), 553-562. [https://doi.org/10.1016/S0716-8640\(13\)70659-X](https://doi.org/10.1016/S0716-8640(13)70659-X)

Sekhoacha, M., Riet, K., Motloutse, P., Gumek, L., Adegoke, A., & Mashele, S. (2022). Prostate Cancer Review: Genetics, Diagnosis, Treatment Options, and Alternative Approaches. *Molecules* (Basel, Switzerland), 27(17), 5730. <https://doi.org/10.3390/molecules27175730>

Secretaría de Salud. (2020). Cáncer. <https://salud.edomex.gob.mx/salud/cancer>

Siegel R., Miller K., Fuchs H. & Jemal A. (2022). Cáncer statistics, 2022. *CA Cancer J Clin*, 72(1), 7-33. <https://doi.org/10.3322/caac.21708>.

Singh V, Sheikh A, Abourehab MAS, et al. Dostarlimab as a miracle drug: rising hope against cancer treatment. *Biosensors* (Basel). 2022;12(8):617. <https://doi.org/10.3390/BIOS1208061>.

Tang, N., Ning, Q., Wang, Z., Tao, Y., Zhao, X., & Tang, S. (2022). Tumor microenvironment based stimuli-responsive CRISPR/Cas delivery systems: A viable platform for interventional approaches. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 210, 112257. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.112257>

Varela-Eirín, M, Varela-Vázquez, A, Blanco, A, Caeiro, JR, & Mayán, MD. (2019). Regulación de la plasticidad celular y senescencia en condrocitos articulares: conexina 43 como diana terapéutica para el tratamiento de la artrosis. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*, 11(2), 46-54. Epub 20 de enero de 2020.

Volobueva, A., Orekhov, A. & Deykin, A. (2019). An update on the tools for creating transgenic animal models of human diseases – focus on atherosclerosis. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 52(5). <https://doi.org/10.1590/1414-431x20198108>

Wong ACS, Massel K, Lam Y, Hintzsche J, Chauhan BS. Biotechnological road map for innovative Weed Management. *Front Plant Sci.*2022;13:887723. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.887723>.

Xiao, Q., Guo, D., & Chen, S. (2019). Application of CRISPR/Cas9-Based Gene Editing in HIV-1/AIDS Therapy. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 9, 69. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2019.00069>

Yin, T. (2021b). Improving T cell therapy: in vivo CRISPR-Cas9 screens tell us how to do. *Precision Clinical Medicine*, 4(3), 176-178. <https://doi.org/10.1093/pcmedi/pbab015>.

CÓMO LOS GRAFOS Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL PUEDE TRANSFORMAR LA BUSQUEDA DE METABOLICOS

HOW GRAPHS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE CAN TRANSFORM THE HUNT FOR METABOLITES

Reynold Osuna González*
Guillermo De Ita Luna

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 56 - 68

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0009-0002-5228-7317>
<https://orcid.org/0000-0001-7948-8253>

Fecha de recepción 5/02/2024
fecha de revisión 2/12/2024
fecha de publicación 20/01/2025

Facultad de Ciencias de la Computación, Edif. CCO1 – 14 Sur y
Av. Sn. Claudio, C.U.
Doctorado en Ingeniería del lenguaje y del conocimiento
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
reynold.osuna@alumno.buap.mx *
guillermo.deita@correo.buap.mx

Resumen

Ante la posibilidad de que la vasta cantidad de información genética de un gran número de microorganismos se encuentre subutilizada, el presente trabajo explora el potencial de combinar la bioinformática con técnicas de inteligencia artificial para descubrir microorganismos capaces de producir metabolitos de interés. Se discute el uso de grafos de conocimiento para representar relaciones biológicas, el graph embedding para transformar su información en representaciones espaciales, y el clustering para identificar patrones en secuencias genéticas obtenidas mediante BLAST. Se destaca la importancia de estas herramientas en la búsqueda de soluciones innovadoras para desafíos sociales, como la degradación de contaminantes o el control de plagas. Además, se resalta el papel crucial de la inteligencia artificial en acelerar la comprensión y el aprovechamiento del vasto conocimiento biológico disponible en la actualidad. Este enfoque integrado ofrece nuevas oportunidades para explorar y comprender el universo biológico, así como para desarrollar aplicaciones prácticas en campos como la medicina y la biotecnología.

Palabras clave: Grafos de conocimiento, Bioinformática, Inteligencia Artificial, BLAST

Abstract

Given the possibility that the vast amount of genetic information from numerous microorganisms is underutilized, this paper explores the potential of combining bioinformatics with artificial intelligence techniques to discover microorganisms capable of producing metabolites of interest. The use of knowledge graphs to represent biological relationships, graph embedding to transform their information into spatial representations, and clustering to identify patterns in genetic sequences obtained through BLAST are discussed. The importance of these tools in the search for innovative solutions to social challenges, such as the degradation of pollutants or pest control, is emphasized. Additionally, the crucial role of artificial intelligence in accelerating the understanding and utilization of the vast biological knowledge available today is highlighted. This integrated approach offers new opportunities to explore and understand the biological universe, as well as to develop practical applications in fields such as medicine and biotechnology.

Keywords: Knowledge graphs, Bioinformatics, Artificial Intelligence, BLAST

Introducción

La Inteligencia Artificial (IA), se enfoca en el estudio del comportamiento inteligente que es logrado por medios computacionales, y donde la representación del conocimiento y el razonamiento desempeñan un papel sumamente importante (Brachman & Levesque, 2004).

Con la gran cantidad de información que la humanidad genera constantemente, las ciencias de la computación se han convertido en un faro que ilumina el camino hacia la comprensión y el aprovechamiento de estos vastos datos. Para ser procesada por una computadora, la información debe contar con una representación adecuada, lo mismo que el conocimiento, siendo ambos temas fundamentales para las ciencias de la computación, existiendo ya diversas propuestas al respecto.

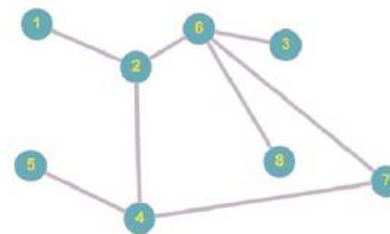


Figura 1. G: $V(G) = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$, $E(G) = \{<1,2>, <2,4>, <2,6>, <3,6>, <4,5>, <4,7>, <6,7>, <6,8>\}$

Una forma de representación de la información ampliamente utilizada en diversas ciencias es la de grafo (Figura 1). Particularmente, los grafos aparecen de forma natural en el estudio de la biología, puesto que tradicionalmente, sistemas biológicos complejos son modelados mediante entidades biológicas interconectadas formando grafos de conocimiento biológico (Figura 2) sobre los que pueden aplicarse técnicas de exploración de grafos para su análisis y tareas predictivas (Mohamed et al., 2021).

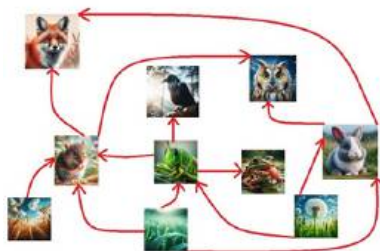


Figura 2. Ejemplo de red trófica (Fuente: Elaboración propia)

Entre las formas de representar conocimiento, una de gran uso y relevancia actual es a través de grafos de conocimiento. En 2012, con el anuncio de que utilizaría grafos de conocimiento, Google atrajo la atención de otras grandes empresas tecnológicas (Hogan et al., 2021) que utilizan esta representación para no sólo almacenar información, sino para realizar consultas y procesar la información que se encuentra en forma implícita, así como para descubrir relaciones entre entidades que no han sido aún declaradas o descubiertas.

En la era del big data, el clustering y los grafos de conocimiento se han convertido en herramientas indispensables para aprovechar y estructurar las grandes cantidades de información generada. Por un lado, las técnicas de clustering permiten agrupar datos similares y descubrir patrones en conjuntos de datos, mientras que, por el otro lado, los grafos de conocimiento permiten conectar y representar conocimientos de manera computacionalmente viable. La combinación de ambas técnicas potencia el aprovechamiento de grandes cantidades de información y ha encontrado aplicaciones en diversos campos como la bioinformática, donde se analizan datos biológicos para comprender relaciones complejas.

Grafos de Conocimiento: La Revolución de la Representación

La representación adecuada de la información es un pilar fundamental en las ciencias de la computación. En este

contexto, los grafos de conocimiento (Knowledge Graphs o KG, figura 3) se vislumbran como una herramienta poderosa. Si bien es posible encontrar referencias hacia ellos desde 1972, fue Google quienes, en 2012, al anunciar el uso de grafos de conocimiento, atrajo la atención de otros gigantes tecnológicos, marcando el comienzo de una era donde estos grafos no solo almacenan información, sino que también facilitan consultas y procesan datos de manera implícita, descubriendo relaciones entre entidades (Hogan et al., 2021).



Figura 3. Grafo de conocimiento basado en la red trófica de la figura 2

Un grafo de conocimiento está dado por $KG = \langle E, R, T \rangle$, donde E (entity) y T (tail) representan al conjunto de entidades y R (relation) representa al conjunto de relaciones y las aristas en R conectan dos nodos para formar una tripleta (h, r, t) .

En la tripleta (h, r, t) se encuentra implícita una direccionalidad de la relación, que parte de la entidad “cabeza” (head) hacia la entidad “cola” (tail), así que puede ser deducido que una característica de un grafo de conocimiento es que se trata de un grafo dirigido.

Siguiendo la definición del grafo de conocimiento basada en tripletas, puede definirse también al razonamiento sobre grafos de conocimiento como el proceso por el cual, siguiendo un camino relacional P , se genera una tripleta (h, r, t) tal que $h \in E, r \in R, t \in T, (h, r, t) \in KG$.

Las aplicaciones de los KG son vastas, desde generar nuevo conocimiento hasta respaldar decisiones. La detección de comunidades dentro de un grafo es una aplicación intrigante, desafiando algorit-

mos de agrupamiento no supervisado. Por ejemplo, la detección de comunidades dentro de un grafo puede ser vista como un proceso de agrupamiento no supervisado: el reto de esta tarea es inferir estructuras latentes de comunidad a partir de únicamente un grafo $G = (V, E)$ como entrada, y puede tener múltiples aplicaciones en la vida real (Hamilton, 2020) como el descubrimiento de módulos funcionales en redes o grafos de interacción genética (Agrawal et al., 2018) o el descubrimiento de grupos de usuarios fraudulentos en redes de transacciones financieras (S. Pandit et al., 2007).

Agrupamientos: Explorando las Similitudes y Descubriendo Patrones

El agrupamiento o clustering es una herramienta esencial de aprendizaje automático para explorar grandes cantidades de datos, permitiendo descubrir patrones y relaciones. La tarea básica de clustering se enuncia como la partición de un conjunto de data points en grupos donde los miembros sean tan similares como sea posible (Reddy, 2014). Cuando se trata de grafos de conocimiento, se presenta un desafío único: la representación de un grafo no se adapta directamente a puntos de datos, llevando a dos enfoques. El primero consiste en diseñar algoritmos de agrupamiento para trabajar directamente sobre grafos, mientras que el segundo se enfoca en transformar la información del grafo en una representación espacial (embedding) antes de aplicar algoritmos de clustering. El embedding del grafo de conocimiento se vuelve esencial para esta transformación, ya que, aunque existen algoritmos de clustering para grafos, pueden resultar computacionalmente costosos.

El tomar un conjunto de objetos y dividirlo en subconjuntos o grupos más pequeños es una tarea cotidiana que se ha llevado al campo de la computación. El análisis por clúster divide los datos en grupos que son significativos, útiles o ambos, siendo una técnica de aprendizaje no supervisado, mediante la cual se agrupan objetos o datos en conjuntos denominados clústeres, basándose en su similitud y cuyas

aplicaciones se extienden a ramas como la recuperación de información, estudio del clima, medicina, negocios y la biología (Tan et al., 2006).

En la literatura es posible encontrar múltiples técnicas de agrupamiento, dado que no existe una técnica universal, en su lugar, hay diferentes propuestas con diferentes desempeños y especializadas para una gran variedad de escenarios (Tan et al., 2019), sin embargo, es posible definir ciertas técnicas básicas.

Por ejemplo, el algoritmo básico llamado k-means consiste en elegir un número inicial de k centroides, siendo este un parámetro especificado por el usuario y que corresponde al número de clústeres deseados. El algoritmo entonces asigna a cada punto el centroide más cercano. Posteriormente, el algoritmo actualiza el centroide de cada grupo formado, con base en los puntos pertenecientes al grupo, para volver a asignar a cada punto el centroide más cercano. Este proceso se repite hasta que ya no sea posible reasignar los centroides asociados a cada punto, lo que por necesidad implica, que los centroides ya no pueden ser modificados.

Para calcular la cercanía de un punto a un centroide es necesario utilizar una función de proximidad o distancia, siendo determinada su naturaleza por el tipo de espacio utilizado, existiendo múltiples posibilidades. Cuando la representación de los datos está dada en un espacio euclidiano, es común el uso de la distancia euclidiana o la distancia de Manhattan como funciones de proximidad.

También es utilizada una función objetivo que permita medir la calidad de los clústeres obtenidos. Suponiendo un espacio de representación euclidiano, utilizando una función de proximidad para calcular la cercanía a los centroides, es posible utilizar la suma del error cuadrático (SSE por sus siglas en inglés, definida en la ecuación 1 tal que, dados los clústeres obtenidos en cada iteración de k-means, puede compararse la calidad de cada aproximación comparando sus respectivos SSE's: entre menos sea su valor, mayor es la calidad de los clústeres, dado que cada punto se encuentra más

cercano a su respectivo centroide (Tan et al., 2006).

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} distancia(c_i, x)^2$$

Ecuación 1. Suma del error cuadrático

Siendo x un objeto, C_i el i-ésimo clúster, c_i el centroide de C_i , y k el número de clústeres (Tan et al., 2006).

Por último, para elegir los centroides de cada clúster se requiere también una forma matemática de hacerlo, que, en el mismo caso de espacios euclidianos planteado previamente, la media es la medida que minimiza el SSE y está dada por la ecuación 2

$$c_i = \frac{1}{m_i} \sum_{x \in C_i} x$$

Ecuación 2. Cálculo de centroides

Siendo x un objeto, C_i el i-ésimo clúster, c_i el centroide de C_i , y m_i el número de objetos en el i-ésimo clúster (Tan et al., 2006). En la figura 3 podemos apreciar datos agrupados por medio del algoritmo k-means teniendo como entrada $k = 3$.

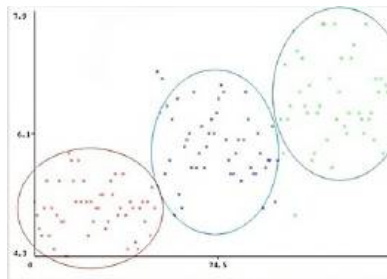


Figura 4. Ejemplo de datos agrupados por medio de k-means ($k = 3$)

Es importante destacar que otras medidas de distancia además de la euclidiana pueden ser utilizadas, como la similitud del coseno o distancia de Manhattan.

k-means tiene como ventaja ser un algoritmo que no demanda grandes recursos de almacenamiento y cuya complejidad en el tiempo es del orden lineal con respecto al número total de datos a agrupar.

DBSCAN en el Mundo del Agrupamiento de Datos

Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) es un algoritmo de agrupamiento que busca zonas densas. DBSCAN adopta un enfoque único al realizar el agrupamiento basado en la densidad de los datos. Visualicemos nuestro conjunto de datos como un terreno donde algunas regiones son más densas que otras. Este algoritmo identifica áreas de alta densidad, separándolas de las áreas con baja densidad de datos. La magia comienza al determinar el vecindario de cada punto en el conjunto de datos, formado por todos los puntos dentro de un radio específico (llamado "epsilon"). La densidad local alrededor de cada punto es calculada, y aquellos puntos cuya densidad supera un valor crítico (denominado "minPts") se convierten en centros de clústeres, mientras que su vecindario conforma dicho clúster. Los puntos que quedan fuera de estos clústeres se consideran ruido en los datos.

Una característica sobresaliente de DBSCAN es que los parámetros epsilon y minPts son especificados por el usuario, y a diferencia de algoritmos como k-means, DBSCAN no requiere como entrada el número de clústeres esperados. Esto otorga mayor flexibilidad al proceso, aunque esta libertad implica que el determinar los valores de epsilon y minPts cobra gran importancia, siendo parámetros que determinan si los resultados obtenidos son o no significativos.

La técnica básica para definir epsilon y minPts consiste en realizar un análisis del comportamiento de la distancia de un punto hasta k número de vecinos cercanos, valor denominado k-dist. Lo

esperable para puntos que pertenecen a un clúster es que su valor k-dist sea pequeño siempre que este no sea mayor al del tamaño del clúster, con pequeñas variaciones dada la naturaleza aleatoria de la distribución de los puntos. Sin embargo, para puntos que no están en un clúster, como aquellos puntos considerados ruido, el valor de k-dist sea relativamente grande. Por lo tanto, si se calcula k-dist para todos los puntos del conjunto de datos, se ordenan de menor a mayor y se grafiquen, debería observarse un cambio abrupto en el valor k-dist que corresponda a un valor de epsilon viable. Si se toma entonces este punto de cambio abrupto como valor para epsilon y el valor de k como el valor de minPts, los puntos cuya k-dist sea menor a epsilon serán marcados como parte del clúster, mientras que otros puntos serán marcados como ruido (Tan et al., 2006).

DBSCAN tiene una complejidad temporal del orden $O(m^2)$ en el peor de los casos, donde m es número de puntos que conforman el conjunto de datos, pero si se limita a espacios de pocas dimensiones, es posible mejorar su complejidad al orden de $O(m \cdot \log m)$, mientras que su complejidad espacial, incluso para espacios de muchas dimensiones corresponde al orden de $O(m)$. Si bien DBSCAN es capaz de encontrar clústeres que a k-means le resulta imposible identificar, no es un algoritmo tan eficaz cuando los clústeres poseen densidades con grandes variaciones y cuando los datos pertenecen a espacios con muchas dimensiones (Tan et al., 2006).

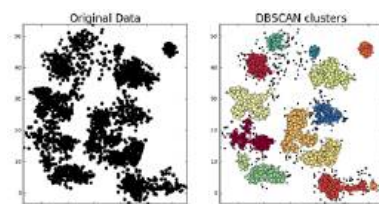


Figura 5 Ejemplo de datos agrupados por medio de DBSCAN (referencia aquí: Ernst, 2017)

Es posible utilizar aprendizaje automático para obtener representaciones del grafo de conocimiento, es decir, llevar a cabo un embedding al grafo para aplicar diversos algoritmos de agrupamiento sobre la nueva representación (Hamilton, 2020).

Embeddings de Grafos: Transformando Dimensiones y Preservando Conocimiento

El embedding de grafos emerge como una herramienta eficaz para abordar los desafíos del análisis de grafos. Esta técnica transforma un grafo en un espacio de baja dimensionalidad, preservando sus estructuras (Cai et al., 2017). El 'Graph embedding' apunta a representar el grafo mediante vectores de baja dimensionalidad, facilitando tanto el análisis de grafos como el aprendizaje de representaciones. Formalmente, para un grafo $G = (V, E)$, aprender el embedding de sus nodos implica codificar todos los nodos del grafo en dos formas: vectores de puntos determinísticos o distribuciones probabilísticas estocásticas. Estas representaciones preservan las propiedades de la estructura del grafo de manera óptima. El pairwise similarity en el espacio embebido latente facilita la aproximación de la similitud de nodos en el espacio original (Xu, 2020).

Dado un grafo $G = (V, E)$, la tarea de aprender el embedding de sus nodos puede ser formulada matemáticamente como aprender una proyección ϕ tal que todos los nodos del grafo ($V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, donde $n = |V|$) pueden ser codificados en dos formas diferentes de embedding (desde un espacio de alta dimensionalidad hacia uno de baja dimensionalidad) (M. Xu, 2020); una forma de embedding de los nodos son vectores de puntos determinísticos ($\phi = \{z_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$), mientras que la otra forma son mediante distribuciones probabilísticas estocásticas ($\phi = \{\Pi(\phi, \phi) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$) siendo el vector medio ϕ $L/2$, y la matriz de covarianza ϕ $L/2 \times L/2$.

Además, las propiedades de la estructura del grafo se preservan de manera óptima

en el espacio embebido. Con este fin, pairwise similarity (por ejemplo, producto punto $\phi^T \phi$) en el espacio embebido latente facilita una aproximación de la similitud de nodos ($\text{Sim}(v_i, v_j)$) correspondiente en el espacio original, es decir, $(\text{Sim}(v_i, v_j)) \sim \phi^T \phi$ para embedding de grafos basado en vectores; específicamente, $\text{Sim}(v_i, v_j) \sim \phi^T \phi$ para embedding de grafo basado en distribuciones gaussianas, y donde Sim es una función de similitud predefinida (Xu, 2020).

Al aplicar embedding a grafos de conocimiento y conjuntarlo con clustering, es posible potenciar el aprovechamiento de bastas cantidades de información, misma que en esta era del Big Data, es generada a un ritmo superior del que puede ser analizada. Tener éxito en la aplicación conjunta de ambas técnicas podría acelerar la comprensión, mejorar la capacidad de análisis y aumentar el aprovechamiento del vasto conocimiento con el que se cuenta en la actualidad.

Entre las ciencias que pueden llegar a manejar grandes cantidades de información, al punto que resulta impráctico el análisis de ella sin apoyo computacional, y que gracias a ese apoyo, se ha logrado grandes avances; por ejemplo, la biología molecular, que recurriendo al uso de técnicas computacionales ha sido capaz de extraer información valiosa para el entendimiento de los procesos bioquímicos que se llevan a cabo a nivel celular, dando paso así, al surgimiento del campo de la bioinformática.

Bioinformática

La bioinformática es un campo interdisciplinario en el que se conjuntan la biología, la informática y la estadística con el objetivo de analizar datos biológicos y comprender complejas relaciones entre ellos. Esta disciplina se vale de técnicas computacionales y de Inteligencia Artificial (IA) para procesar, analizar e interpretar grandes cantidades de datos biológicos como son las secuencias de ADN y proteínas presentes en los organismos (Notredame & Claverie, 2007).

Una de las líneas de investigación en la microbiología y la biología molecular consiste en el estudio de microorganismos

que puedan ser utilizados para el control de plagas, descontaminación de suelos o de los que se puedan obtener nuevos medicamentos. Por medio de pruebas experimentales en laboratorio, es posible encontrar organismos capaces de producir metabolitos (nombre dado a los productos del metabolismo), que puedan ser utilizados. Como por ejemplo, para degradar materiales peligrosos, o que sean capaces de producir antibióticos, tal y como sucede en el ejemplo clásico de la penicilina, metabolito compuesto por el hongo *penicillium* y que le sirve de defensa contra microorganismos invasores, por medio de un efecto llamado antagonismo.

Explorando el Universo Biológico a Través de la Bioinformática

De la intersección entre la biología, la informática y la estadística, emerge un fascinante campo de estudio: la bioinformática. Este emocionante dominio científico se dedica a desentrañar los misterios biológicos mediante el análisis de datos y la comprensión de complejas relaciones entre ellos. Empleando herramientas computacionales y técnicas de Inteligencia Artificial (IA), la bioinformática nos sumerge en un vasto océano de información biológica, como las secuencias de ADN y proteínas que se encuentran en los organismos.

Una de las áreas de investigación más apasionantes en microbiología y biología molecular implica el estudio de microorganismos con potencial para el control de plagas, la descontaminación ambiental o el desarrollo de nuevos medicamentos. A través de experimentos de laboratorio, se exploran organismos capaces de producir metabolitos, sustancias vitales para diversas aplicaciones, desde la degradación de materiales peligrosos hasta la producción de antibióticos, tal como lo demostró el clásico ejemplo de la penicilina, un metabolito elaborado por el hongo *Penicillium* para defenderse contra invasores microbianos mediante un fenómeno conocido como antagonismo.

En el ámbito de la bioinformática, los grafos de conocimiento pueden ser herramientas esenciales para representar entidades y relaciones biológicas, como genes, proteínas e interacciones moleculares. El agrupamiento o clustering, por su parte, permite identificar patrones y relaciones entre secuencias genéticas y proteicas, ayudando a desentrañar relaciones evolutivas y estructuras de sistemas biológicos complejos. En este vasto campo, se busca entender las intrincadas relaciones entre genes, proteínas y el entorno de los organismos.

La secuenciación del ADN de diversos organismos es llevada a cabo día a día por gran cantidad de biólogos y biotecnólogos en todo el mundo, enriqueciendo rápidamente nuestro conocimiento genético. El resultado de este proceso es un genoma, un mapa detallado de los genes presentes en un organismo, que busca identificar la función específica de cada gen en la producción de proteínas.

El ADN, esa asombrosa molécula de la vida, está compuesta tan solo cuatro tipos de nucleótidos -adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T)- que forman dos cadenas complementarias, cada una siendo de miles de nucleótidos, formando la base de la información genética. Gracias a la bioinformática, hemos logrado secuenciar genomas completos, descifrando la secuencia de nucleótidos y determinando la composición de cada gen.

Es necesario recalcar el hecho de que dichas cadenas son complementarias: la adenina se une exclusivamente a la timina, mientras que la citosina se empareja únicamente con la guanina. En la figura 6, podemos apreciar un diagrama de bloques que representa un fragmento de ADN, una ventana a la maravillosa complejidad de la vida que la bioinformática nos ayuda a descifrar.

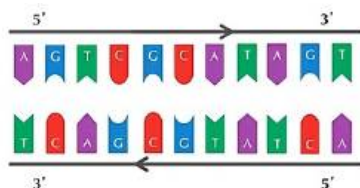


Figura 6. Cadenas complementarias de ADN. Las cadenas que forman son idénticas, pero con sentido inverso (Compeau & Pevzner, 2015).

Una aplicación práctica de la biología molecular es la búsqueda de compuestos o metabolitos que nos proporcionen alguna utilidad, siendo un metabolito un compuesto químico que se produce a través del proceso metabólico de un organismo. Así, un metabolito de interés puede consistir en una sustancia química que ataque a otros organismos, lo que derive en identificación de nuevos fármacos o que funcionen como control de plagas.

A partir de la información genómica disponible, es deseable identificar organismos con características que el investigador considere responsables de la producción del metabolito de interés. Sin embargo, realizar comparaciones directas y de forma exhaustiva entre la información genómica de cada organismo resulta extenuante, y muchas veces impráctico. Esto es debido a que el número de microorganismos que pueden poseer genes de interés es extenso, y a pesar de contar con los mismos grupos de genes, habrá microorganismos que expresen el metabolito deseado y otros que no lo hagan, puesto que los genes no son el único factor que influye en la producción de este. También se debe considerar que los genes pueden tener pequeñas variaciones en su composición, debido a pequeñas mutaciones, sin que el cambio llegue a afectar la función del gen. Es decir, que un mismo gen permite cierta variación antes de que se convierta en un gen diferente. Por si fuera poco, podrían existir microorganismos que, contando con solo una parte de los genes identificados y relacionados con el metabolito, sean capaces de producirlo.

Una vez que se identifiquen organismos de interés basándose únicamente en la presencia de genes, será necesario realizar experimentos en laboratorio para corroborar que efectivamente se produzca el metabolito deseado. Siendo primordial limitar la selección de microorganismos a aquellos que presenten un alto grado de similitud, misma que va más allá de una simple elección de ellos en base de la presencia completa de los genes.

Comparar las secuencias de ADN y de proteínas entre individuos de la misma especie o entre especies, ayuda a identificar genes responsables de funciones similares entre ellos. Así como a detectar mutaciones, sin embargo, comparar cadenas de miles de caracteres en búsqueda de coincidencias parciales o exactas puede resultar en una tarea extenuante y temporalmente costosa. Siendo un problema previamente estudiado en las ciencias de la computación, llamado en ocasiones coincidencia de patrones o string matching en inglés, en el que se busca encontrar una determinada cadena de caracteres, ya sea de forma aproximada o exacta, dentro de una cadena de caracteres de mayor tamaño, existiendo diversas propuestas algorítmicas para su solución, pero en el ámbito de la biotecnología, la propuesta denominada Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) es la que ha sido, desde su publicación en 1990, un algoritmo estándar para la comparación de cadenas.

Basic Local Alignment Search Tool (Altschup et al., 1990)

Basic Local Alignment Search Tool (BLAST) es una herramienta bioinformática ampliamente utilizada para comparar secuencias de ADN, ARN o proteínas con bases de datos biológicas para encontrar regiones similares. BLAST se utiliza para identificar similitudes funcionales entre secuencias y para inferir la función de secuencias desconocidas, publicada originalmente en 1990 por Stephen F. Altschul, Warren Gish, Webb Miller, Eugene W. Myers y David J. Lipman.

Para hacer uso de ella, se comienza proporcionando una secuencia (secuencia de consulta o query), ya sea de ADN o de una proteína, que se desee comparar con secuencias conocidas ya almacenadas en una base de datos. y BLAST encuentra regiones locales de alta similitud (subcadenas alineadas) entre la query y las cadenas contenidas en la base de datos, permitiendo una respuesta rápida y eficiente, comparada contra el enfoque

de fuerza bruta de buscar coincidencias exactas entre cadenas.

BLAST ocupa principalmente un algoritmo de alineación de pares que se encarga de hacer esta comparación de la query con todas las secuencias contenidas en la base de datos, dividiendo la secuencia de consulta en palabras de longitud w , para buscar coincidencias exactas de estas palabras a lo largo de las secuencias de la base de datos. Una vez llevada a cabo esta tarea, BLAST extiende las coincidencias encontradas en ambas direcciones para identificar regiones más largas de similitud, aun cuando ya no sean coincidencias exactas, hasta que se alcanza una región donde la similitud cae por debajo de un umbral T .

Posteriormente, se lleva a cabo una fase de evaluación, en la que se calculan puntuaciones a estas regiones de similitud, tomando en cuenta las coincidencias exactas, las similitudes y las diferencias entre las bases o aminoácidos alineados y mediante estadísticas se determina si las similitudes encontradas son significativas o son dadas por mero azar, con lo que se filtran los resultados mediante umbrales de significado para reducir los falsos positivos.

Entre las aplicaciones existentes en el campo de la biotecnología para KGE se encuentran la predicción de interacciones entre fármacos y su objetivo (drug-target interactions o DTI) y la predicción de efectos secundarios debidos al uso de múltiples fármacos al mismo tiempo por parte de un paciente. Identificar las interacciones entre fármacos y su objetivo (DTI) tiene el potencial de reducir enormemente el campo de búsqueda por medicamentos candidatos en el tratamiento de una enfermedad, razón por la cual es importante contar con métodos computacionales de predicción eficientes (Chen et al., 2018), siendo un área de investigación activa por al menos los últimos 10 años. El flujo de procesamiento para aplicaciones cuyo objetivo sea DTI puede ser dividido en tres etapas: preprocesamiento de los datos de entrada, entrenamiento de un modelo subyacente en base a un conjunto de reglas de aprendizaje y por último un modelo predictivo. Así mismo clasifica

los métodos de aprendizaje máquina para predicción DTI en métodos supervisados y semisupervisados. Otra aplicación biotecnológica consiste en el estudio de la similitud de medicamentos, ya que propiedades estructurales, moleculares y biológicas similares a menudo se relacionan con indicaciones o efectos secundarios similares (Ma et al., 2018).

Integración de Grafos de Conocimiento, Embedding y Clustering para el Descubrimiento de Metabolitos

Una gran cantidad de trabajos bioinformáticos están enfocados hacia aplicaciones médicas y a la secuenciación de cadenas de ADN o RNA, habiendo un rango amplio de aplicaciones sobre las cuales aplicar métodos de clustering en búsqueda de nuevos descubrimientos, como es, el de identificación de cepas bacterianas capaces de producir metabolitos de interés. Por una parte, los grafos de conocimiento permiten representar relaciones entre genes, proteínas y metabolitos de una manera completa y estructurada, facilitando la comprensión de las interacciones y vías metabólicas involucradas en la producción de metabolitos específicos. Por otra parte, las técnicas de graph embedding permiten transformar las secuencias genéticas en espacios de baja dimensionalidad, preservando similitudes y relaciones entre secuencias, lo que puede ayudar a la identificación de patrones característicos que sean relevantes para la producción de metabolitos. Utilizando técnicas de clustering al resultado del graph embedding de un grafo de conocimiento, es posible agrupar secuencias genéticas similares, permitiendo identificar cepas bacterianas o incluso otros organismos que compartan características genéticas que se relacionen con la producción del metabolito que se busca obtener. Aplicando estas técnicas, se pueden priorizar los organismos con mayor potencial para llevar a cabo experimentos prácticos en laboratorio, seleccionando aquellos organismos con mayores probabilidades de producir sustancias de uso médico o industrial.

Conclusiones

En conclusión, la convergencia de la bioinformática, la inteligencia artificial aplicada a grafos de conocimiento, ofrece un gran potencial para la exploración y comprensión del inmenso universo microbiológico. La representación por medio de grafos de conocimiento de secuencias genéticas obtenidas mediante BLAST, junto con la aplicación de técnicas de embedding y clustering, permiten desentrañar complejas relaciones entre genes, proteínas y metabolitos, pudiendo acelerar el descubrimiento de nuevos compuestos biológicamente activos e impulsando avances en diversos campos, como la medicina, biotecnología e incluso la conservación del medio ambiente.

Utilizando la inteligencia artificial en nuestra búsqueda de tesoros microbianos, podemos acercarnos cada vez más al descubrimiento de soluciones innovadoras para desafíos a los que nos enfrentamos como sociedad, como pueden ser la degradación de contaminantes o el control de plagas, aprovechando los metabolitos obtenidos de

forma sostenible a partir de microorganismos.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado para la presente realización de mis estudios de doctorado (Número de Beca 833591).

Referencias

- Altschup, S. F., Gish, W., Miller, W., Myers, E. W., & Lipman, D. J. (1990). Basic Local Alignment Search Tool. In *J. Mol. Biol* (Vol. 215).
- Brachman, R. J., & Levesque, H. J. (2004). *Knowledge Representation and Reasoning* (1st Edition). Morgan Kaufmann.
- Cai, H., Zheng, V. W., & Chang, K. C.-C. (2017). A Comprehensive Survey of Graph Embedding: Problems, Techniques and Applications. <http://arxiv.org/abs/1709.07604>
- Chen, R., Liu, X., Jin, S., Lin, J., & Liu, J. (2018). Machine learning for drug-target interaction prediction. In *Molecules* (Vol. 23, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules23092208>
- Hamilton, W. L. (2020). *Graph Representation Learning* (Vol. 14, Issue 3).
- Hogan, A., Blomqvist, E., Cochez, M., D'Amato, C., Melo, G. De, Gutierrez, C., Kirrane, S., Gayo, J. E. L., Navigli, R., Neumaier, S., Ngomo, A. C. N., Polleres, A., Rashid, S. M., Rula, A., Schmelzeisen, L., Sequeda, J., Staab, S., & Zimmermann, A. (2021). Knowledge graphs. *ACM Computing Surveys*, 54(4). <https://doi.org/10.1145/3447772>
- Ma, T., Xiao, C., Zhou, J., & Wang, F. (2018). Drug Similarity Integration Through Attentive Multi-view Graph Auto-Encoders. <http://arxiv.org/abs/1804.10850>
- Mohamed, S. K., Nounu, A., & Nováček, V. (2021). Biological applications of knowledge graph embedding models. *Briefings in Bioinformatics*, 22(2), 1679–1693. <https://doi.org/10.1093/bib/bbaa012>
- Notredame, C., & Claverie, J.-M. (2007). *Bioinformatics for dummies* (Second Edition). Wiley Publishing, Inc.
- Reddy, A. *. (2014). *DATA CLUSTERING DATA CLUSTERING Algorithms and Applications* Chapman & Hall/CRC Data Mining and Knowledge Discovery Series Chapman & Hall/CRC Data Mining and Knowledge Discovery Series.
- S. Pandit, D. Chau, S. Wang, & C. Faloutsos. (2007). NetProbe: A fast and scalable system for fraud detection in online acution networks. 16th International Conference on World Wide Web (WWW '07), 201–210. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/1242572.1242600>

Tan, P.-N., Steinbach, M., Karpapne, A., & Kumar, V. (2019). Introduction to Data Mining, 2/e (2nd ed.).

Tan, P.-N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). Introduction to data mining.

Xu, M. (2020). Understanding graph embedding methods and their applications. <http://arxiv.org/abs/2012.08019>

SUSTRATOS SERS: UNA HERRAMIENTA EFECTIVA PARA LA DETECCIÓN DE MICRO/NANOPLÁSTICOS EN EL MEDIO AMBIENTE

SERS SUBSTRATES: AN EFFECTIVE TOOL FOR THE DETECTION OF MICRO/NANOPLASTICS IN THE ENVIRONMENT

Rafael Villamil Carreón

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 69 - 77

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0000-0003-2087-1375>

fecha de recepción 00/04/2024

fecha de revisión 2/12/2024

fecha de publicación 20/01/2025

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y Av. 18 sur., Puebla, Pue., C. P. 72570, México.

r.villamilcarreon@viep.com.mx

Hoy en día, se han encontrado de forma abundante partículas de micro/nanoplásticos (MNP) en los entornos de agua marina, agua dulce, agroecosistemas, atmósfera, alimentos, agua potable, flora, fauna y otras ubicaciones remotas. El conocimiento sobre la toxicidad de los MNP en humanos aún es limitado, pero se ha establecido que esta toxicidad está influenciada principalmente por la concentración de exposición, los componentes de las partículas, los contaminantes adsorbidos, los órganos involucrados y la susceptibilidad individual. La falta de técnicas de identificación apropiadas para las extracciones y caracterizaciones, así como la cuantificación y origen de materiales submicrométricos o nanométricos dificulta la tarea del análisis de MNP presentes en el suelo, el aire y el agua. Los nanomateriales metálicos pueden explotarse de diferentes maneras debido a sus peculiares propiedades ópticas y electrónicas, como lo es la técnica de espectroscópica de dispersión Raman de superficie mejorada (SERS por sus siglas en inglés). SERS permite la identificación de huellas dactilares estructurales de moléculas en bajas concentraciones aprovechando principalmente la amplificación de campos eléctricos producidos por nanoestructuras metálicas que funcionan como antenas. La aplicación de sustratos SERS en la detección de MNP parece ser una solución para la detección futura de este tipo de contaminantes en una amplia gama de entornos naturales y biológicos.

Palabras clave: sustrato SERS, micro/nanoplásticos, medio ambiente, contaminación, nanopartículas metálicas

Abstract

Nowadays, micro/nanoplastic particles have been found abundantly in the environments of marine water, freshwater, agroecosystems, atmosphere, food, drinking water, flora, fauna and other remote locations. Knowledge about the toxicity of micro/nanoplastics in humans is still limited, but it has been established that this toxicity is mainly influenced by the exposure concentration, the components of the particles, the adsorbed contaminants, the organs involved and individual susceptibility. The lack of appropriate characterization techniques for extractions and characterizations, as well as the quantification and identification of submicrometric or nanometric materials, makes the task of analyzing micro/nanoplastics present in soil, air and water difficult. Plasmonic materials can be exploited in different ways due to their peculiar optical and electronic properties, such as the surface-enhanced Raman scattering (SERS) spectroscopic technique. SERS allows the identification of structural fingerprints of molecules at low concentrations by mainly taking advantage of the amplification of electric fields produced by metallic nanostructures that function as antennas. The application of SERS substrates in the detection of micro/nanoplastics appears to be a solution for the future detection of this type of contaminants in a wide range of natural and biological environments.

Keywords: SERS substrate, micro/nanoplastics, environment, pollution, metal nanoparticles

Introducción

El plástico es un material que proporciona un enorme beneficio social. Actualmente, la producción mundial supera los 320 millones de toneladas al año, de las cuales más del 40% se utiliza como envases de un solo uso, lo que genera una gran cantidad de residuos plásticos (Wright et al., 2017). En los últimos 70 años, hemos fomentado un enorme aumento en la producción mundial de plástico, aumentando año con año la cantidad de residuos plásticos, que en consecuencia se ha extendido al medio ambiente hasta tal punto que podemos decir que vivimos en un mundo de plástico. La exposición de estos residuos plásticos a la radiación solar acelera su degradación, lo que hace que se vuelva quebradizo y en combinación con las condiciones de degradación ambiental, los fragmentos de plástico pueden descomponerse en fragmentos miles de veces más pequeños que su tamaño original dando lugar a la creación de residuos plásticos denominados microplásticos (1–1000 μm) y nanoplasticos (1–1000 nm). Hoy en día, se han encontrado de forma abundante partículas de micro/nanoplasticos (MNP) en una amplia gama de formas, polímeros, tamaños y concentraciones en los entornos de agua marina, agua dulce, agroecosistemas, atmósfera, alimentos, agua potable, flora, fauna y otras ubicaciones remotas (Campanale et al., 2020). Al ingresar en la cadena alimenticia los efectos adversos sobre los organismos expuestos a los MNP se pueden dividir en dos categorías: efectos físicos y efectos químicos. El primero está relacionado con el tamaño, la forma y la concentración de las partículas de los MNP, y el segundo está relacionado con las sustancias químicas peligrosas asociadas con componentes o posibles sustancias adheridas (Rahman et al., 2021). La ingesta de MNP por parte de los seres humanos ha comenzado a ser bastante evidente. Los principales medios de entrada al cuerpo humano pueden ser por ingestión, por inhalación o por contacto con la piel. Tras la introducción de MNP en el cuerpo humano, su destino y sus efectos siguen siendo controvertidos y poco conocidos. El conocimiento sobre la toxicidad en humanos aún es limitado, pero se ha establecido que esta toxicidad

está influenciada principalmente por la concentración de exposición, los componentes de las partículas, los contaminantes adsorbidos, los órganos involucrados y la susceptibilidad individual (Enfrin et al., 2021). La falta de técnicas de identificación apropiadas para la extracción y caracterización, así como la cuantificación y origen de materiales submicrométricos o nanométricos dificulta la tarea del análisis de MNP presentes en el suelo, el aire y el agua (Jiménez-Lamana et al., 2023). Se requiere el desarrollo de nuevas estrategias analíticas capaces de detectar, identificar y cuantificar nano y microplásticos en baja concentración en una amplia gama de medios. Sin embargo, el análisis y seguimiento de la contaminación por MNP resulta especialmente desafiante por muchas razones que involucran la preparación de muestras y los procesos involucrados en la distribución y destino de los plásticos (Mintenig et al., 2018). Alternativas para controlar la identificación y cuantificación son la utilización de métodos de espectroscopia, imágenes de microscopia y también mediante análisis visual. Las técnicas de espectroscopia vibracional como la transformada de Fourier infrarroja y la espectroscopia Raman se utilizan ampliamente para identificar la composición química de MNP. El principio básico de estas técnicas es hacer que la molécula objetivo vibre al interactuar con la luz de un haz láser. Estas vibraciones son únicas y se pueden detectar para identificar el tipo de molécula que se está analizando, ya que pueden proporcionar información sobre los grupos funcionales y la estructura molecular además de información sobre el tamaño, la distribución de tamaño y la morfología (Schiavi et al., 2023).

Las técnicas basadas en nanomateriales han mostrado resultados prometedores en este campo sobre el uso de materiales de metales nobles que involucran en la mayoría de los estudios nanopartículas de oro y plata para la detección de MNP. Los materiales metálicos en escala nanométrica pueden explotarse de diferentes maneras debido a sus peculiares propiedades ópticas y electrónicas como lo es la técnica espectroscópica de dispersión Raman de superficie mejorada (SERS por sus siglas en inglés Surface Enhanced Raman scattering) (Cai et al.,

2021). Las ventajas de SERS son un pico nítido de alta resolución definido como una huella dactilar molecular, la naturaleza no invasiva del método, la simplicidad de la manipulación de la muestra, la velocidad del análisis, la identificación del analito in situ y la portabilidad del instrumento (Dey, 2023). Por lo tanto, ha habido un creciente interés en el diseño y la aplicación de nanopartículas metálicas utilizando espectroscopia Raman para analizar MNP, esperando que SERS sea adecuado para el desarrollo de una metodología para cuantificar e identificar los diferentes tipos de MNP que se desprenden de los distintos polímeros existentes.



Figura 1. Principales rutas de introducción de MNP al cuerpo humano

Espectroscopia Raman de Superficie Mejorada (SERS)

SERS es una técnica altamente sensible que mejora la dispersión Raman de moléculas distribuidas cerca de materiales metálicos nanoestructurados como el caso de nanopartículas con forma esférica, cubos, estrellas, dendritas, etc. SERS permite la identificación de huellas dactilares estructurales de moléculas en bajas concentraciones hasta el punto de poder detectar las vibraciones de una sola molécula, aprovechando principalmente la amplificación de campos eléctricos producidos por nanoestructuras metálicas que funcionan como antenas localizando y mejorando la señal de la molécula objetivo. Debido a su sensibilidad y selectividad ultraaltas, esta técnica

tiene una amplia gama de aplicaciones en química de superficies e interfaces, catálisis, nanotecnología, biología, biomedicina, ciencia de los alimentos, análisis ambiental y otras áreas (Han et al., 2022).

En la actualidad, muchos grupos de investigadores han dedicado muchos esfuerzos para fabricar nanoestructuras y microestructuras homogéneas y reproducibles, utilizando una gran variedad de métodos químicos y físicos para diseñar sustratos SERS que puedan estar disponibles comercialmente. Metales nobles con características ópticas interesantes como la plata y el oro son utilizados para crear sustratos perfectos para SERS. Las superficies nanoestructuradas tienen la ventaja de que son muy compatibles con el uso en un microscopio y pueden prepararse y usarse cuando sea necesario. Simplemente, se agrega una gota de una solución líquida preparada con una cierta concentración de la molécula que se desea detectar a un sustrato SERS preparado y se analiza la región de interés. SERS puede considerarse una técnica madura capaz de garantizar que su potencial pueda explotarse en análisis de rutina y de control de calidad.

Aplicación de sustratos SERS en la detección de MNP

Hasta el momento se han publicado pocos artículos sobre la detección de MNP en muestras reales utilizando SERS. A pesar de la alta expectativa de que SERS sea adecuado para el análisis de contaminantes plásticos, todavía existen muchas limitaciones. En este punto, resumimos brevemente la investigación hasta el momento en muestras reales.

SERS es una poderosa herramienta para la detección de contaminantes en una amplia gama de áreas de investigación. El desafío tecnológico es el desarrollar un sustrato SERS económico y reproducible para muestras de MNP de baja concentración para el muestreo, preparación, identificación y cuantificación en diferentes matrices ambientales. Aunque SERS es una técnica muy conocida

principalmente en los campos biológico y forense, su aplicación para la detección de MNP ambientales es un tema que ha empezado a despertar el interés de la comunidad científica (Dey, 2023). Hasta la fecha, ninguna tecnología podía capturar simultáneamente información química y morfológica de los nanoplasticos mientras se realizaba una detección cuantitativa. SERS ha demostrado un rendimiento excepcional en la detección de trazas de contaminantes, además de proporcionar información morfológica.



Figura 2. Metodología de la aplicación de un sustrato SERS para analizar muestras reales contaminadas con micro/nanoplasticos

El desarrollo de sustratos SERS de películas de plata ha proporcionado un entorno de prueba uniforme para detectar MNP. Sorprendentemente, las partículas nanoplasticas de poliestireno individuales de hasta 200 nm se pueden visualizar directamente en este sustrato alcanzando un límite de detección de 5 partes por millón en agua embotellada, agua del grifo y agua de río (Chang et al., 2022). Por otra parte, la utilización de coloides de plata como sustrato SERS ha permitido el análisis cualitativo de microplásticos y nanoplasticos en ambientes acuáticos. Los tamaños de partículas de microplásticos y nanoplasticos incluyen 100 nm, 500 nm y 10 μ m. Las señales Raman de MNP en agua pura y agua de mar muestran una buena eficiencia de mejora. El método de detección basado en SERS supera las limitaciones en líquidos y puede detectar plásticos de 100 nm en concentraciones de hasta 40 partes por billon, proporcionando más posibilidades para la detección rápida en ambientes acuáticos en el futuro (Lv et al., 2020). La deposición de una capa de nanopartículas de oro absorbidas por una esponja puede detectar trazas de microplásticos

en muestras de agua no tratadas con un límite de detección de 1 parte por billon para los MNP. Para las aplicaciones de muestra reales, se ha utilizado agua de nieve, agua de mar, agua de río y agua de lluvia (Yin et al., 2021). Los trabajos iniciales en esta nueva área de detección son prometedores para futuras aplicaciones en detección de MNP en fluidos biológicos, alimentos y productos para el cuidado personal.

Limitaciones y perspectivas en la detección de nanoplasticos con SERS

Los avances en la ciencia de los materiales pueden ser cruciales, ya que pueden conducir a la creación de nuevos sustratos SERS diseñados específicamente para el análisis de MNP. En este caso la detección mediante SERS presenta un desafío en la optimización del sustrato para una buena señal SERS implementando el desarrollo de estructuras que sean reproducibles y homogéneas para estandarizar un sustrato especializado en detectar MNP en diferentes muestras reales. Se sabe que las nanoestructuras que tienen bordes con forma de punta o estructuras rugosas a nivel micro y nanométrico, son más efectivas para mejorar la intensidad de campos electromagnéticos en comparación con películas delgadas metálicas, las nanopartículas esféricas o sus agregados. Por otra parte, para la detección de contaminantes en medios acuosos con SERS, es necesario recuperar los MNP mediante purificación química y física de muestras. Esto exige métodos de muestreo y recolección eficaces que puedan extraer los contaminantes externos para poder separar los MNP presentes en muestras reales. Dado que la cantidad total de microplásticos en muestras reales es muy baja en comparación con la cantidad de sólidos orgánicos, inorgánicos o naturales, se debe filtrar la máxima cantidad posible de agua mediante técnicas de pretratamiento, filtración o utilizar una base de datos de nanoplasticos para la eliminación post análisis de las bandas de impurezas mediante software.

Aunque la investigación en el campo de la detección y cuantificación de nanoplasticos

ticos basada en SERS aún se encuentra en su etapa emergente, hay todo un mundo de oportunidades disponibles. El análisis de MNP en muestras de campo reales continúa presentando un vacío metodológico importante (Mogha et al., 2023). Por lo tanto, la cuantificación de la contaminación ambiental por residuos plásticos utilizando un método bien desarrollado y validado, por ejemplo, SERS se puede combinar con otras técnicas para mejorar su sensibilidad y eficiencia, ya sea microscopía de fuerza atómica o microscopía electrónica de barrido.

El enfoque SERS para detectar MNP representa una innovación de vanguardia que debería explotarse aún más para encontrar métodos estandarizados y más efectivos para identificar moléculas de MNP. A pesar de sus capacidades prometedoras, desafíos como muestras complejas que incluyen más de un polímero y sus derivados, producción en masa, repetibilidad de sustratos activos SERS, mediciones SERS confiables y cumplimiento de las regulaciones para el escenario de pruebas a gran escala son desafíos para detecciones confiables (Vélez-Escamilla et al., 2022). Por tanto, es crucial seguir desarrollando técnicas SERS que comparen la detección ultrasensible de MNP en matrices complejas. Podría representar un avance en el estudio de estas moléculas presentes como contaminantes en el medio ambiente o incluso como agentes tóxicos en nuestro organismo. El desarrollo de sustratos SERS para identificar MNP constituye una alternativa prometedora que podría permitir una comprensión más profunda del destino final de los desechos plásticos, su impacto en nuestra salud y sus consecuencias para el medio ambiente.

Conclusiones

A medida que el desarrollo de nuevos sustratos SERS resuelva las limitaciones de reproducibilidad y costo de producción, estos dispositivos se volverán más accesibles ampliando las áreas de su aplicación. Además, la elección de las nanoestructuras plasmónicas utilizadas en el sustrato también es fundamental para obtener mejores resultados de mejora y poder detectar MNP de manera efectiva. SERS es una tecnología con gran potencial, que ofrece una excelente sensibilidad y la capacidad de identificar MNP en distintos ambientes. Se espera que SERS pueda detectar muestras de mayor importancia práctica en el campo del medio ambiente en los próximos años. Las condiciones óptimas determinadas por el tipo de sustrato SERS, la configuración experimental y los analitos determinan el nivel de detección y ayudan a mejorar el desarrollo y diseño de la tecnología SERS para aplicaciones apropiadas.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

Agradecimientos

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la Beca para estudios de Posgrado CVU no. 89o817.

- Cai, H., Xu, E. G., Du, F., Li, R., Liu, J., & Shi, H. (2021). Analysis of environmental nanoplastics: Progress and challenges. *Chemical Engineering Journal*, 410, 128208. doi: 10.1016/J.CEJ.2020.128208
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., & Urrichio, V. F. (2020). A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2020, Vol. 17, Page 1212, 17(4), 1212. doi: 10.3390/IJERPH17041212
- Chang, L., Jiang, S., Luo, J., Zhang, J., Liu, X., Lee, C. Y., & Zhang, W. (2022). Nanowell-enhanced Raman spectroscopy enables the visualization and quantification of nanoplastics in the environment. *Environmental Science: Nano*, 9(2), 542–553. doi: 10.1039/D1EN00945A
- Dey, T. (2023). Microplastic pollutant detection by Surface Enhanced Raman Spectroscopy (SERS): a mini-review. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 8(1), 41–48. doi: 10.1007/S41204-022-00223-7/FIGURES/5
- Enfrin, M., Hachemi, C., Hodgson, P. D., Jegatheesan, V., Vrouwenvelder, J., Callahan, D. L., Lee, J., & Dumée, L. F. (2021). Nano/micro plastics – Challenges on quantification and remediation: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102128. doi: 10.1016/J.JWPE.2021.102128
- Han, X. X., Rodriguez, R. S., Haynes, C. L., Ozaki, Y., & Zhao, B. (2022). Surface-enhanced Raman spectroscopy. *Nature Reviews Methods Primers* 2022 1:1, 1(1), 1–17. doi: 10.1038/s43586-021-00083-6
- Jiménez-Lamana, J., Gondikas, A., Mattsson, K., & Gigault, J. (2023). Editorial: Analytical methodologies for the analysis and monitoring of nano/microplastics pollution. *Frontiers in Environmental Chemistry*, 4, 1191236. doi: 10.3389/FENV.2023.1191236
- Lv, L., He, L., Jiang, S., Chen, J., Zhou, C., Qu, J., Lu, Y., Hong, P., Sun, S., & Li, C. (2020). In situ surface-enhanced Raman spectroscopy for detecting microplastics and nanoplastics in aquatic environments. *Science of The Total Environment*, 728, 138449. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.138449
- Mintenig, S. M., Bäuerlein, P. S., Koelmans, A. A., Dekker, S. C., & Van Wezel, A. P. (2018). Closing the gap between small and smaller: towards a framework to analyse nano- and microplastics in aqueous environmental samples. *Environmental Science: Nano*, 5(7), 1640–1649. doi: 10.1039/C8EN00186C

- Mogha, N. K., & Shin, D. (2023). Nanoplastic detection with surface enhanced Raman spectroscopy: Present and future. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 158, 116885. doi: 10.1016/J. TRAC.2022.116885
- Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O. P., Achari, G., & Slobodnik, J. (2021). Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. *Science of The Total Environment*, 757, 143872. doi: 10.1016/J. SCITOTENV.2020.143872
- Schiavi, S., Parmigiani, M., Galinetto, P., Albini, B., Taglietti, A., & Dacarro, G. (2023). Plasmonic Nanomaterials for Micro- and Nanoplastics Detection. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 9291, 13(16), 9291. doi: 10.3390/AP13169291
- Vélez-Escamilla, L. Y., & Contreras-Torres, F. F. (2022). Latest Advances and Developments to Detection of Micro- and Nanoplastics Using Surface-Enhanced Raman Spectroscopy. *Particle & Particle Systems Characterization*, 39(3), 2100217. doi: 10.1002/PPSC.202100217
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environmental Science and Technology*, 51(12), 6634–6647. doi: 10.1021/ACS.EST.7B00423/ASSET/IMAGES/LARGE/ES-2017-004235_0003.JPEG
- Yin, R., Ge, H., Chen, H., Du, J., Sun, Z., Tan, H., & Wang, S. (2021). Sensitive and rapid detection of trace microplastics concentrated through Au-nanoparticle-decorated sponge on the basis of surface-enhanced Raman spectroscopy. *Environmental Advances*, 5, 100096. doi: 10.1016/J.ENVADV.2021.100096

CONOCIMIENTO AMBIENTAL. PAPEL DE LA INCERTIDUMBRE

ENVIRONMENTAL KNOWLEDGE.
ROLE OF UNCERTAINTY

Gladys Linares Fleites

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 78 - 91

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0000-0003-0856-3994>

Fecha de recepción: 00/04/2024

Fecha de revisión recepción: 2/12/2024

fecha de publicación: 20/01/2025

Posgrado de Ciencias Ambientales

Instituto de Ciencias.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

gladys.linares@correo.buap.mx

Teléfono: fijo 2223956706; móvil 2222936614

Resumen

En la actualidad se trabaja en nuevas estrategias para la resolución de problemas, en las que se aprecia el papel de la Ciencia en un contexto más amplio que incluye la complejidad y la incertidumbre de los sistemas naturales y la relevancia de los compromisos y valores humanos. En particular, en los temas ambientales, además de que la incertidumbre se presenta en la toma de la información, para asegurar la calidad efectiva de esa información que forma parte del proceso de toma de decisiones, el manejo de la incertidumbre juega un importante rol. Este artículo tiene como objetivo mostrar, con una visión general, el papel que la incertidumbre ha jugado en el desarrollo científico de la humanidad y sus posibilidades futuras en la solución de diversos estudios ambientales.

Palabras claves: ciencias ambientales, complejidad, inferencia estadística, sistema socioambiental

Abstract

Currently, new strategies for problem-solving are being worked on, in which the role of science is appreciated in a broader context that includes the complexity and uncertainty of natural systems and the relevance of human commitments and values. In the case of environmental issues, managing uncertainty is very important to make sure that the information that is used to make decisions is of high quality. This is because uncertainty is present when the information is being gathered. This article aims to show, with a general vision, the role that uncertainty has played in the scientific development of humanity and its future possibilities in the solution of various environmental studies.

Keywords: environmental sciences, complexity, statistical inference, socio-environmental system

Introducción

Los problemas ambientales, en su mayoría, involucran algún grado de incertidumbre. La estimación de emisiones de gases efecto invernadero, el destino y transporte de los contaminantes, la exposición humana y los efectos a la salud y ecológicos son algunos de los componentes del análisis ambiental cargado frecuentemente de incertidumbre. Esta se origina por diversas razones: información incompleta, desacuerdo entre los especialistas o fuentes de información, lenguaje impreciso o por la variabilidad que resulta de los errores de muestreo o por la estructura de un modelo usado en el análisis.

Al reconocer los problemas ambientales como problemas de conocimiento sobre sistemas con fuertes interrelaciones entre sus elementos. Estos tienen que ser tratados y manejados con integralidad y vinculado a los procesos de desarrollo, la meta principal de la investigación en estos sistemas es profundizar en las bases epistemológicas tradicionales y ampliar sus posibilidades para alcanzar una cosmovisión diferente y con ello soluciones diferentes, alternativas a los problemas ambientales actuales. (Morales Jasso, 2017).

Para alcanzar el objetivo de este artículo, que consiste en exponer el papel que la incertidumbre ha jugado en el desarrollo científico de la humanidad y sus posibilidades futuras en la solución de diversos estudios ambientales, se desarrollan los siguientes epígrafes: el epígrafe 2 se refiere al surgimiento de las Ciencias Ambientales y los epígrafes 3 y 4 al estudio de la incertidumbre y su relación con el conocimiento ambiental. Finalmente, se brindan las conclusiones y las referencias.

Surgimiento de las Ciencias Ambientales

Generalmente, en los estudios de naturaleza y sociedad, estas se han asumido como polos opuestos: "lo natural" y "lo social". Sin embargo, en las últimas

décadas del siglo pasado, comienza a proponerse que naturaleza y sociedad sean comprendidas como un único ente, como un sistema complejo: el sistema socioambiental.

Para adentrarse en los problemas de incertidumbre en el sistema socioambiental es necesario precisar algunas definiciones y conceptos, que desarrollamos a continuación, comenzando siempre con la definición que brinda la Real Academia de la Lengua Española (RAE) y seleccionando algunas otras fuentes importantes.

Algunas definiciones

Medio Ambiente

Hasta antes de la década de los sesenta del siglo pasado, el uso del término "medio ambiente" era prácticamente inexistente; ahora, más de medio siglo después, se le usa cotidianamente en todo el mundo y en todos los ámbitos posibles, del académico al político y económico.

No existe una conceptualización unívoca de lo que debe entenderse por medio ambiente. En el siguiente cuadro se dan algunas que, en esencia, de una forma u otra coinciden

Conceptualización de Medio Ambiente	Fuente
Conjunto de circunstancias físicas que rodean a los seres vivos.	RAE (2001)

Conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados.	Legislación mexicana (SEMARNAT)
Conjunto de elementos físicos, químicos, biológicos y de factores sociales capaces de causar efectos directos o indirectos, a corto o largo plazo, sobre los seres vivientes y las actividades humanas.	Conferencia de Estocolmo (ONU,1972)
Sistema constituido por el hombre, la fauna y la flora; el suelo, el aire, el clima y el paisaje; las interacciones entre los factores citados, los bienes materiales y el patrimonio cultural.	Directiva Comunidad Económica Europea 85/3/377 (1985)

Las definiciones antes expuestas permiten afirmar que “medio ambiente” es un término global, de manera que abarca a todos los factores o componentes ambientales. De hecho, su definición recuerda la definición general de un sistema y como tal suele considerársele.

2.1.2 Sistema y Teoría General de Sistemas

La Teoría General de Sistemas (TGS) fue formulada por Ludwig von Bertalanffy, biólogo y filósofo austriaco, a mediados del siglo XX. (Bertalanffy, L. V., 1950).

De acuerdo con la RAE, el significado de la palabra sistema es: “Conjunto de cosas

que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto” (RAE, 2001). El contexto en el que se desarrolló la TGS también dio origen al pensamiento complejo, fundiéndose diversas corrientes del conocimiento en lo que se ha denominado los sistemas complejos.

Sistemas Complejos

No hay una definición del sustantivo “complejidad”. Lo que es posible definir es el adjetivo “complejo”. La idea de lo “complejo” no parte del mundo científico, sino que es un término empleado en el lenguaje común para señalar algo que es difícil de entender.

Entonces, ¿qué es la complejidad? Según E. Morín complejidad es “un tejido de constituyentes heterogéneos inseparablemente asociados que presentan la paradoja de lo uno y lo múltiple” (Morín, 2011). En un principio la complejidad se relacionó con fenómenos cuantitativos de gran magnitud, pero la complejidad no comprende solamente cantidades que desafían las posibilidades de cálculo, comprende también las incertidumbres, las indeterminaciones, los fenómenos aleatorios, etc. En un sentido más amplio, la complejidad siempre está relacionada con el azar (Morín et al., 2002).

2.2 Ciencias Ambientales

El medio ambiente está en un proceso de permanente cambio, lo que hace imprescindible la adaptabilidad de los seres vivos. Esta particularidad hace que la especie humana reaccione ante el medio ambiente de diferentes formas y de hecho esté expuesta a diferentes factores ambientales. Estos factores ambientales se caracterizan por diferentes elementos, tales como:

Factores bióticos: Constituido por los elementos vivos como son la flora y fauna.

Factores abióticos: Se refiere a aquella parte del medio constituido por elementos no vivos, tales como el aire, la tierra y el agua.

Factores psicosociales: Es la percepción del medio ambiente por cada individuo en particular, a través de sus condiciones

de vida (nivel, calidad de vida, cultura y desarrollo). Cada persona se forma una imagen que da lugar a conductas ante el medio ambiente.

Factores ligados a los sistemas educativos y sanitarios: Es aquel sistema constituido por las estructuras y condiciones sociales, histórico-culturales y económicas en general, de las comunidades humanas o de la población de un área determinada.

Ahora bien, aunque el concepto de medio ambiente es relativamente nuevo, el análisis y la preocupación acerca de la relación hombre-naturaleza tienen profundas raíces históricas. El desarrollo de las Ciencias Ambientales y su impacto social son el resultado del trabajo de pensadores, científicos y recientemente de activistas anónimos. Gracias a su visión y tenacidad, hoy entendemos más al medio ambiente y tenemos mayores capacidades para protegerlo.

Vázquez et al, 2014, realizaron un esbozo histórico de los estudios ambientales en el período donde se construyó una parte sustancial del cuerpo teórico de lo que actualmente se conoce como "Ciencias Ambientales". La Tabla No. 1 resume algunos aspectos de ese ensayo.

Tabla No. 1. Principales aportaciones que han erigido el campo de estudio de las Ciencias Ambientales.

Época histórica	Año	Científico	Aportación
Era antigua	377 A.C	Hipócrates	Estudio de los efectos de los alimentos, la ocupación y el clima en la salud humana.
	322 A.C.	Aristóteles	Descripción y clasificación del mundo natural.
Siglo XVIII	1758	Carl von Linné	Taxonomía que incluye a los humanos como parte del reino animal, introduciendo una idea fundamental en el pensamiento ambiental moderno.

	1769	Alexander von Humboldt	Consideración de factores ambientales (como el suelo y el clima) al estudiar el crecimiento de plantas.
	1789	Antoine Lavoisier	Propuesta de su revolucionaria Ley de Conservación de la Materia.
	1798	T. R. Malthus	Establecimiento de la presión que puede ejercer la población mundial.
Siglo XIX	1859	Charles Darwin	Publicación del libro "On the origin of species", donde se considera que el hombre es una especie más, sujeta a los cambios inducidos por los procesos de variación heredable y la selección que imprime el entorno biótico y abiótico, como lo está cualquier otro ser vivo.
	1860	Ernst Haeckel	Introducción del término "ecología" para referirse a la ciencia de las relaciones entre organismos y medio ambiente.
	1872	Robert Angus Smith	Introducción del término "lluvia ácida" y documentación de los efectos de la lluvia ácida en diversos materiales y en la vegetación.
	1864	George Perkins Marsh	Realización del primer estudio acerca de la influencia del hombre en el medio ambiente.
	1896	Svante Arrhenius	Publicación de la primera discusión acerca del papel del dióxido de carbono en el clima terrestre.

Siglo XX	1904	Ernst Friedrich	Realización de trabajos teóricos con una visión integradora del mundo y del uso de los recursos naturales.
	1928	Vladimir Vernadsky	Propuesta de la Teoría de la Biosfera.
	1935	Arthur Tansley	Introducción del término "ecosistema" para definir "el sistema completo, no sólo el formado por los organismos, sino el complejo que también incluye los factores físicos".
	1957	Roger Revelle y Hans Suess	Inicio de la investigación acerca del llamado "efecto invernadero".
	1962	Rachel Carson	Publicación del libro Primavera silenciosa (Silent Spring) dando a conocer resultados de las investigaciones relacionadas con el DDT y los reclamos de la gente preocupada por las fumigaciones aéreas y sus efectos en aves.

Cabe destacar en este desarrollo histórico el pensamiento darwinista, que al resaltar el papel del azar, rompe con la perspectiva mecanicista, según la cual los procesos biológicos podían explicarse y predecirse como los del ámbito de la Física. Su obra fundamental, *El origen de las especies*, publicada en 1859, estableció que la explicación de la diversidad que se observa en la naturaleza se debe a las modificaciones acumuladas por la evolución a lo largo de las sucesivas generaciones.

A continuación se muestra una imagen de la portada del libro de Charles Darwin de la Editorial Espasa Calpe, en 2009, de 659 páginas, conmemorando el 150 aniversario de su primera publicación. Durante su vida, el autor revisó y actualizó la información en diversas ocasiones, hasta una sexta edición que se considera definitiva y que es la que ahora puede releerse en un libro de pequeño formato.

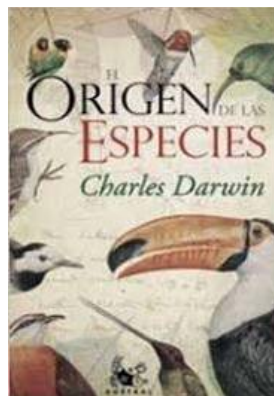


Imagen de dominio público tomada de: <https://www.elmundo.es/especiales/2009>

Una mujer altamente destacable en este desarrollo histórico es Rachel Louise Carson. Ella fue una bióloga marina y conservacionista estadounidense que, a través de la publicación de su libro *Primavera Silenciosa* en 1962 y de otros escritos, contribuyó a la puesta en marcha de la moderna conciencia ambiental. En la siguiente imagen se destaca el reconocimiento a esta científica.



Imagen de dominio público tomada de:
<https://www.comeva.com>

La Incertidumbre

Para introducirnos en aspectos de la incertidumbre (González-Torre, 2001, Loya, 2015 y Perlo 2018) que han permitido un mayor acercamiento al conocimiento ambiental, presentamos algunas conceptualizaciones sobre la misma.

Algunas definiciones

En el siguiente cuadro se dan dos conceptualizaciones muy difundidas:

Concepto de Incertidumbre	Fuente
La incertidumbre es definida como la falta de conocimiento seguro y claro de algo. Desde el punto de vista metroológico, la incertidumbre considera todas las posibles fuentes de error que intervienen en un resultado.	(RAE, 2001),

Por otra parte, se ha planteado la existencia de relación entre los conceptos de azar y de incertidumbre. Wagensberg (1998) relaciona el azar con la incertidumbre al afirmar: “invocamos el azar cuando la información o parte de ella nos es negada”. En su trabajo el autor establece las diferencias entre dos tipos de azar:

El azar epistemológico, producido por la ignorancia del observador, la aplicación de leyes insuficientes, la debilidad en la potencia de los cálculos, las observaciones erróneas, etc.

El azar ontológico, siendo este último una entidad metafísica que representa la contingencia pura que actúa ciegamente en el universo, en otras palabras, un azar propio del objeto de estudio.

De acuerdo con esto, el azar ontológico es ineludible, pero el azar epistemológico puede ser reducido sobre la base del refinamiento de los métodos establecidos para el estudio del objeto mediante la concreción de la complejidad frente a la incertidumbre. .

Fuentes de incertidumbre

En general, las incertidumbres pueden clasificarse como aleatorias o epistémicas.

La incertidumbre aleatoria está asociada con la variabilidad interna en el sistema, y, por lo tanto, no puede ser reducida realizando más experimentos o recopilando más datos. Se recomienda emplear un marco probabilístico para modelar este tipo de incertidumbre.

El segundo tipo, la incertidumbre epistémica, surge de la deficiencia en el modelo planteado, causada por el conocimiento limitado sobre los fenómenos. Contrariamente a la incertidumbre aleatoria, existe la posibilidad de reducir este tipo de incertidumbre para mejorar nuestro conocimiento sobre el sistema.

En la mayoría de las situaciones reales la incertidumbre suele ser del segundo tipo y no se puede eliminar del todo. En estos casos, la incertidumbre se puede reducir a través de estudios estadísticos, es decir, modelos probabilísticos que relacionan los resultados inciertos con otros obser-

vables.

Este tratamiento de la incertidumbre constituye una buena parte de la Ciencia Estadística.

3.2 Aspectos históricos del análisis de la incertidumbre a través de la Estadística.

Stigler, 2007 y 2017 ha resaltado las cinco ideas consecuentes de la historia de la Estadística, todas ellas utilizadas en la actualidad, para acercarnos al conocimiento ambiental. Ellas son:

idea No.1: La agregación

Idea No. 2: La información

Idea No. 3: Pruebas estadísticas y Verosimilitud

Idea No. 4: Estadísticas por intercomparación

Idea No.5: Regresión, correlación, análisis multivariado, inferencia bayesiana e inferencia causal

La Tabla 2 resume el análisis realizado por este historiador de la Ciencia Estadística, donde se destacan a renombrados científicos que han esclarecido aspectos de la incertidumbre.

Tabla No. 2. Autores que han esclarecido aspectos de la incertidumbre a través de conceptos claves

No.	Nombre	Año	Idea #	Concepto esclarecido
1	Henry Gellibrand	1635	1	Media
2	Thomas Simpson	1755	1	Media
3	Pierre S. Laplace	1780	1	Modelo Lineal
4	Karl F. Gauss	1809	1	Modelo lineal
5	Jaques I. Bernoulli	1713	2	Precisión
6	Nicholas Bernoulli	1710	2	Precisión
7	Abraham De Moivre	1730	2	Distribución binomial
8	Pierre S. Laplace	1810	2	Teorema del Limite Central
9	Daniel B. Bernoulli	1735	3	Probabilidad
10	R. A. Fisher	1922	3	Verosimilitud
11	J. Neyman	1933	3	Pruebas de Hipótesis
12	E. S. Pearson	1933	3	Pruebas de Hipótesis
13	Francis Galton	1875	4	Percentiles
14	Francis Edgeworth	1885	4	Varianza
15	W. S. Gosset	1980	4	Prueba de hipótesis t
16	R. A. Fisher	1925	4	ANOVA y diseño experimentos

17	Karl Pearson	1895	5	Correlación
18	Thomas Bayes	1764	5	Enfoque bayesiano
19	Pierre S. Laplace	1774	5	Enfoque bayesiano
20	Francis Galton	1889	5	Enfoque bayesiano
21	Francis Edgeworth	1889	5	Enfoque bayesiano
22	Karl Pearson	1890	5	Enfoque bayesiano
23	Harold Jeffreys	1930	5	Enfoque bayesiano
24	Jimmie Savage,	1950	5	Enfoque bayesiano
25	Dennis Lindley,	1950	5	Enfoque bayesiano

A continuación se resalta el teorema de Bayes como precursor de los enfoques más modernos de la Inferencia Estadística en el presente Siglo XXI, que se dirigen hacia la Inferencia Causal.

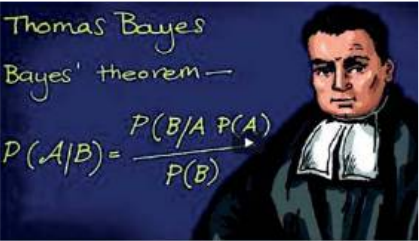


Imagen de dominio público tomado de: Servicio Educación Televisión (SET) (@Espectro789)

Si bien las rupturas entre las diferentes áreas del conocimiento han sido en ocasiones abismales y tal es el caso entre las Ciencias Naturales y Sociales, el intercambio de ideas y metáforas metodológicas se ha mantenido en ambos sentidos a lo largo del tiempo. Mansilla-Corona, 2013, ilustra ese idilio intelectual entre los cultivadores de estas áreas del conocimiento humano, desde los albores del Renacimiento hasta nuestros días.

3.2.1 Cuantificación de la incertidumbre en la actualidad

La cuantificación de la incertidumbre

(Volodina y Challenor, 2021) en los modelos informáticos es importante por varias razones. En primer lugar, el análisis de procesos físicos basado en modelos informáticos está plagado de incertidumbre, que debe abordarse para realizar una inferencia basada en un modelo "confiable", como la previsión (predicciones). En segundo lugar, informar y comunicar las incertidumbres encontradas en los modelos es crucial para mantener la credibilidad en el modelo y el grupo de modelado.

Por otra parte, la incertidumbre en la evaluación de riesgos puede originarse por distintas causas como son la falta de información, las diferencias en la evidencia, las simplificaciones o suposiciones hechas para hacer factible el análisis. Es importante distinguir entre incertidumbre y variabilidad, debido a que ambas pueden resultar en incertidumbre en los resultados de la evaluación de riesgos.

Incertidumbre y conocimiento ambiental

La importancia de la incertidumbre ante una problemática ambiental compleja con factores antagónicos fuera de nuestra comprensión y alcance, es resaltada por Leff, 2006, al plantear “el saber ambiental es afín con la incertidumbre y el desorden, con lo inédito, lo virtual y los futuros posibles; incorpora la pluralidad axiológica y la diversidad cultural en la formación del conocimiento y la transformación de la realidad”.

Si se considera el ambiente o medio ambiente como el todo resultante de las íntimas y recíprocas relaciones entre la sociedad y la naturaleza para un tiempo y espacio dado, ese devenir (sociedades/naturaleza) desde una visión totalizadora (holística) está fuertemente influenciado por los aspectos antrópicos: aspectos sociales, económicos, institucionales, legales, políticos y culturales, todo esto mediado por los conocimientos científicos y las tecnologías aplicadas (Martínez, 2014)

La probabilidad es la mejor forma de cuantificar la incertidumbre. Existen dos visiones básicas de la probabilidad: la visión frecuentista y la visión subjetivista o bayesiana. La primera define la probabilidad de ocurrencia de un evento cuya frecuencia se presenta durante una gran cantidad de pruebas similares. Esta visión ve la probabilidad como una propiedad intrínseca de un sistema, frecuentemente ilustrada con el análisis de los resultados posibles al lanzar una moneda o un dado. Cuando no hay información histórica disponible, o cuando no es posible repetir un evento muchas veces para estimar la probabilidad, se debe confiar en la opinión de los expertos (segunda visión).

Conclusiones

Las Ciencias Ambientales pueden definirse como el campo de estudio que tiene como objeto las distintas partes de la naturaleza, de las sociedades humanas y las relaciones que existen entre ellas. Surgieron en la década de 1960 como respuesta a la necesidad de comprender y solucionar los problemas ambientales evidentes ya en ese momento. La Figura 1 muestra en forma muy resumida las características de esta nueva Ciencia.

En tiempos más recientes (Galati, 2017) se ha tenido en cuenta la colaboración interdisciplinaria y transdisciplinaria entre las diferentes esferas del conocimiento humano y estos enfoques incorporan la incertidumbre en los estudios de realidades complejas que se presentan en la frontera entre las Ciencias Naturales y Sociales, donde las Ciencias Ambientales suele desarrollarse.

A partir del auge de las computadoras digitales, otras líneas de investigación se han desarrollado y entender esta relación es un requisito indispensable para la generación de un conocimiento científico más humanista a la altura de los retos que enfrenta nuestra civilización en la actualidad. Lo que permitirá un tratamiento más refinado de la incertidumbre que nos acercará más al conocimiento ambiental.



Figura 1. Características de las Ciencias Ambientales. (Elaborado por la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). Ecuador).

Conflicto de intereses

Se declara no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como otros detalles técnicos, se pueden compartir a solicitud directa con el autor.

Los datos personales facilitados por el autor a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Referencias

- Bertalanffy, L. V. (1950). An outline of general system theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, 1(2), 134–165.
- Directiva Comunidad Económica Europea 85/3/377 (1985).
Disponible en: https://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/dir1985-337-cee.html
- Galati, E. (2017). El pensamiento complejo y transdisciplinario como marcos de investigación científica. *Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales*, Relmecs, vol. 7, no. 1, e021.
- González-Torre FIG. (2001). Determinismo, caos, azar e incertidumbre. *Horizontes culturales: las fronteras de la ciencia*. ISBN 84-239-6450-7, págs. 73-83.
- Leff, E. (2006). Complejidad, racionalidad ambiental y dialogo de saberes. *Polis* 7, Septiembre. Recuperado de <http://polis.revues.org/6232>
- Loya C. (2015). La incertidumbre como herramienta de acercamiento al conocimiento ambiental. Recuperado de: <https://www.academia.edu/30779584>
- Mansilla-Corona, R. (2013) «De Galileo a Walras: el largo idilio entre las ciencias sociales y naturales.» *Interdisciplina I*, núm. 1 p: 87-110.
- Martínez, E. (2014). Análisis crítico reflexivo sobre complejidad ambiental. *ARJÉ Revista de Postgrado FACE-UC*. Vol. 8, Nº 14/ 225-232.
- Morales Jasso, G. (2017). Las Ciencias Ambientales. Una caracterización desde la epistemología sistémica. *Nova Scientia*. ISSN 2007-0705, Nº 18 Vol. 9 (1), 646 - 697
- Morín, E., Ciurana, E., & Motta, R. (2002). Educar en la era planetaria: el pensamiento complejo como método de aprendizaje en el error y la incertidumbre humana. (Unesco, Ed.) (IV Serie F., p. 100). Valladolid: Universidad de Valladolid. Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial.
- Morín, E. (2011). Introducción al pensamiento complejo. Barcelona: Gedisa. (10th ed., 167 p).
- ONU (1972). Disponible en: <https://www.un.org/es/conferences/environment/stockholm1972>
- Perlo CL. (2018). Investigar la complejidad, asumir la incertidumbre. De Prácticas y Discursos. Universidad Nacional del Nordeste, Centro de Estudios Sociales | Año 7, Número 9. Argentina. ISSN 2250-6942, págs. 253-279.

RAE (2001). Real Academia de la Lengua Española Disponible en:
<https://dle.rae.es/>

SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales:
Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat>

Stigler SM (2007). The Five Most Consequential Ideas in the History
of Statistics. Disponible en: <http://www.statoo.ch/sst07/>

Stigler SM (2017). Los siete pilares de la sabiduría estadística.
Editorial Granos de Sal, SA de CV, México. 181 p.

Vázquez-Rodríguez, GA., Lucho-Constantino, C., Coronel-Olivares,
Beltrán-Hernández RI. (2014). ESBOZO HISTÓRICO DE LAS
CIENCIAS AMBIENTALES I: DE HIPÓCRATES A LA PRIMAVERA
SILENCIOSA. PADI BOLETÍN CIENTÍFICO DE CIENCIAS BÁSICAS
E INGENIERÍA DEL ICBI, Vol 2, No 3. Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo, México. ISSN 2007-6363.

Volodina V, Challenor P. (2021). The importance of uncertainty
quantification in model reproducibility. Phil. Trans. R. Soc. A 379:
20200071. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0071>

Wagensberg, J. (1998). Ideas sobre la complejidad del mundo.
Volumen 9 de Metatemas: Libros para Pensar la Ciencia. Editor:
Tusquets. 168 p ISBN: 8472234533.

PARTICIPACIÓN DE LAS MUJERES EN LA CONQUISTA DE MÉXICO A PARTIR DE LA TEORIA DE LA SUBALTERNIDAD

PARTICIPATION OF WOMEN IN THE CONQUEST OF MEXICO FROM
THE THEORY OF SUBALTERNITY

Alessa Pech Matamoros

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 92 -108

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0000-0003-0182-1954>

Fecha de recepción: 00/00/2024

Fecha de revisión: 2/12/2024

Fecha de publicación: 20/01/2025

Complejo Regional Sur – BUAP

alessa.pech@correo.buap.mx

tel: 238 2060004

La teoría de la subalternidad ha tenido un impacto importante en los estudios de las sociedades poscoloniales a nivel mundial, así como en los estudios latinoamericanos y en los estudios feministas contemporáneos. Por lo que, consideramos fundamental conocer la propuesta teórica de subalternidad y analizar su aplicación a los estudios de mujeres. El presente artículo tiene dos grandes objetivos: El primero es comprender en qué consiste la teoría de subalternidad, así como sus aportes y limitaciones para los estudios de las mujeres; para lograr este objetivo se revisarán las contribuciones de Antonio Gramsci, Gayatri Spivak, Dipesh Chakrabarty, Mary Nash, Almudena Escribá Maroto, Krisna Tolentino, Yesenia Alegre Valencia, Georgina Rosado Rosado, entre otras investigadoras, que permitirán profundizar en la propuesta y tener una visión amplia de ella. El segundo objetivo es analizar -a la luz de la teoría de la subalternidad- la participación de las mujeres durante la conquista de México: Visibilizándolas como agentes activos, que no pueden reducirse a un sujeto homogéneo pasivo, para ello se retomarán los aportes de Blanca López de Mariscal, Miguel López Portilla, Krisna Tolentino y Almudena Escribá Maroto, que permitirán visibilizar las resistencias y luchas de las mujeres indígenas frente a la conquista de México.

Palabras clave: Teoría de la subalternidad, subalternidad de las mujeres, género, conquista de México.

Abstract

The theory of subalternity has had an important impact on studies of postcolonial societies worldwide, on Latin American studies, and on contemporary feminist studies as well. Therefore, it is essential to comprehend the theoretical proposal of subalternity and to analyze its application to women's studies. This article holds two main objectives. The first objective is to comprehend the components of the theory of subalternity, along with its potential benefits and drawbacks for women's studies. In order to achieve this objective, the contributions of Antonio Gramsci, Gayatri Spivak, Dipesh Chakrabarty, Mary Nash, Almudena Escribá Maroto, Krisna Tolentino, Yesenia Alegre Valencia, Georgina Rosado will be analyzed. This means carrying out a deeper reflection on the proposal and obtaining a broad vision of it. Second, to look at women's role in the conquest of Mexico through the lens of the subalternity theory, seeing them as visible active agents who can't be reduced to a single passive subject. So, the contributions of Krisna Tolentino, Almudena Escribá Maroto and mainly from Blanca López de Mariscal will be highly discussed. Thus, the resistance and struggles of indigenous women are visible in the face of the conquest of Mexico.

Keywords: Theory of subalternity, subalternity of women, gender, conquest of Mexico.

Introducción

La teoría de la subalternidad -inicialmente propuesta para el estudio de la Historia moderna de la India- ha tenido un impacto importante en los estudios de las sociedades poscoloniales a nivel mundial, así como en los estudios latinoamericanos y en los estudios feministas contemporáneos, desde diversas áreas de conocimiento de las Ciencias Sociales.

Una de las teóricas que más influencia ha logrado es Gayatri Spivak, quien ha propuesto la teoría de la subalternidad para los estudios de mujeres en realidades diferentes a la occidental, precisamente desde otras miradas, logrando un gran impacto en las investigaciones actuales. Por lo que hemos considerado importante conocer la propuesta teórica de subalternidad y analizar su aplicación a los estudios feministas; en este sentido, el presente artículo tiene dos objetivos:

El primer objetivo es comprender la teoría de la subalternidad, planteando para ello tres aspectos: la comprensión de la propuesta en cuestión, el reconocimiento de sus aportes y la crítica a sus limitaciones. Para lograr este objetivo se revisarán las contribuciones de Antonio Gramsci, Gayatri Spivak, Mary Nash, Yesenia Alegre Valencia, Georgina Rosado Rosado, entre otras investigadoras, que permitirán tener una visión más amplia de cómo se ha teorizado sobre la subalternidad, así como incorporar no solo la propuesta del Grupo de Estudios Subalternos (GES), sino también del Grupo Latinoamericano de Estudios Subalternos (GLES).

El segundo objetivo es analizar -a la luz de la teoría de la subalternidad- la participación de las mujeres durante la conquista de México, visibilizándolas como agentes activos, que no pueden reducirse a un sujeto homogéneo pasivo. Retomando los aportes de Miguel López Portilla, Krisna Tolentino y Almudena Escribá Maroto y Blanca López de Mariscal, quien realiza una investigación sumamente interesante sobre la figura femenina durante la conquista, en la que, a partir de lo que diferentes narradores escribieron sobre ellas, Blanca López develará las distintas formas de participación y acción

que tuvieron las mujeres en esta etapa histórica. La reflexión girará en torno a las siguientes interrogantes: ¿Quiénes son subalternos? ¿Cómo se da el proceso de subalternización? Y ¿los grupos subalternos pueden transformar la realidad?

1.- La teoría de la subalternidad

La noción de subalternidad se atribuye al marxista italiano Antonio Gramsci, quien estudió las formas de dominación en la sociedad moderna capitalista, concretamente de Italia, ocupándose de la relación entre la clase dominante y la clase obrera/campesina, a la que le atribuiría el concepto de subalterno. En sus disertaciones Gramsci hizo alusión a los grupos sociales subalternos como aquellos grupos oprimidos, que no se encuentran unificados y están sujetos a la dominación y explotación de los grupos dirigentes, estos si unificados en cada nación, a pesar de las oposiciones y enfrentamientos contra ellos. «Los grupos subalternos sufren siempre la iniciativa de los grupos dominantes, incluso cuando se revelan y se levantan» (Gramsci, 2011: 93).

Otro concepto de especial importancia en el pensamiento de Gramsci es el de «hegemonía»; para el filósofo, la clase dominante logra la hegemonía no solo a través de la coacción, sino a través de una profunda lucha ideológica, utilizando la escuela, la religión y los medios de comunicación para imponer su visión del mundo a las clases dominadas. Para Gramsci no hay disputa que no sea cultural. Pero, cabe acotar que en las disertaciones de Gramsci la escuela puede tomar dos papeles: reproducir la ideología de la clase dominante o bien construir o ayudar a construir la ideología de los sectores emergentes.

En este sentido, tanto Bernardo García Martínez (2004) como Juan Brom (2020) resaltan el importante papel que tuvieron las órdenes religiosas durante el proceso de conquista para lograr el sometimiento de los pueblos indígenas y el dominio español; la llegada de los frailes (fran-

ciscanos, dominicos y agustinos), a partir de 1524 con el objetivo de evangelizar a la población, resultaría sustancial para la justificación de la irrupción de los españoles y el establecimiento de una nueva moral. «Los religiosos gozaban de gran prestigio y eran de importancia capital para la justificación ideológica de la conquista, pues en el contexto del pensamiento cristiano ésta sólo era aceptable si aducía como fin último la conversión de los paganos» (García, 2004: 66).

Gramsci piensa en la revolución como la vía para cambiar la realidad social, en la que el sujeto revolucionario es un sujeto colectivo: la clase trabajadora o proletariado, pero insiste en que la reforma tiene que ser intelectual y moral. El pensamiento de Gramsci va a tener una continuidad en muchos movimientos sociales actuales que luchan para transformar la realidad.

Tanto el término «subalterno», como el concepto de «hegemonía» propuestos por Gramsci, fueron retomados por el Grupo de Estudios Subalternos (GES). Éste desde una perspectiva postcolonial ha cuestionado la relación del orientalismo y el eurocentrismo en la construcción del conocimiento sobre la Historia moderna de la India, donde los subalternos son los sujetos, colectivos y pueblos que han sido dominados y subordinados a partir de los procesos de conquista y expansionismo occidental; pero que, en tanto son las clases dominantes las que producen los documentos oficiales, han quedado invisibilizados o suprimidos en la historiografía.

Posteriormente, los planteamientos del GES van a tener eco en el estudio de las sociedades poscoloniales a nivel mundial, así como en diversas disciplinas de las Ciencias Sociales. Una de sus teorías contemporáneas que más influencia ha tenido es Gayatri Spivak, quién realiza una fuerte crítica al pensamiento occidental. Ya que se plantea como una visión absoluta de la realidad, desplazando a los grupos que concibe como «otros», desplazando a los subalternos, negándolos en el discurso, invisibilizado su papel en la Historia y la sociedad, pero también manteniéndolos oprimidos mediante una serie de mecanismos que les impiden to-

mar la voz y modificar su propia realidad, según la autora.

Spivak cuestiona incluso al propio GES en tanto no coincide con una idea: «la de hacer del subalterno el constructor de su propio destino» (Chakrabarty, s/f: 20). Spivak defiende que el subalterno debe tener su propia voz y nadie lo puede representar, pero debate sobre que el subalterno pueda convertirse en un agente capaz de modificar las relaciones de dominación.

Pareciera entonces que Spivak ve al subalterno como un sujeto que no puede transformar su realidad, lo que es bastante discutible en tanto tenemos muchas muestras de movimientos sociales en el mundo, en las que los subalternos se han configurado en un sujeto colectivo; que no solo irrumpe con el movimiento para tomar la voz, sino que logra cambios de diversos tipos (políticos, laborales, legales, etc.).

En este sentido, no podemos hacer generalizaciones sobre los movimientos sociales, pues cada uno se configura de diferente manera de acuerdo con el contexto sociopolítico, económico y por supuesto cultural en el que se inscriben; pero si podemos detenernos en el análisis de un suceso preciso que permita reflexionar sobre la teoría de subalternidad y las interrogantes que hemos planteado. En este caso, como ya lo habíamos anunciado, retomaremos la conquista de México y en concreto la participación de las mujeres en este proceso histórico.

1.1. Los Estudios Latinoamericanos de Subalternidad

El trabajo del GES ha tenido un fuerte impacto en el pensamiento latinoamericano, y dio lugar a la conformación del Grupo Latinoamericano de Estudios Subalternos, en el que se han planteado repensar la realidad de nuestra región, que sufrió los estragos de la conquista y el expansionismo europeo. La conquista fue un proceso sumamente violento, que implicó el sometimiento y explotación

de la población y los recursos de los territorios en disputa. Los nativos fueron descritos como seres inferiores, salvajes, carentes de razón, y vistos como «los otros», como los subalternos, además de que en las narraciones de lo acontecido quedaron silenciados o invisibilizados, en tanto fueron los conquistadores quienes se arrogaron la palabra y construyeron un discurso hegemónico. A decir de Alegre:

La subalternidad no se relaciona simplemente con la dominación política y económica que una elite dominante ejerce sobre diferentes grupos o clases oprimidas, sino sobre todo con formas de representación y conocimiento que la elite produce como discurso oficial acerca de estos grupos, privándolos de lenguaje propio y representación autónoma. Se refiere a la negación que hace la elite dominante de un otro cultural y políticamente diferente a ella, y que la razón ilustrada occidental está imposibilitada de representar sin reproducir la subalternidad, en el marco de la persistente colonialidad del poder y el saber impuesto por la elite a nivel global (Alegre, 2012: 1).

Krisna Tolentino describe el proceso de subalternización como un conjunto de estrategias tanto discursivas como no discursivas que interpelan la subjetividad de los sujetos excluidos o vulnerables, bajo el discurso-práctica hegemónica. «La interpelación podrá venir de una posición discursiva, una narrativa teórica, una ideología, una episteme específica, etcétera, lo central no será el autor de la interpelación, sino el lugar que permite que esa interpelación sea posible» (2020: 62). Otro de los efectos que produciría las formas de representación ideológica de los colonizadores, fue la exclusión por el color de piel, al considerar al «hombre blanco» como lo «normal», según Tolentino.

La conquista de México reprodujo nuevas formas de dominación en el territorio Mesoamericano, los españoles se arrogaron el derecho a decidir sobre la población originaria, y son bien conocidas las atrocidades que cometieron en contra de los pueblos indígenas; pero ellos se atribuyeron el derecho de contar lo acontecido, erigiéndose como «salvadores»,

«civilizadores», y deshumanizando a los nativos.

Las mujeres fueron colocadas en un estrato inferior; a excepción de algunos casos rimbombantes que se utilizan para reforzar ideas negativas -como el de la Malintzi, que es señalada como traidora de su pueblo-. Las mujeres quedaron invisibilizadas en la historiografía, reducidas en un arquetipo de mujeres sumisas, violadas y sin capacidad de voz o acción; por lo que es necesario indagar sobre su participación en la conquista y analizar su papel con mayor profundidad.

1.2.- La subalternidad de las mujeres

Gramsci también abordó la opresión de las mujeres, consideraba que era necesaria una «nueva ética sexual» (Puiggrós, 1986, 259 citado en Escribá, 2015: 64), que implicaba una independencia real de las mujeres frente al hombre y un nuevo modo de concebirse a sí mismas -recordemos que las implicaciones culturales eran centrales en el pensamiento de Gramsci-. Pero es Gayatri Spivak quien se va a ocupar de profundizar en la subalternidad femenina, y desde una perspectiva interseccional va a hacer visible la doble opresión que viven las mujeres en los países invadidos, por ser sujetos coloniales y por ser mujeres en estructuras patriarcales:

Entre patriarcado e imperialismo, constitución del sujeto y formación del objeto, desaparece la figura de la mujer, no dentro de una nada prístina, sino dentro de un violento ir y venir que es la figuración desplazada de la “mujer del tercer mundo” atrapada entre la tradición y la modernización (Spivak, 2003: 358).

Aquí llama la atención que Spivak hace referencia a «la mujer del tercer mundo», como si pudiéramos hacer una generalización de todas las mujeres que cohabitan los territorios denominados como «tercer mundo»; lo que es imposible, no solo por los contrastes económicos, sociales, políticos y culturales que pueden existir entre los diversos países englobados

A decir de López, en las Cartas de relación Cortés procuraba no dar gran relevancia al papel protagonista de Malintzi «como si temiera que [...] doña Marina fuese a destacar más de lo conveniente frente a los ojos del monarca [...]. La menciona sólo ocasionalmente y se refiere a ella como “la lengua”» (López, 1997: 68).

en esa categoría, sino por las propias diferencias que existen entre las mujeres que provienen de ellos. Y, como veremos más adelante, las mujeres no tuvieron una única forma de acción frente a la dominación española, por el contrario, tuvieron comportamientos diversos que distan de una sumisión y más bien son muestra de la resistencia y la lucha contra la opresión.

Vale la pena recordar lo que la misma Spivak había señalado en un escrito anterior: «Las descripciones teóricas no pueden producir universales. Tan sólo pueden producir generalizaciones provisionales, en la misma medida en que el teórico se da cuenta de la importancia decisiva de su reiterada producción» (Spivak, 1985: 260). Así como lo señalado en el documento a debate: «[...] el sujeto colonizado subalterno es irremediablemente heterogéneo» (Spivak, 2003: 322). Por lo que podemos ver que Spivak se contradice al tratar a las mujeres del «tercer mundo» como si fuera un sujeto homogéneo.

Volviendo a la discusión de la subalternidad de las mujeres como sujetos colonizados, es necesario señalar que el grupo dominante puso en tela de juicio la humanidad de los indígenas, a fin de justificar la dominación de unos «considerados superiores», sobre otros «descritos como inferiores» y las mujeres no escaparon a ello, pero, además, el género las oprimió doblemente.

[...] los europeos recién llegados a este continente, se enfrascaron en la discusión sobre la humanidad de los nativos, que de acuerdo a los defensores de su “libre explotación y dominio” como Juan Ginés de Sepúlveda, eran naturalmente inferiores. Aplicada esta lógica por los colonizadores, los pueblos originarios pasaron a ser supuestamente étnicamente inferiores, pero dentro de la cultura occidental las mujeres nativas lo eran doblemente, por su género y por su etnia. Por lo tanto en América junto a la misoginia y el androcentrismo de los colonizadores se impusieron las concepciones etnocéntricas y racistas [...] (Rosado, 2018: 175-176).

Aunque no hay consenso sobre si las sociedades mesoamericanas tuvieron relaciones de género en condiciones igualitarias, por ejemplo, López señala:

«Existe en el mundo mesoamericano una interesante valoración de la mujer y de los papeles que ésta cumple en la sociedad, un sentido de igualdad emanado de la cosmovisión del mundo indígena» (1997: 109); Ramírez difiere y puntualiza la existencia de una idea de complementariedad entre hombres y mujeres. «Si bien, en el México prehispánico las mujeres no solían tener un trato igualitario, existe registro sobre sus actividades en términos de rol de género, así como un papel complementario en una cosmogonía dual» (2022: 111). Lo cierto es que los colonizadores españoles si actuaron conforme a la ideología patriarcal, la misoginia va a ser visible en las formas de relacionarse con las mujeres indígenas a su llegada y con las propias mujeres españolas traídas posteriormente al territorio de la denominada Nueva España.

Por su puesto que la ideología impuesta desde occidente va a tener un impacto en la construcción del conocimiento, e incluso en las propias luchas emancipatorias, tales como el movimiento feminista. Graciela Hernández señala que:

El colonialismo y la colonialidad con todas sus consecuencias, produjo también una episteme colonizada que de alguna manera aún atraviesa al feminismo, ya que con mucha frecuencia se lo sigue pensando como una práctica política de las mujeres blancas y de clase media, es así como las prácticas surgidas desde la subalternidad cuesta más oír las, aunque los/las subalternas/os hablen (Hernández, 2013: 102).

Cuando Hernández señala que «cuesta más oír las», precisamente hace referencia a la posibilidad de enunciación que tienen los grupos subalternos, pues, aunque hablan, sus voces parecen no ser escuchadas, es por eso por lo que Spivak se preguntó: ¿Puede hablar el subalterno? Encrucijada en la que también se encuentran las mujeres, pero que, debido a esta doble opresión, enfrentan mayores dificultades para ser escuchadas.

La «metáfora-concepto mujer» planteada por Spivak permite entender cómo se ha construido la subalternidad de las mujeres y cómo permanece en el sistema de símbolos; para explicarla pone como

² Esto ha sido bastante cuestionado actualmente, en tanto que se considera que la creencia de que los mesoamericanos pensaron que los españoles eran dioses y que identificaron a Hernán Cortés con Quetzalcóatl fue un mito creado por él mismo; así también se ha interpretado que el recibimiento que le dieron obedece a conductas de hospitalidad a los recién llegados, de los que desconocían sus objetivos.

ejemplo «la dote», que debe otorgar la familia de la futura esposa al novio, y que en caso de «devolver» a la hija también deberá ser restituida, lo que se considera vergonzoso para la familia de la mujer [costumbre aún arraigada en algunas regiones de México], donde Spivak subraya la: «instrumentalidad de la mujer como objeto de intercambio simbólico» (Spivak, 1985: 273).

Así pues, según Spivak (1985) la instrumentalidad de la mujer adopta dos amplias áreas: las nociones de territorialidad y el modo comunal de poder, en el sentido de que el cuerpo de la mujer es tomado como objeto de apropiación y dominación, como un territorio que se ha ganado; y dentro de la propia comunidad a la que pertenece, como algo de lo que se posee el dominio, pero que además se puede intercambiar, para que alguien más continúe con la relación de dominación y opresión sobre ella. Al respeto, López evoca el recibimiento que tuvo Cortés a su llegada al Nuevo Mundo, ataviado de regalos, entre los que se encontraban algunas doncellas, ofrendadas con el objetivo de formar un nuevo linaje, según lo relatado por Bernal Díaz del Castillo:

Y dijeron a Cortés, pues éramos ya sus amigos, que nos quieren tener por hermanos, que será bien que tomásemos de sus hijas y parientas para hacer generación; y para que más hijas sean las amistades trajeron ocho indias, todas hijas de caciques (1939: 129 citado en López, 1997: 51).

Para Blanca López, el acto de regalar doncellas a Cortés en la región del altiplano central de México obedece a que creían que los recién llegados eran dioses, por lo que la unión con las hijas de los principales daría lugar a una raza superior, y enuncia: «Este acto en el mundo mesoamericano responde a su particular cosmovisión, y no puede juzgarse a partir de una escala de valores occidental» (1997: 51). Mientras que, por el contrario, en la zona maya – que no existía el mito de que Quetzalcóatl volvería por el oriente– los españoles no fueron considerados como dioses y por tanto no se les recibieron con grandes halagos, por lo que optaron por apropiarse de las mujeres cual objeto a su servicio «En la zona maya, en cambio, como la mujer no es objeto de

donación, la única salida que les queda a los españoles es tomarlas prisioneras» (López, 1997: 82).

Algo que parece tan sutil como el «rumor», ya ha sido abordado por Spivak (1985) como uno de los mecanismos para subalternizar, en tanto que, los que tienen la posibilidad de enunciación, usan el rumor para transmitir ideas negativas de los grupos oprimidos y perpetuar su dominación. Tolentino (2020) discute el impacto que tiene el rumor en la subalternidad de las mujeres: «la deslegitimación aparece como el mecanismo capaz de debilitar su lugar de enunciación a partir del cuestionamiento de la capacidad y ética femenina» (65). Y agrega:

Si tomamos en cuenta la reputación como el lugar desde el cual históricamente la mujer ha sido interpelada desde las trayectorias coloniales: La puta, la chinganera, la mala madre; no es casualidad que se apele nuevamente a este lugar como estrategia para fragilizar su posición de enunciación en términos de género (2020: 65).

Las mujeres no solo «deben cumplir con sus roles y actividades», sino que también deben cuidar su «reputación» para no ser excluida de los grupos sociales a los que pertenecen. «La interpelación tiene aún más efecto de exclusión, una vez que el rumor circula en pleno sin la posibilidad de desmentir su falsedad o clarificar su contenido» (Tolentino, 2020: 65).

El colonizador tomó a la mujer indígena, del mismo modo que más tarde el patrón lo hizo con la esposa del inquilino, el Mr. con la mujer del minero y el burgués con la mujer del obrero. El color lleva consigo lo indígena, el sin padre; en todas ellas el color (piel o ideológico) pareciera hablar del abuso, la vergüenza, y en la protección de la reputación, el abuso debía ser escondido, aun cuando el mismo color de la piel lo delatara (Tolentino, 2020: 66).

Los conquistadores no solo irrumpieron en los territorios en disputa y se apropiaron de todo cuanto pudieron a través de la violencia real y simbólica. Los cuerpos de las mujeres también fueron vistos como objetos de los que podían

³ Según el Diccionario del Español de México el rumor se refiere a: Noticia que circula de boca en boca, pero que no tiene confirmación.

tomar cuanto quisieran; el mestizaje va a ser el resultado de las violaciones y atrocidades que los europeos cometieron en contra de las mujeres. «La violación en grupo perpetrada por los conquistadores es una celebración metonímica de la adquisición territorial» (Spivak, 2003: 353). Miguel López Portilla rescata como efectivamente después de la apropiación del territorio vino la apropiación de los cuerpos de las mujeres:

Cómo después de haber conquistado y de haber robado comenzaron a quitar las mujeres y doncellas y desvirgar por fuerza y, no queriendo, le mataban a quitas a perros y castigaba sin temor de Dios ni de la justicia. No había justicia (2020: 382).

Blanca López cuestiona la postura planteada por autores como Octavio Paz, en las que la mujer es vista como un sujeto pasivo homogéneo, que no ofrece resistencia a la violencia y se convierte en la violada, en la chingada. Para Paz: «Si la Chingada es una representación de la madre violada, no me parece forzado asociarla a la Conquista, que fue también una violación, no solamente en el sentido histórico, sino en la carne misma de las indias» (Paz, 1984: 78 citado en López, 1997: 22); mientras que para López las mujeres (en plural) representan una diversidad en su acción, en tanto sujetos activos, que también se revelan, oponen resistencia, alzan la voz, etc.

[...] no es extraño encontrar que, entre un gran número de mexicanos de nuestro tiempo, se percibe a la mujer de las tierras americanas como un objeto, artículo de regalo en manos de indígenas y conquistadores. En términos generales, existe la idea de que todas las mujeres indígenas que participaron en el proceso de la conquista y la dominación novohispana fueron seres sobre los cuales el hombre tuvo derecho de uso y abuso que aceptaron pasivamente su condición de inferioridad y que se dejaron manipular por los verdaderos protagonistas del drama americano: los varones. Es un lugar común en el pensamiento colectivo de los mexicanos y las mexicanas de hoy, concebir a la mujer como el ser sumiso y pasivo que Octavio Paz ha incluido entre los arquetipos que describe en su Labyrintho de la soledad (López, 1997: 21-22).

Pero, como veremos más adelante, la participación de las mujeres durante la conquista no puede ser reducida a única forma de acción homogénea. Las indígenas mesoamericanas llevaron a cabo diversas acciones de lucha y resistencia contra los opresores. Para Escribá (2015) además de la subalternidad por etnia y género, la subalternidad por clase va a atravesar las relaciones de poder y dominación entre los grupos oprimidos y los grupos hegemónicos, lo que puede dar lugar a una doble o triple subalternidad de las mujeres:

En Latinoamérica, la subordinación de clase guarda una íntima relación con la etnia; las experiencias de clase, etnia y género acaban estando indisolublemente ligadas, interconectadas y retroalimentándose las unas a las otras, a pesar de que no deben analizarse como simples analogías, sino como ejes que se cruzan y se fortalecen (2015: 71).

Así, por ejemplo, Blanca López constató que en los relatos sobre la Conquista son notorias las formas diferenciadas en las que los cronistas se refieren a las mujeres, dependiendo de si son indígenas o españolas. Cuestión que no debe pasar inadvertida, en tanto que esto influirá en el conocimiento de las mujeres a las que se haga referencia, o en la invisibilización o nulificación de las que apenas se mencionan:

Cuando se habla de la mujer indígena, el referente suelen ser personajes anónimos, representantes de algún grupo o de los habitantes de algún pueblo. Sólo por excepción nos enteramos de su nombre y de sus circunstancias familiares, y eso en el caso de ser sobrina o hija de alguno de los señores o los principales indígenas. Cuando los cronistas nos hablan de las mujeres españolas, por el contrario, estamos frente a personas que por lo general tienen nombre y apellido y, en caso de que el cronista lo hubiese olvidado, se disculpa por la omisión y se refiere a ella por el apodo o por el nombre del marido; en muchos de los casos nos da información aun del lugar de procedencia (López, 1997: 131).

Si bien, no podemos generalizar que todas las mujeres enfrentan las mismas

condiciones de opresión. Ni aceptar la idea de «una mujer de tercer mundo», en tanto que los diferentes contextos tanto de las regiones en las que se encuentra cada mujer, como sus propias condiciones de vida en términos de clase, etnia, familiares, educativos, laborales, etc., van a generar distintas relaciones de poder o dominación de las mujeres; si podemos afirmar que la categoría mujer se encuentra subalternizada. Las mujeres podrán liberarse de la opresión económica si son adineradas, o de la opresión racial si pertenecen a grupos considerados hegemónicos; pero no se libran del constructo de lo que «debe ser una mujer» y de lo que Spivak llama la: «metáfora-concepto mujer», así como de la violencia.

Volviendo al caso de las mujeres españolas, tenemos por ejemplo que: «A lo largo de la lectura de las crónicas, nos enteramos con sorpresa que otro buen número de mujeres españolas mueren a manos de sus propios maridos. Juan Pérez mató a su mujer, dice Bernal Díaz, y aparentemente sin recibir por esto ningún castigo» (López, 1997: 140). Es decir, si bien estas mujeres gozan de una mejor condición que las indígenas durante la conquista, su vida también estaba atravesada por la violencia ejercida por los varones españoles, es decir, también son subalternizadas por cuestiones de género.

2.- La heterogénea participación de las mujeres durante la conquista de México

En los apartados anteriores se ha discutido la visión homogénea que se tiene de las mujeres durante la conquista de México; centrada en el papel de víctimas sumisas, que no tuvieron otras alternativas frente a la violencia y opresión de los españoles. Esto no es de extrañar, en tanto que a las mujeres se les ha invisibilizado en la historiografía, son los conquistadores los que se arrogaron el derecho de contar lo acontecido y durante mucho tiempo sus

relatos fueron tomados como la «única y verdadera historia».

Si los indígenas en general pasan a un plano secundario en la focalización de los narradores testigos de la conquista, las mujeres indias se convierten en actores de tercera magnitud. Aquellas que en los primeros capítulos de las crónicas se habían presentado como indispensables para arrancarle sus secretos a la tierra, una vez que ésta ha sido dominada, dejan de formar parte de la narración, se diluyen. A los ojos del narrador hispano, la mujer del Nuevo Mundo, una vez que éste ha sido conquistado, se pierde en el horizonte (López, 1997: 157).

Por lo que a continuación rescataremos la heterogénea participación de las mujeres durante la conquista de México, retomando principalmente los aportes de Blanca López Mariscal, en los que visibiliza los diferentes matices y contrastes, que abordaremos en 4 ejes: Mujeres entregadas en donación; Mujeres que defendieron su integridad sexual; Mujeres que evitaron la procreación; y Mujeres que participaron en la guerra. Y aunque estos ejes no necesariamente son exclusivos, si permiten hacer visible que la participación de las mujeres no puede reducirse a una visión homogénea en la que se le asigna un papel pasivo de sumisión.

2.1.- Mujeres entregadas en donación

Ya se abordaron los conocidos actos de la entrega de doncellas a los españoles como forma de halago u hospitalidad, pero es necesario precisar que no en todos los casos las mujeres fueron obsequiadas para «hacer generación»; también hubo otras mujeres otorgadas como sirvientes: «para que les guisasen de comer y hiciesen pan de maíz, que es lo más trabajado de hacer, y que sin mujeres no se puede amasar sino mal y con gran dificultad» (Las Casas, 1877: 411 citado en López, 1997: 56). Esto no debe pasar desapercibido, no solo porque es una muestra de lo que se considera como «propio de las mujeres». Si no que tam-

bién debemos detenernos a reflexionar sobre la importancia que guardan estas actividades cotidianas, generalmente desvaloradas socialmente, como la preparación de alimentos, pero que son el elemento vital de cualquier proceso histórico, ninguna conquista hubiera sido posible si los comisionados no hubieran estado bien alimentados.

Finalmente, se precisa que dentro de los grupos de personas que se obsesaron a los españoles también había varones, solo que sus funciones eran claramente diferentes, en las que podemos observar nuevamente como la construcción de género está presente: «Los hombres, en la mayoría de los casos, son regalados para hacer el oficio de tamemes o cargadores, y en otros son destinados a la guerra» (López, 1997: 56).

Mientras que bajo la construcción de género a las mujeres se les define como débiles, maternas y propias para el hogar, a los hombres se les atribuye la fuerza física, por lo que el caso de los tamemes reproduce esta idea que bifurca a la sociedad y se les asigna un rol de acuerdo con ello.

2.2.- Mujeres que defienden su integridad sexual

Otro suceso conocido sobre las mujeres en la conquista es la violencia sexual que vivieron en manos de los conquistadores, pero es importante resaltar que tampoco coincidimos con Octavio Paz (1984) cuando enuncia: «su pasividad es abyecta: no ofrece resistencia a la violencia, es un montón inerte de sangre, huesos y polvo» (1894: 78 citado en López, 1997: 22), en tanto que tenemos muestras de la defensa que las mujeres hicieron de su integridad sexual:

Ésta prometió a su marido ... no conocer a otro hombre si no [era] él y así no bastó persuasión con ella para que no se quitase la vida por no quedar en peligro de ser ensuciada por otro varón, por lo cual la hicieron apear (Landa, 1983: 65 citado en López, 1997: 106).

Además, existen otros escenarios descritos por los cronistas de la conquista, en los que las mujeres buscaron estrategias para librarse de la violencia sexual, haciendo uso de su fuerza física, defendiendo a otras mujeres, etc. es decir que no fueron sujetos pasivos como se les quiere ver:

Las Casas narra un episodio en el que una madre, por defender a su hija que había sido "tomada por la fuerza para pecar con ella", es mutilada, "mancada por un mal cristiano", el cual a la doncella "matóla a puñaladas" porque no quiso consentir (Tratados, 1965: 99 citado en López, 1997: 107).

Otros actos de resistencia de las mujeres mesoamericanas era modificar su aspecto con los recursos con que disponían, para evitar ser objeto de ataques sexuales, tales como usar harapos sucios y ponerse lodo en la cara; no sabemos en cuántas ocasiones esto dio un resultado positivo para ellas, pero sin duda son formas de resistencia. Miguel López Portilla rescató:

Y también se apoderan, escogen entre las mujeres, las blancas, las de piel trigueña, las de trigueño cuerpo. Y algunas mujeres a la hora del saqueo, se untaron de lodo la cara y se pusieron como ropa andrajos. Hilachas por faldellín, hilachas como camisa. Todo era harapos lo que se vistieron (2020: 145).

Si bien, no todas las mujeres lograron librarse de la violencia sexual, no podemos aceptar que quedaron inertes ante los españoles. A pesar de la subalternidad en las que se les colocó, las mujeres lucharon de diferentes maneras por defender su integridad sexual o la de sus congéneres.

2.3. Mujeres que evitaron la procreación

Las mujeres se ven impelidas a seguir los mandatos de comportamiento vigentes en torno al género en las sociedades en que se encuentran. Otro constructo que se ha utilizado para mantener la subalternidad femenina es la idea de que

las mujeres poseen el instinto materno, con características como la ternura, la dedicación y la capacidad de cuidar a otros. Empero, para Mary Nash las mujeres tienen una capacidad subversiva y transformadora y es necesario dejar de ver a las mujeres como víctimas y resaltar sus acciones contra la subalternidad. Blanca López relata:

Es común encontrar en los textos de Landa, de Motolinía y de fray Bartolomé de las Casas a madres [...] que prefieren terminar con las vidas de sus hijos antes de enfrentarlos al hambre y a la esclavitud, antes de entregarlos en manos de los conquistadores (López, 1997: 124).

Otra de las expresiones de resistencia durante la conquista relatada por Zorita (1963) es la decisión de los indígenas de la región mixe-chontal de no procrear más, a fin de evitar a su descendencia el mismo sufrimiento que vivían en carne propia, no se aceptó la procreación como un mandato que debía seguirse indiscutiblemente, sin pensar en el futuro, por el contrario, se cuestionó y actuó contra ello:

que se habían concertado todos los indios de no tener acceso a sus mujeres ni con otras, o buscar medios para impedir la generación, o para que malpariesen las que se hiciesen preñadas; y como lo supieron él y los demás religiosos, habían trabajado mucho para darles a entender su error y la ofensa que hacían a Nuestro Señor, y que respondían que no querían tener hijos porque no viniesen a pasar los trabajos que ellos pasaban (1963: 165 citado en López, 1997: 125).

Así como la idea de que las mujeres poseen el instinto materno ha jugado a favor de su subalternización (relegándolas al espacio privado, dificultando la conciliación con otras esferas sociopolíticas, etc.), las mujeres han encontrado formas subversivas de transformar su papel como madres en defensa incluso de los no nacidos.

2.4.- Mujeres que participaron en la guerra

A continuación, señalaremos el papel de las mujeres dentro de la guerra de oposición al dominio español, que por supuesto, no pretende invisibilizar la lucha de los indígenas varones, sino que como hemos visto, entreteje un entramado de resistencias en las que las mujeres también fueron participantes, pero que no se han visibilizado. Miguel López Portilla en un relato refiere:

Fue cuando también lucharon y batallaron las mujeres de Tlatelolco lanzando sus dardos. Dieron golpes a los invasores; llevaban puestas insignias de guerra; las tenían puestas. Sus faldellines llevaban arremangados, los alzaron para arriba de sus piernas para poder perseguir a los enemigos (2020: 162).

Fernández de Oviedo (nombrado cronista oficial en 1532) describió la participación de las mujeres en la guerra al lado de otros indígenas varones, enuncia a las mujeres como flecheras, que también estaban al frente dando órdenes, es decir que no solo colaboraban en la lucha, sino que eran dirigentes:

"... aunque no son gigantes ... son muy altos, y ellos y ellas flecheros ..." (116), y más adelante agrega: "... algunas mujeres principales van a las batallas con sus maridos, o cuando son señoras de la tierra, y mandan y capitanean su gente..." (Oviedo, 1950: 142 citado en López, 1997: 93).

Finalmente, retomamos el texto en el que Francisco de Aguilar (soldado de Cortés) hizo referencia a la presencia de mujeres en uno de los episodios de la conquista, en el que las mujeres mostraron organización y valentía, causando temor a los propios conquistadores y soldados, según su relato:

[...] vinieron tanta multitud de mujeres con hachas encendidas, y braseros y lumbres, que ponían espanto. Aquestas [sic] venían a buscar a sus maridos y parientes que en los portales estaban muertos ... y comenzaban una gritería y llanto tan grande, que ponía espanto y temor (Cortés, 1983: 79 citado en López, 1997: 102).

Así pues, las mujeres también tomaron

las armas, que, como sabemos, no eran tan sofisticadas como las traídas por los españoles , pero son muestra de la valentía y coraje con los que enfrentaron de manera activa a los opresores de su pueblo. En palabras de López: «[...] cuando un grupo de mujeres se une, aun el más valiente conquistador siente temor» (1997: 102). Como pudimos observar, las mujeres mesoamericanas tuvieron diferentes formas de oponer resistencia a los españoles, y aunque sabemos que la conquista y posterior época colonial trajo grandes consecuencias, no podemos seguir aceptando que se invisibilice o reduzca el papel de las mujeres en los procesos históricos.

Conclusiones

En este artículo se plantearon dos objetivos articulados entre sí: por un lado, comprender la teoría de la subalternidad, reconociendo sus aportes y limitaciones, y por el otro analizar la participación de las mujeres durante la conquista de México, visibilizando la diversidad de papeles que desempeñaron.

Para lograr los objetivos se estudiaron los aportes de Antonio Gramsci, Gayatri Spivak, Mary Nash, Blanca López de Mariscal, Krisna Tolentino, Almudena Escribá Maroto, Yesenia Alegre Valencia, Georgina Rosado Rosado, entre otras, que permitieron el análisis de la participación de las mujeres durante la conquista de México a partir de la teoría de subalternidad.

La subalternidad es un concepto que nos permite reflexionar sobre la situación en la que nos encontramos en Latinoamérica, y concretamente en México, como un país que no solo fue colonizado por lo españoles, sino que además fue silenciado en los discursos hegemónicos. La Historia de México fue construida a partir de los relatos que los propios conquistadores hicieron, donde describieron a nuestro pueblo como salvaje y sanguinario, mientras ellos masacraron indígenas, destruyeron documentos y símbolos históricos, extrajeron recursos naturales, explotaron mano de obra y abusaron de las mujeres, mientras argüían que traían el progreso y la civilización. Y aún a pesar de ello, sus discursos, su sistema de signos, así como su quehacer historiográfico sigue inundando el nuestro, por lo que es necesario cuestionar estas formas hegemónicas y demostrar que Miguel López Portilla estaba en lo correcto cuando dijo: «no es verdad el dicho que afirma que “la historia la escriben siempre los vencedores”» (2020: 11).

En este texto también fue posible reconocer las limitaciones de la teoría de la subalternidad, en tanto no plantea una vía de salida de la opresión y dominación. Lo que hasta cierto punto resulta comprensible, puesto que las estructuras hegemónicas permanecen como espacios cerrados para la enunciación de los subalternos, por lo que, lo que encontramos son grandes muestras de resistencia y oposición a la dominación, tanto patriarcal, como colonialista y capitalista. Pero regresando a Gramsci, todas las batallas se inscriben en el campo cultural, por lo que mientras no se dé una verdadera transformación ideológica, no será posible una transformación de la realidad.

Los aportes vertidos en el análisis también permitieron comprender cómo se construye la subalternidad de las mujeres, en la que la construcción de género va a tener un papel fundamental para configurar lo que Spivak llama la «metáfora-concepto mujer». Dentro de esta construcción de género, la reputación y la asignación del «deber ser» que se impone a las mujeres, funcionan como mecanismos para impeler a las mujeres a que se alineen a lo establecido y constriñe aún más los espacios desde los que pueden tener lugares de enunciación como subalternas.

A pesar de alzar la voz, articularse a luchas sociales e incluso levantar sus propias luchas, las mujeres siguen enfrentado la subalternidad de género (independientemente de que puedan enfrentar otros tipos de opresión como la étnica o de clase) en tanto que el sistema de signos permanece. Las luchas en pro de los derechos de las mujeres

⁴ Los españoles que contaban con: cañones, ballestas, espadas, lanzas, dagas, armaduras y caballos, mientras que los pueblos indígenas usaban: armas blancas con hojas de bronce, cobre o materiales afilados, arco, honda, hacha y lanza.

y de otros grupos subalternos han dado lugar a algunos cambios en distintas esferas, como la política, social, económica, laboral, etc. Pero en términos culturales o ideológico sigue quedando pendiente una transformación sustancial que posibilite una sociedad más justa, en la que las mujeres no queden desplazadas.

Vale la pena rescatar nuevamente a Spivak cuando señala que «[...] la construcción ideológica del género mantiene lo masculino dominante. Si en el contexto de la producción colonial el subalterno no tiene historia y no puede hablar, el subalterno como femenino está aún más profundamente en tinieblas» (2003: 328). E insistir en que es precisamente el rescate y visibilización del papel que han desempeñado y siguen desempeñando las mujeres en los procesos histórico-sociales lo que permite transformar (a veces lentamente, a veces de manera abrupta) los escenarios, los derechos, la realidad en la que transitamos las mujeres.

Este trabajo permitió visibilizar la participación de las mujeres durante la conquista de México fuera del arquetipo de sumisas e inertes ante los embates. Se pudo demostrar que su participación fue heterogénea, rescatando evidencia de sus acciones en 4 ejes: mujeres entregadas en donación, las que defendieron su integridad sexual, las que evitaron la procreación y finalmente las que participaron en la guerra.

[...] creo importante señalar que una vez que hemos identificado nuestra condición de subalternas, podemos hacer emerger desde ese lugar, las voces acalladas por tantos siglos de opresión y ubicar nuestros relatos en espacios protagónicos que den cuenta de nuestras vivencias, nuestras necesidades y nuestras propuestas (Alegre, 2012: 8).

El análisis mostró que las mujeres son agentes capaces de acción y resistencia, que a pesar de la subalternidad en la que se les ha colocado por cuestiones de género, etnia y clase, luchan por transformar su realidad y eventualmente lo logran en la inmediatez, pero no por ello su lucha no trasciende.

Mientras que para algunos la lucha de las mujeres solo se asoma por un diminuto recoveco que hay que reconocer con lupa, para otras deja las fisuras sobre las que ha de ser posible romper los muros impuestos a sus hijas y construir nuevas estructuras, aunque sea para las nietas, que han de ser parte de una sociedad más justa.

Conflicto de intereses

La autora de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo se pueden compartir a solicitud directa de la autora.

Los datos personales facilitados por la autora a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

A la Mtra. Lizbeth Martínez Mariano por la revisión y aportaciones al contenido.

A la Mtra. Maricarmen Camacho Flores por la corrección del abstract.

Referencias

- Alegre, Valencia Yesenia (2012). Las mujeres como sujetas subalternas. En Jorna de Estudios Feministas y de Género. Disponible en: <https://www.bibliotecafragmentada.org/wp-content/uploads/2012/11/Las-Mujeres-como-Sujetas-Subalternas.pdf>
- Brom, Juan (2020). "La conquista de México y de todo el continente". En Esbozo de historia de México, México: Grijalbo. Pp. 85-96.
- Chakrabarty, Dipesh (s/f). Una pequeña historia de los Estudios Subalternos. En Anales de desclasificación. Disponible en: http://www.economia.unam.mx/historiacultural/india_subalternos.pdf
- Colegio de México (2023). Diccionario del Español de México. México: COLMEX. Disponible en: <https://dem.colmex.mx/>
- Escribá, Moroto Almudena (2015). Subalternidad y prácticas feministas en América Latina: 47ª Sesión de la Comisión sobre Población y Desarrollo. En Revista Internacional de Comunicación y Desarrollo, 4. Pp. 61-73. Disponible en: <https://revistas.usc.gal/index.php/ricd/article/view/3301>
- García, Martínez Bernardo (2004), "La época colonial". En Colegio de México (2004). Nueva historia mínima de México. México: COLMEX. Pp. 58-112.
- Gramsci, Antonio (2011). ¿Qué es la cultura popular? Valencia: Publicacions de la Universitat de València.
- Hernández, Graciela (2013). Subalternidad y prácticas desde la subalternidad. En Temas de mujeres revista del CEHIM, año 9, no. 9, Nueva época, pp. 102-120.
- López, de Mariscal Blanca (1997). La figura femenina en los narradores testigos de la conquista. México: El colegio de México. Disponible en: <https://repositorio.colmex.mx/concern/books/5h73pw871>

López, Portilla Miguel (2020). "Obras de Miguel León-Portilla. Tomo XIII. Visión de los vencidos / El reverso de la conquista: relaciones mexicas, mayas e incas". México: México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Históricas y El Colegio Nacional. Disponible en: 599pdf: Obras de Miguel León-Portilla. Tomo XIII. | Instituto de Investigaciones Históricas (unam.mx)

Nash, Mary (2006). Identidades de género, mecanismos de subalternidad y procesos de emancipación femenina. En Revista CIDOB d'Afers Internacionals, núm. 73-74 p. 39-57. Disponible en:

https://www.cidob.org/es/articulos/revista_cidob_d_afers_internacionals/identidades_de_genero_mecanismos_de_subalternidad_y_procesos_de_emancipacion_femenina

Rosado, Rosado Georgina (2018). La lucha de las mujeres por la democracia. En Dossier de la Democracia, Volumen 1. México: Instituto Electoral y de Participación Ciudadana de Yucatán. Pp. 173-196. Disponible en: <https://www.iepac.mx/public/dossier-de-la-democracia/DOSSIER-21-11-18.pdf>

Spivak, Gayatri (1985). Estudios de Subalternidad: Deconstruyendo la historiografía. Trad. de Ana Rebeca Prad y Silvia Rivera Cusicanqui de "Subaltern Studies: Deconstructing Historiography". En Subaltern Studies VI: Writings an South Asian History and Society, Delhi, Oxford University Press, 1985. Pp. 330-363. Disponible en: <https://reflexionesdecoloniales.files.wordpress.com/2013/03/spivak.pdf>

Spivak, Gayatri (2003). ¿Puede hablar el subalterno? En Revista Colombiana de Antropología. Volumen 39, enero-diciembre, Colombia: Instituto Colombiano de Antropología e Historia Bogotá. Pp. 297-364. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1050105018181010.pdf>

Tolentino, Krisna (2020). Interpelaciones para subalternizar: subalternización de género, raza, clase en los tránsitos de la academia PSI. En Integración Académica en Psicología. Volumen 8. Número 24. Pp. 57-71. Disponible en: <https://www.integracion-academica.org/37-volumen-8-numero-24-2020/285-interpelaciones-para-subalternizar-subalternizacion-de-genero-raza-clase-en-los-transitos-de-la-academia-psi>

TRANSFUGUISMO POLÍTICO DURANTE EL PROCESO ELECTORAL DE 2018 EN EL MUNICIPIO DE HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA

POLITICAL TURNCOAT DURING THE ELECTORAL PROCESS OF 2018
IN THE MUNICIPALITY OF HUAJUAPAN DE LEÓN OAXACA

Isaac Abimael Vera Reyes

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 109 - 122

<https://orcid.org/0009-0001-6605-0620>

Año 11. N0. 31

Recibido: 27/11/2023

Aprobado: 2/12/2024

Publicado: 20/01/2025

Alumno de 9º semestre de la licenciatura en Ciencias Políticas
en la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla Dirección: Privada de Bartolomé de
las Casas, #8, Colonia la Merced, Huajuapán de León, Oaxaca, México
Teléfono: +529531501304
Correo electrónico: isaac.vera@alumno.buap.mx

El objetivo de este estudio es conocer las emociones que provocan los tránsfugas en los votantes, el reflejo de estas en los procesos electorales, y, en general, los efectos que recaen en el ideal de una muestra mínima de huajuapaños acerca del sistema político mexicano. Entendiendo como transfuguismo político, como el traspaso de un grupo o partido político a otro. Esto desde la teoría económica de la democracia de Anthony Downs (como se citó en Ojesto & Sebastián, 2013) en donde los objetivos del gobierno, los partidos políticos y los votantes son económicos y políticos. Expone las motivaciones de los tránsfugas y la razón de su falta de disciplina partidista. Se presta atención especial al Ayuntamiento de Huajuapán de León, Oaxaca (2019 – 2021) debido a que su victoria está ligada al transfuguismo electoral; las acciones vacías de contenido ideológico, emprendidas por la administración rodeada de polémicas, propiciaron el enojo del electorado, reflejado en los resultados de la encuesta aplicada para enmarcar sus emociones y conocer las ideas generadas por el sistema político mexicano sobre dicha práctica. Su sentir se materializa en los procesos electorales posteriores mediante el voto nulo, de castigo o en el mejor de los casos, bien informado.

Palabras clave: transfuguismo político, transfuguismo electoral, disciplina partidista, teoría económica de la democracia, abstención, voto de castigo, voto informado.

Abstract

The objective of this study is to know the emotions that defectors provoke in voters, the reflection of these in the electoral processes, and, in general, the effects that fall on the ideal of a minimum sample of huajuapaños about the Mexican political system. This is from the economic theory of democracy by Anthony Downs (as cited in Ojesto & Sebastián, 2013) where the objectives of the government, political parties, and voters are economic and political. The foregoing exposes the motivations of the defectors and the reason for their lack of partisan discipline. Special attention is paid to the City Council of Huajuapán de León, Oaxaca (2019 - 2021) because its victory is linked to electoral turncoats; the empty actions of ideological content undertaken by the administration surrounded by controversy led to the anger of the electorate registered in the results of the survey applied to frame their emotions and to know the ideas that such practice generates about the Mexican political system. The electorate expressed their feelings in the subsequent electoral processes, manifesting them through a null vote, punishment, or, in the best cases, by being well-informed.

Keywords: political turncoat, electoral turncoat, party discipline, economic theory of democracy, abstention, punishment vote, informed vote

Introducción

La presente investigación aborda un fenómeno de la democracia representativa, el transfuguismo político, entendido de manera general como el acto de migrar de un partido o grupo político a otro. Esta acción puede darse en un parlamento, pero también durante procesos electorales. Pudiendo ser positiva para los Estados que pretenden instaurar una democracia pues en los países regidos por autoritarismos o sistemas de partido único durante una crisis interna o coyuntural se desprenderán las nuevas clases políticas, sin embargo, en los sistemas multipartidistas el tránsito encuentra en los partidos trampolines en donde permanecerá mientras se encuentre satisfecho, por tanto, el transfuguismo será percibido como negativo pues su actuar no es incentivado por la lucha del interés general.

Desde la teoría económica de la democracia de Anthony Downs (citado en Ojesto & Sebastián, 2013) los gobiernos, los partidos políticos y los votantes toman decisiones con objetivos económicos y políticos. El gobierno busca mantener el control del aparato de Estado a través de los deseos de los ciudadanos que representen una mayoría; los partidos políticos, por su parte, maximizan los votos para ganar elecciones; y los electores emiten su voto guiándose por el partido político que mejore sus ingresos, esto es, quien le otorgue mayores beneficios económicos.

El estudio da a conocer y explica las consecuencias que el transfuguismo electoral tiene en los procesos electorales y la percepción de los votantes del sistema político mexicano en Huajuapán de León, Oaxaca. Para ello se aplicó una encuesta a una muestra poblacional mediante una metodología mixta con el fin de enmarcar el sentir de los votantes y el efecto que surte en las elecciones.

Se parte del marco conceptual del transfuguismo, luego se contextualiza el caso mexicano, en donde la transición democrática inauguró el transfuguismo sin precedentes, derivado de las crisis de los partidos políticos con desprendimientos del PRI para integrarse al PRD y, posteriormente del PRD a MORENA. Este

hecho es caracterizado por Muñoz et al. (2021) como el “efecto MORENA”, que como era de esperarse se extendió hasta el municipio, es el caso de Huajuapán de León, Oaxaca.

Marco conceptual: transfuguismo político y transfuguismo electoral

El transfuguismo político, en general, es el cambio de adscripción de un partido a otro, sin tomar en cuenta las condiciones en las que el fenómeno se presenta (Ríos, 2009). Se relaciona con otros conceptos de la democracia representativa y con los Estados modernos que suponen la representación como una relación bilateral a partir de partidos políticos que aparecen como mediadores en el proceso de elección de tales figuras. La Ley (s/f) establece las condiciones para determinar si se trata de un tránsito, entre las que figuran: si la migración a otra organización es dentro de dicha institución y si se da fuera de algún proceso electoral; en otras palabras, el tránsito es aquél que ocupando un cargo público decide cambiar de grupo político o parlamentario.

Seijas (2000) comparte en gran medida esta perspectiva, el tránsito es:

Aquel representante elegido en las listas de un determinado partido político y que pasa del grupo (...) en el que se encuentra a otro grupo diferente antes de concluir la legislatura o mandato para el que fue elegido, conservando su escaño o concejalía. (Seijas, 2000, p. 166)

El transfuguismo político descansa en la búsqueda, por parte del político, de posibles ventajas políticas en el ámbito legislativo; compatible con los regímenes por los cuales se acuñó el término, es decir, por los sistemas parlamentarios europeos. El transfuguismo es una acción necesaria, pues implica directamente el éxito o el fracaso de un gobierno cuando el tránsito se postula por un partido con el que se consigue el cargo público o escaño, pero éste no hace la mayoría en el parlamento, convirtiéndose en un obstáculo para la toma de decisiones.

Por su parte, el transfuguismo electoral es más común en el presidencialismo. En este caso no se busca migrar a otro grupo o partido teniendo posesión de un cargo público, es decir, después de haberlo conseguido mediante la competencia electoral con un partido de origen, sino que el fenómeno comienza a gestarse en las estructuras internas de las instituciones por la falta de consenso en la elección de sus candidatos; de modo que el inconforme o afectado en sus intereses por los resultados de la selección de precandidatos buscará la candidatura en otra organización política (Espejel, 2021).

Para identificar el fenómeno es necesario prestar atención al régimen al que está sujeto un Estado y el momento en el que se suscita la fuga del político, ya sea durante la selección de candidaturas dentro del partido o bien en el ejercicio de las atribuciones de un escaño o cargo público. En general, hay dos posibilidades, el transfuguismo parlamentario, entendido como el desplazamiento con fines políticos de un servidor público en pleno ejercicio de sus facultades a un grupo político o parlamentario distinto al que en un primer momento se encontraba adscrito para la competencia electoral por el cargo o el escaño; o el transfuguismo electoral consistente en el cambio de un partido político a otro según se favorezca al político en la candidatura por el cargo que se disputarán las fuerzas políticas en el proceso electoral, cuya motivación se sitúa en la aspiración a candidaturas que le permitan acceder a cargos de mayor relevancia que implican directamente la maximización de beneficios.

Para Ríos (2009) la política es un juego de lealtades y traiciones, fundamentos del liberalismo sustentados en el derecho individual; considera que "traicionar" es la materialización de la lucha por las libertades y derechos en una democracia; sin embargo, señala que también implica costos como el ascenso de sujetos "indeseables" al poder, es decir, aquéllos que solo buscan satisfacer intereses personales mediante discursos llamativos para un electorado reducido a clientela. En el siguiente apartado se trata con mayor detalle a lo que se refiere este párrafo.

Seijas (2000) señala como posible causa

de la actitud tráfuga a la división de la sociedad que incita a la creación de partidos que no disten mucho de contenido ideológico entre uno y otro. Por tanto, en un sistema multipartidista las diferencias ideológicas mínimas entre una institución política y otra propician la fuga de los miembros poco retribuidos dentro del partido. Sin duda, ese es un contexto tentador para abandonar a la institución y se intensifica con la existencia de conflictos internos de interés que terminan en tales movimientos por parte de los políticos, sin temer a grandes consecuencias porque el tráfuga considera que su traspase no es grave si el contenido ideológico de ambas organizaciones políticas es casi imperceptible.

Igualmente, la división interna contribuye a la identificación de causas subjetivas en la conducta tráfuga como es la búsqueda de la maximización de sus beneficios; se trata de una conducta individualista por parte de los políticos al no cumplir sus deseos dentro de una institución, pero antes de esperar su turno para participar en una contienda electoral, deciden disminuir los costos mudándose a otra fuerza política, generalmente a una de registro reciente como partido político, pues la encuentra vulnerable.

Adicionalmente, Cansino et al. (2014) identifican los incentivos del tráfuga desde una perspectiva económica, quien interesado en satisfacer sus intereses personales está dispuesto a abandonar la institución política que lo formó buscando maximizar sus beneficios si otro grupo político se lo permite. En términos de Landa (2001) ese comportamiento es el de un "tráfuga ilegítimo", mientras que otro tiene implicaciones trascendentales en el sistema político y es categorizado como "tráfuga legítimo".

Este último tiene relación directa con la "movilidad política", que supone una justificación del movimiento de los políticos en momentos de crisis, debido a que este desplazamiento efectuado por elites producidas por el fraccionamiento interno de un partido dominante o hegemónico, que incapaz de atender las múltiples voces en su estructura, provoca una reacción de fuga y la formación de clases políticas con capacidad de deslegitimar

un régimen o propiciar y orquestar un cambio significativo en el sistema político; este transfuguismo se ejemplifica en el contexto español, donde el transfuguismo se institucionalizó como resultado de la Restauración democrática después del franquismo.

La definición de tráfuga acuñada por Santolaya (2010) supone una consecuencia de la decisión de los electores al permitir indirectamente en las elecciones la postulación de candidatos en diferentes fórmulas políticas. Su estudio sigue una línea de investigación sustentada en una teoría normativa; argumenta que, constitucionalmente hablando, es imposible limitar la participación de un elector en un proceso electoral solo porque decidió votar por una fórmula distinta a la que seleccionó en la contienda anterior, debido a que en una democracia representativa las elecciones simbolizan un cambio ideológico constante de los electores. Considera que esta acción del electorado no es un cambio ideológico sino una conducta de los individuos centrada en premiar o castigar al partido político, a través de lo que Manin (1998) denominó “análisis ex-post facto”.

Velázquez (2009), en su tesis, realiza un estudio del transfuguismo político centrado en la mixteca poblana; en ella, reafirma lo propuesto por Landa (2001) respecto al “tráfuga legítimo”; el transfuguismo político es síntoma de un país en crisis o que vive un proceso de transición; se remite al contexto mexicano para dar sustento, cuando el Estado se enfrentaba a la alternancia del poder político dado el cambio de un sistema de partido hegemónico a un sistema multipartidista, siguiendo la teoría de Sartori (2005).

Entonces las crisis son el origen de una posible transformación cuando un régimen ha sido rebasado, y dichas crisis terminan por reproducirse en todo tipo de organización, como son los partidos políticos en torno a la nula legitimidad que gozan frente a los ciudadanos, porque ante estos, las acciones de los partidos se centran en la satisfacción de sus propios intereses, generando desconfianza y desconcierto frente a las instituciones de representación. La desafección política ciudadana es tal que el Latinobarómetro

midió un 45% de votos emitidos en México frente a la idea del establecimiento de una democracia sin partidos políticos (Rocha, 2014). Sobre las emociones que existen en el electorado al votar, Zamudio & Montero (2022) ofrecen un estudio centrado en un mecanismo de participación ciudadana, “la consulta popular para enjuiciar a los expresidentes” desde una perspectiva psicológica, obteniendo como resultados que las emociones presentes en los ciudadanos que decidieron participar en tal proceso son “esperanza, alegría y enojo”.

Breve contacto del transfuguismo electoral en Huajuapán

La percepción del electorado frente al hartazgo del PRI a finales del S. XX y con el nuevo milenio el cambio se asomó con la oposición materializada en un multipartidismo y la existencia de un árbitro electoral, la consolidación de fuerzas políticas entre las que más importancia figuraron fueron el PAN y el PRD. El primero ganó las elecciones presidenciales del 2000 inaugurando la transición democrática, mientras que el segundo se consolidó como una clase política caracterizada por la inestabilidad, dada la polarización de los intereses dentro de la estructura del partido, pero que en esta división han encontrado otras estructuras políticas para desenvolverse (Rocha, 2014).

La relación entre el gobierno Federal representado por el candidato del PRI, Enrique Peña Nieto (2012 – 2018), y la dirigencia del PRD encabezada por los “Chuchos” fue colaborativa, fundamentada en el Pacto por México y el apoyo a las reformas propuestas por el Ejecutivo Federal. Lo que provocó el descontento de una parte del electorado que simpatizaba con el partido, la cual los había acompañado en su proyecto como oposición del PRI, pero que rápido encontraron refugio en MORENA, en donde el dirigente del partido continuaba profesando el discurso original.

Las polémicas declaraciones del entonces candidato a la presidencia de México, Andrés Manuel López Obrador,

fueron una estrategia para aumentar su base de apoyo político pues su discurso dirigido a la ciudadanía simpatizante tenía como objetivo ser decodificado por el capital político, en otras palabras, el excandidato contaba con una gran base social, pero esta no era suficiente para gobernar. Contaba con los votos suficientes para hacerse con el cargo, de la forma en que un tránsfuga se comporta, cambiando de partido a otro en condiciones vulnerables, sin prejuicios y buscando votos con propuestas y discursos atractivos para el electorado (Espejel, 2001); lo que siguió fue sumar a políticos profesionales con trayectoria y redes de influencias para dotar de fuerza a su partido.

En un primer momento implicaba obtener el apoyo de fuerzas políticas con una base interna propia, fuerzas que al mismo tiempo encontraban mayores beneficios transfugándose que permaneciendo en el partido que los formó. Incentivados por la popularidad de MORENA, asegurarían su permanencia en el poder siempre y cuando maximizaran los votos en las urnas. En un segundo momento, porque al tomar la presidencia existiría un gobierno más o menos homogéneo, un Estado gobernable con una mayoría en la cámara de diputados que permitiera efectuar sin mayores contratiempos los proyectos del nuevo Gobierno. AMLO dejó en claro dos cosas: todo político sería aceptado en sus filas sin juzgar su pasado y, al mismo tiempo, lo necesario que estos eran para consolidar a su gobierno.

En Huajuapán de León, el PRD y demás partidos atendieron al llamado que hizo Andrés Manuel López Obrador en 2018, mensajes interceptados por la élite política, empresarial e intelectual, quienes tentados por el discurso del entonces candidato a la presidencia de la república se unieron a las filas de MORENA. Andrés Manuel señaló que todos merecían una segunda oportunidad, invitando a dejar del lado los intereses propios y

defender el interés general (Sistema Radiofónico Informativo [SRI], 2017).

Este aviso de Andrés Manuel provocó lo que Muñoz et al. (2021) señalaron como el “efecto MORENA”. El excandidato presidencial hizo válida esta medida ante sus simpatizantes prometiendo que aquellos tránsfugas estarían en constante vigilancia para evitar que aprovecharan el proceso electoral y se hicieran con un cargo público, situación que fue imposible de controlar. Como ejemplo se encuentra el dilema surgido durante el proceso de selección de candidato a la presidencia municipal de Huajuapán de León, en donde los fundadores de MORENA fueron marginados y privados de sus derechos políticos como militantes del partido.

Una fracción del PRD en Huajuapán había migrado al partido y modificado su estructura para imponer a su candidata y defender los intereses de los nuevos militantes del partido, quienes tenían como ventaja una larga trayectoria en su grupo anterior. Lo que les dejó experiencia e influencias para tomar fácilmente el control del partido político. Al mismo tiempo, dejar en crisis al PRD, orillando a su dirigencia a pactar una alianza con el PAN, un partido que dista mucho en contenido ideológico, pero tal medida desesperada es tomada para no perder los beneficios que otorga el registro como partido político.

Teroría económica de la democracia: la búsqueda de la maximización

Es necesario partir desde la perspectiva de Bussoletti (como citó Muñoz et al., 2021) para comprender las acciones de los tránsfugas, pues estos no gastan sus recursos políticos y económicos en representar a la ciudadanía, más bien los usan para hacerse de votos y en conse-

cuencia de cargos públicos, operando como partidos “cartel”; dejando de lado el contenido ideológico y la disciplina partidaria.

Para explicar el comportamiento de los gobiernos, de los partidos políticos y de la ciudadanía (votantes), desde la teoría económica de la democracia de Anthony Downs (como se citó en Ojesto & Sebastián, 2013), se deben entender las acciones racionales como las ideadas “para lograr los objetivos políticos y económicos deliberadamente elegidos por el sujeto”. Los gobiernos tienen la legitimidad para hacer cumplir su voluntad con la maquinaria institucional en la ciudadanía, por lo que los partidos políticos ambicionan poseerlos. De tal manera que su objetivo es ganar las elecciones a través de la maximización de votos, y es esta búsqueda por los máximos beneficios el centro de atención de Downs para explicar el comportamiento político democrático.

Las estrategias del gobierno son producidas de acuerdo con la atención de los votantes; con ello se genera una relación de interdependencia y los votantes eligen mediante una reflexión de las utilidades que les otorga el gobierno; mientras éste motiva sus acciones en atender lo que la mayoría de los votantes quiere (Ojesto & Sebastián, 2013). Actúa así por las dudas sobre los resultados finales de los cómputos de los votos en las urnas, por ello prioriza los sectores con mayores necesidades porque son el número de votantes más extenso. Aquí los partidos políticos se valen del contenido ideológico para asegurar votos, porque este simplifica la información ante los votantes. Si las acciones de los gobiernos se derivan de las ideologías que profesan los partidos políticos de los que provienen, generarán una base social fuerte, pues los votantes valoran a los partidos comprometidos con acciones sustentadas en ideales (Ojesto & Sebastián, 2013).

Andrés Manuel López Obrador es un ejemplo de este comportamiento, en sus dos primeros intentos por ganar la Presidencia de la República. Se centró en descalificar de manera tajante a la oposición, dejando fuera a sectores importantes de la población que tienen influencia en la maximización de votos, entre ellos políticos de la oposición, intelectuales

y periodistas. Sin embargo, en 2018 cambió su estrategia de manera racional, dado que sus experiencias arrojaron la poca oportunidad que tenía si se volvía a postular en el mismo partido caótico y fragmentado internamente (PRD). Con un discurso de conciliación partidista dio apertura al transfuguismo sin precedentes. La legitimidad carismática de Obrador ante los votantes orientó las decisiones de estos en las urnas, quienes bajo este placebo que otorga la persuasión eligieron en las urnas sin consultar la procedencia de los candidatos, tan solo atendieron al llamado.

El transfuguismo electoral en Huajuapán de León: aplicación de la teoría económica de la democracia

Huajuapán de León no fue la excepción. El efecto MORENA se instauró en cada rincón de la República Mexicana. En esta ciudad de la región mixteca oaxaqueña, la crisis del PRD orquestó un desgajamiento, y MORENA se perfilaba como el refugio de los transfugas, fenómeno que se legitimó tras las declaraciones de reconciliación partidista del hoy Presidente de la República.

Para determinar el impacto a nivel ideológico y las consecuencias electorales que la actitud transfuga generó en el electorado del municipio, se aplicó una encuesta a una muestra poblacional que participó en el proceso electoral de 2018 para la elección de presidente municipal. Veintiuno, de treinta y un electores que finalizaron la encuesta, participaron en las elecciones para concejales en 2018.

Los resultados arrojaron las razones de su elección, de sus preferencias partidistas y las consecuencias que el fenómeno del transfuguismo electoral ocasionó en las elecciones del 2021. Cerca del 70% de los encuestados votó por MORENA en las elecciones para concejales (2028), a este porcentaje se le sumó el 11% que se inclinó por la

coalición "Juntos Haremos Historia" (PT, MORENA y ES) acaparando más del 80% del total de encuestados.

Entre los motivos de su elección, la ideología es la que predomina (33.33%), confirmando lo aportado por Downs citado en Ojesto & Sebastián (2013), cuando los votantes carecen de información dirigen su atención al contenido ideológico del partido político. Sin embargo, trece votantes señalaron que el "proyecto político" fue su incentivo, mientras que la "simpatía por un personaje político" ocupó el tercer lugar con cuatro respuestas positivas. En el primer caso se pudo intuir que tales respuestas son producto de una elección de votantes bien informados, que desde la perspectiva de Downs (como se citó en Ojesto & Sebastián, 2013) en un multipartidismo emitirían su voto sopesando las preferencias de los demás votantes de la siguiente forma:

- Si el partido de su preferencia parece contar con oportunidades razonables para ganar, vota en su favor.
- Si no se da el supuesto anterior, vota por un partido que tenga oportunidad de triunfar, a fin de impedir la victoria del partido que menos le agrada.
- Vota por el partido de su preferencia, a pesar de que al parecer no tenga oportunidades de ganar, con el propósito de aumentar sus opciones en elecciones futuras. Es un votante orientado al futuro. (Ojesto & Sebastián, 2013)

Para identificar su conducta es necesario entrevistar a cada uno de los trece votantes, ya que la información obtenida de la encuesta es limitada y pretende establecer generalidades respecto a la muestra.

Mientras que la simpatía por un personaje político responde al carisma y capacidad de persuasión del político, quien adopta la retórica de su conveniencia ante la incierta conducta del electorado, cargándolo de información sesgada que le permita maximizar votos (Ojesto y Sebastián, 2013). Los votantes huajuapeños fueron guiados por la capacidad persuasiva de Andrés Manuel López Obrador, no cuestionaron

la procedencia de la candidata a la presidencia municipal de Huajuapán, simplemente cegados por el discurso apoyaron la estrategia del líder de MORENA y otorgaron esa segunda oportunidad en pro del interés general, aún cuando esto significara abandonar convicciones.

También hubo quien respondió que su razón fue "voto de castigo", coincidente con la mala reputación que tuvo la administración 2015 – 2018 encabezada por Martín Aguirre, presidente municipal por el PRI. Es importante señalar que los cómputos arrojados por el Instituto Estatal Electoral y de Participación Ciudadana de Oaxaca (IEEPCO, 2016) muestran gráficos de las preferencias partidarias de los huajuapeños y MORENA dominó, sin embargo, la estrategia del PRI y su coalición con el PVEM los colocó triunfantes en la contienda con una diferencia de 160 votos entre el primer y segundo lugar.

En el proceso electoral de 2018 la participación fue mayor. La experiencia electoral anterior determinó los dos pilares estratégicos para maximizar votos y reducir la incertidumbre en 2018: el discurso de conciliación encabezado por López Obrador orquestó los altos porcentajes de participación; y la coalición "Juntos Haremos Historia", los cuales determinaron una victoria aplastante a favor de MORENA con 10,671 votos (IEEPCO, 2018).

La legitimidad con base legal no lo es todo, pues si el objetivo de los gobiernos y de los partidos es mantener el aparato de Estado bajo su control, las acciones emprendidas a lo largo de su administración deben concentrar los deseos de las mayorías. Además deben de ser congruentes con el contenido ideológico del partido, lo cual es muy relevante para los votantes. Uno de los aspectos con los que Downs pretendía determinar el comportamiento democrático (Ojesto & Sebastián, 2013).

Esos puntos fueron ignorados por la administración encabezada por Juanita Cruz Cruz en Huajuapán de León, quien estuvo rodeada por polémicas, desde

su victoria como precandidata hasta el señalamiento de desvío de recursos en 2019. Un total de 19 millones de pesos señalados como producto de hackeo de las cuentas del ayuntamiento, así como el destino de fondos a empresas fantasma, “Luhan Soluciones Inteligentes y Servicios S.C. y Diagnóstico Empresarial RDI S.A C.V.” según datos de informativo6y7 (2021). Son de los acontecimientos más emblemáticos que dañaron la imagen del partido a nivel local.

El voto de castigo fue más visible en las elecciones de 2021 tras la polémica administración del Ayuntamiento 2019–2021. Las consecuencias se suscitaron en tres aspectos: en el daño a la imagen del partido a nivel local, en la ideología de los huajuapeños y, por ende, la pérdida de las elecciones.

Considerando la ideología como medio utilizado por los partidos para maximizar votos, las acciones carentes de orientación ideológica impactarían directamente en los cómputos electorales de manera contraproducente para MORENA, pero no solo para este partido, sino que sucede lo mismo con todos los partidos políticos; por el otro lado, sirve para los votantes como guía para determinar sus preferencias y tomar una decisión en las urnas, quienes dan valor a esta congruencia ideología-acción.

Una de estas acciones efectuadas por miembros de los partidos es el transfuguismo, el poco compromiso derivado de su disciplina partidista concluye en una administración fatídica, los políticos hoy no pertenecen a un partido por principios, son las reflexiones costo-beneficio las que los mueven.

Los huajuapeños llaman coloquialmente a este fenómeno “chapulinear” y juzgan a través de un ejercicio comparativo de las acciones del líder federal con las administraciones locales, básicamente porque Andrés Manuel es el ejemplo a seguir, la encarnación del mismo partido político y toda decisión fuera de su marco retórico y de acción es señalado.

La falta de información y lo tedioso o costoso que puede ser adquirir una fuente confiable lleva a los votantes a tomar el discurso político como su única fuente verídica de información. Claro está que son también las largas jornadas de trabajo las que no les permiten inmiscuirse profundamente en materia política, siendo la información sesgada la más accesible para el público en general.

Tal pareciera que el transfuguismo es una práctica mal vista dependiendo de la persona que lo lleve a cabo, de la legitimidad carismática. Pues López Obrador no carga con este pesar por la relación entre sus acciones y las ideas que expresa, caso contrario es el de la expresidente municipal del Ayuntamiento de Huajuapán (2019–2021). Esta ausencia de disciplina responde a un partido dividido, a la ausencia de un líder con capacidad de unificar mediante mecanismos comunicativos, incapaz de negociar entre los grupos de interés inmersos en el partido político, incapaz de integrar en los procesos de toma de decisiones a agentes externos, ante estas vicisitudes solo se puede esperar un escenario de ingobernabilidad.

Los votantes ven las acciones emprendidas como vacías de contenido, pudiendo limitarse a criticar esta incongruencia. Sin embargo, las polémicas que puedan implicar a los gobiernos en temas tan ruidosos en la República Mexicana como lo es la corrupción, surtirán efectos inmediatos en la institución política y en este caso, en los representantes de esta, tales como el desprestigio y el acoso mediático; lo que a largo plazo se materializará en el mencionado voto de castigo y un incremento en la desafección política. Lo que corresponde a esta investigación es evidenciar el fenómeno ocurrido en el proceso electoral de 2018 en el municipio de Huajuapán y documentar el sentir de los votantes ante el acto del tráfuga:

Tabla 1
Percepciones del transfuguismo de los huajuapeños

¿De que manera percibe el hecho de que un personaje político deje un partido político para integrarse en otro?	
Positiva	17.24%
Negativa	62.07%
Indiferente	20.69%

Fuente: Elaboración propia con datos de la encuesta aplicada.

En la Tabla 1 se puede identificar que más del 60% de los votantes encuestados considera al transfuguismo como negativo en contraste con el 17.24% que lo encuentra positivo, por otra parte, la indiferencia también se manifiesta con un 20.69%; a estos tres aspectos les corresponden expresiones específicas.

La Tabla 2 engloba en los tres aspectos de la Tabla 1 las expresiones correspondientes a las percepciones negativas, positivas o indiferentes:

Tabla 2
Expresiones correspondientes a la percepciones

Expresiones correspondientes a las percepciones negativas, positivas o indiferentes del transfuguismo	
Positivas	Alegria, reconocimiento, honestidad, "siempre que sea por el bien del pueblo".
Negativas	Decepción, traición, incongruencia, informalidad (5), confusión, enojo (9), dudas, indignación, desconfianza, tristeza.
Indiferentes	Las circunstancias definen el rumbo, nada.

Fuente: Elaboración propia con datos de la encuesta aplicada.

El 48.28% de los votantes huajuapeños encuestados estaba consciente de que la candidata a la presidencia municipal era producto del transfuguismo, de tal forma que ese porcentaje emitió su voto sin cuestionar el acto. A pesar de la poca información sobre los representantes del partido, adjudicaron la razón de su voto a la ideología (41.30%) y al proyecto político (30.43%) del partido a nivel local. Lo cual evidenció que fue

Andrés Manuel López Obrador quien guio su decisión en la urna, pues solo mediante su discurso se dio a conocer el proyecto de gobierno y los ideales predominantes.

Finalmente, este marco emocional influye en la percepción de los votantes acerca del sistema político mexicano vigente. Un 60% de los encuestados considera que el transfuguismo no beneficia al sistema político, la tendencia en las respuestas es que los políticos actúan según lo que les conviene, pero no velan por el bien común. Básicamente, para los votantes un sistema político satisfactorio es aquel que sirve a la sociedad y no aquél que se usa como instrumento para enriquecer a una minoría.

Sin embargo, un votante señaló que el transfuguismo es productivo, puesto que no es posible defender al pueblo sino se priorizan intereses individuales, esta declaración es un ejemplo de lo que Smith denominó la "mano invisible" como metáfora para alcanzar el bien común mediante la satisfacción de intereses personales. Claro que los agentes inmersos en este proceso electoral buscan maximizar sus beneficios, por eso la política es un arte que se vale de discursos lingüísticos para persuadir al público. Ya que es percibido como una clientela a la que se le deben vender promesas, a su vez que los votantes se limitan a elegir a los que ofrezcan mayores beneficios.

Desde esta perspectiva económica de la democracia toma sentido que el 31.25% y el 34.38% votantes encuestados optara por responder que los partidos políticos y los personajes políticos son iguales. Ya que su nula disciplina y el transfuguismo electoral les quita credibilidad ante el electorado, a quien solo le queda el voto para expresar su desacuerdo a través de la abstención, el voto de castigo o el voto informado.

En el primer caso revela una pérdida de credibilidad en el sistema, esto es desafección política; en el segundo, es una forma de manifestar su molestia

considerando el impacto que puede llegar a tener su participación en los procesos electorales; y en el tercero están los votantes que tienen mayor interés en la política y sus procedimientos para ejercer su derecho al voto de manera consciente y lo más informado posible.

Con un 49.21% de satisfacción en los encuestados tras culminar la administración del Ayuntamiento de Huajuapán de León (2019 – 2021) producto del transfuguismo, rodeada de polémicas y desaprobación pública evidente, el partido a nivel local decidió buscar la reelección relanzando a su excandidata. Los resultados bastante predecibles fueron de acuerdo con los datos del IEEPCO (2021) una victoria de la “candidatura común PAN – PRI” sobre MORENA quien ganó con una diferencia

del 13.39% entre el primer y segundo lugar.

Faltaría encuestar a los votantes que participaron en este último ejercicio electoral en dónde ubicarían su voto: abstención, de castigo o informado, sin embargo, los resultados de la encuesta aplicada en la preferencia partidista indicaron un 68.97% su inclinación por MORENA, mientras que PAN y PRI tan solo conservan el 13.79%. Dejando claro que quien hizo efectivo su voto en 2021 fue a manera de castigo, pues a pesar de tener una afinidad por el partido a nivel federal no los llevaría a dar terceras oportunidades a quienes no consideran disciplinados ni mucho menos comprometidos con los principios del actual presidente de la República Mexicana.

Conclusiones

El transfuguismo político es el traspaso de un grupo o partido político a otro. Esta migración es determinada por el tipo de régimen de un Estado; en el parlamentarismo se presenta con fines políticos (gobernabilidad) mientras se ocupa un cargo o escaño; por su parte, en el presidencialismo se gesta durante procesos electorales, incentivado por objetivos económicos y políticos. Esta práctica es positiva para los Estados que buscan transitar a un gobierno democrático, como lo fue la España del fin del franquismo y el México de la apertura democrática de finales del S. XX.

En un multipartidismo como el del sistema mexicano, el acto no es mal visto si las ideologías de los partidos políticos no se distancian demasiado, de ahí las mudanzas de los políticos del PRI al PRD y del PRD a MORENA. Sin embargo, como se observó, tal fenómeno es abordable mediante la teoría económica de la democracia de Anthony Downs en la que la maximización de los beneficios individuales guía las decisiones tanto del gobierno, de los partidos políticos y de los votantes.

La aplicación de esta teoría en el proceso electoral de 2018 para la elección de presidente municipal en Huajuapán de León dejó los siguientes resultados: la reafirmación de la importancia de la ideología profesada por los líderes de los partidos políticos para que los votantes puedan ejercer su voto, así como la importancia de la congruencia de este contenido ideal con las acciones emprendidas por las administraciones, cuestión que no fue atendida por el gabinete de MORENA en Huajuapán durante su gobierno y que además se le sumaron las polémicas de desviación de recursos y corrupción.

El transfuguismo electoral fue percibido por los encuestados como negativo para el sistema político mexicano en su generalidad, pues revela la nula disciplina partidista de los políticos que lo practican, abonando las ideas de que tanto partidos políticos como personajes políticos son todos iguales. Provocando una serie de sentimientos en los que predominan los relacionados al enojo, hechos que terminan por impactar en los siguientes procesos electorales donde el ejercicio del voto se manifiesta en sus tres presentaciones: nulo, de castigo e informado. Los cómputos de las elecciones del 2021 dejaron clara la imagen dañada del partido por sus representantes, el descontento de los votantes se reflejó en un probable voto de castigo y también una participación 10% menor que la histórica del 2018. Finalmente, la encuesta muestra un despertar del interés de los votantes huajuapeños encuestados por conocer a fondo el fenómeno del transfuguismo y sus implicaciones; también la disposición por aceptar a los tráfugas en momentos de crisis y principalmente cuando se trate de defender los intereses de los ciudadanos.

Agradecimientos

Mi reconocimiento y entera gratitud al Dr. Federico Pablo Vázquez García, docente adscrito a la Facultad de Derecho de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), por su guía, disponibilidad y seguimiento en lo que respecta a este artículo, así como por el valor de su palabra y compromiso con este proyecto desde su origen hasta su publicación.

Referencias

Abrego, González, N. (2016). Actores y divisiones políticas: el distrito de Huajuapán de León, Oaxaca, 2012. [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional de Acceso Abierto de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (RAA-BUAP). <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/6939>

Cansino, C., Schmidt, S., & Velázquez, Caballero, D. (2014). TRANSFUGUISMO O LA PERVIVENCIA DEL PRI POR OTROS MEDIOS. https://www.academia.edu/43009375/Transfuguismo_la_pervivencia_del_PRI_por_otros_medios

Cruz, G. (5 de septiembre de 2017). PRD está desfondado para 2018: MORENA. Sistema Radiofónico Informativo. <https://www.xeouradio.com/2017/09/05/prd-esta-desfondado-para-el-2018-morena/>

Instituto Estatal Electoral y de Participación Ciudadana de Oaxaca. (2016). Estadística de la Elección de Concejales a los Ayuntamientos 2016. Obtenido de <https://www.ieepco.org.mx/archivos/documentos/2016/Estad%C3%ADstica%20Concejales%202016.pdf>

Instituto Estatal Electoral y de Participación Ciudadana de Oaxaca. (Julio 2018). CÓMPUTO DISTRITAL Y MUNICIPAL ELECCIÓN ORDINARIA 2017 - 2018 . Obtenido de http://ieepco.org.mx/publicado_computo/concejales.html

Instituto Estatal Electoral y de Participación Ciudadana de Oaxaca. (2021). CÓMPUTOS MUNICIPALES. Proceso Electoral Ordinario 2020 - 2021. Obtenido de <https://www.ieepco.org.mx/computos2020/concejales.html>

LA LEY (s/f). Transfuguismo. https://guiasjuridicas.laley.es/Content/Documento.aspx?params=H4sIAAAAAAAAAEAMtMSbF1jTAAAUmtsOMTtbLUouLM_DxblwMDCwNzl2OQQGZapUt-ckhlQaptWmJOcSoAA1mgpjUAAAA=WKE

Landa, C. (2001). Notas Sobre El Transfuguismo Parlamentario Peruano. *Derecho & Sociedad*, (16), 9-17. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechoysociedad/article/view/16999>

Manin, B. (1998). *Los Principios del Gobierno Representativo*. Alianza Editorial, España.

Melchor, G. (30 de noviembre de 2021). Detectan desvío de más de 3 millones de pesos en Huajuapán de León, a través de empresas fantasma. *Informativo6y7*. <https://informativo6y7.mx/detectan-desvio-de-mas-de-3-millones-de-pesos-en-huajuapán-de-león-a-traves-de-empresas-fantasma/>

Muñoz, Armenta, A., Medrano, González, R., & Cienfuegos, Terrón, M. A. (2021). Transfuguismo y disciplina partidista en los congresos locales: El efecto Morena después de las elecciones de 2018. *Revista Mexicana de Análisis Político y Administración Pública: Dossier: Elecciones 2021. Entre la continuidad o la ruptura*. 10(2). 53-67. <http://www.remap.ugto.mx/index.php/remap/article/view/371>

Ojeto Martínez Porcayo, J. F., & Sebastián Barajas, Ángel M. (2013). Downs, Anthony, Teoría económica de la democracia. *Revista Mexicana De Derecho Electoral*, 1(3). <https://doi.org/10.22201/ij.24487910e.2013.3.10026>

Ríos, L. E. (2009). El transfuguismo electoral en el sistema presidencial mexicano. ¿Qué es el transfuguismo electoral. *Revista del Tribunal Electoral del Poder Judicial de la Federación: Justicia Electoral*, 1(3), pp. 75-96. <https://revistas-colaboracion.juridicas.unam.mx/index.php/justicia-electoral/article/view/12074/10880>

Rocha, Quintero, J. (2014). La pérdida de brújula. Análisis de los partidos políticos en México: Crisis de los partidos políticos. *Revista Análisis Plural: Problemas Candentes, Respuestas a Medias*. (1) , pp. 119-128. <https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/1486/>

LA CURADURÍA DIGITAL DE RECURSOS EDUCATIVOS COMO ESTRATEGIA DE ENSEÑANZA DE APRENDIZAJE

THE DIGITAL CURATION OF EDUCATIONAL RESOURCES AS A
TEACHING-LEARNING STRATEGY

Francisco Javier López-Hernández
Yadira Navarro-Rangel
Daniel Mocencahua-Mora

ISSN 2448-5829

Doctorante del programa de Doctorado en Sistemas y Ambientes
Educativos
Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad
Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 Sur, Puebla México
franciscojavier.lopez@viep.com.mx, yadira.navarro@viep.com.mx
daniel.mocencahuamora@viep.com.mx

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo presentar una estrategia de enseñanza aprendizaje mediante la curaduría digital de recursos educativos abiertos, utilizando la metodología de las 4 S 's por sus siglas en inglés, que consiste en buscar, seleccionar, dotar de sentido y compartir los mejores materiales sobre un tema en específico. Dentro del texto nos referimos a un diplomado, donde se puso en práctica dicho modelo con docentes de matemáticas de educación media superior de una universidad pública del estado de Puebla.

Abstract

The current research aims to present a teaching and learning strategy through digital curation of open educational resources, using the methodology of the 4 S's (Search, Select, Sense, and Share). This methodology involves searching for, selecting, giving meaning to, and sharing the best materials on a specific topic. The context of this study revolves around a diploma program where this model was implemented with mathematics teachers from higher education institutions in the state of Puebla.

¿Qué entiendes cuando escuchas por primera vez la palabra curar? Te aseguro que pensaste inmediatamente en una enfermera o en un doctor, pero si eres del área de sociales, posiblemente, tu mente haya retomado la imagen de un curador de arte, en este escrito discutiremos qué es la curaduría desde la perspectiva de curar contenidos digitales para la educación.

Retomando los Objetivos de Desarrollo Sostenible es importante enfocarnos en el objetivo cuatro de la Agenda 2030 el cual nos habla sobre una educación de calidad teniendo como metas: acceso igualitario a la educación técnica profesional y superior, competencias adecuadas para un trabajo decente, alfabetización universal de jóvenes y adultos y educación para el desarrollo sostenible y la ciudadanía mundial así como los entornos virtuales de aprendizaje eficaces e incrementar la oferta de docentes calificados (CEPAL, 2018)

Es por ello por lo que se propone la curaduría como un eje central para desarrollar competencias digitales docentes e incrementar docentes capacitados para impartir clases con tecnología.

El internet exige un cambio de paradigma en la enseñanza, debido a que rompe con la visión del docente como la única fuente de conocimiento, la facilidad de obtener la información en el lugar que nos encontremos, el estudiante se vuelve autónomo rompiendo la clásica memorización y volviéndolo un inquisidor de su conocimiento, como lo menciona Manuel Área (2005, citado en Martínez, 2015)

Curaduría digital

Pero qué es la curación digital, la curación digital es el acto interactivo de investigar, hallar, filtrar, organizar, agrupar, integrar, editar y compartir

el mejor y más relevante contenido de un tópico específico, esto dicho por Posadas en el 2013 (citado en Popoca, et al., 2017)

Este concepto se atribuye a Bhargava en el 2009, quien se dio cuenta que debido a la demanda de los usuarios de internet para acceder a contenidos de calidad, ya no podía ser satisfecha por los motores de búsqueda. Debido a que, cuando se hace una solicitud a un buscador, este devuelve cientos o miles de resultados que materialmente son imposibles de revisar, y es necesaria la intervención humana para determinar cuáles de los resultados es el mejor y más pertinente.

Es por ello por lo que surge la necesidad de capacitar a personas que sean capaces de discernir entre lo que es verdadero o falso en el internet, surgiendo el curador de contenidos cuyo trabajo no es generar contenido nuevo, sino darle sentido al que otros crean, siendo cualidades importantes del curador, personas sintéticas, proactivas, críticas, expertas, empáticas y curiosas (Popoca, et. al., 2017)

Proceso de curación

Existen diversos modelos del proceso de curación uno de ellos es el de las 5 C's (Figura. 1) de la curación digital propuesto por Deschaine y Sharma en el 2015 que describe un proceso de 5 fases, comenzando por la colección que consiste en preservar, revisar y recopilar; siguiendo por la categorización, comparar generalizar, clasificar; luego la crítica, criticar, evaluar y discriminar; conceptualizar, crear, organizar y resignificar; por último circulación que como su nombre lo dice consiste en dar circulación exhibir y hacer accesible el material curado.

Otro de los modelos es el propuesto por Wolff y Mulholland en el 2013 dentro del ámbito de la educación proponiendo un ciclo de indagación curatorial para el aprendizaje (Figura 2) empezando por las fases son: 1) investigación, se busca

el contenido con base en metas y delimitación establecidas; 2) selección y recolección, se filtran lo contenidos, dejando los más relevantes; 3) interpretación del contenido individual, resalta ideas principales y toma notas; 4) interpretación entre contenidos, compara e identifica relaciones entre los contenidos; 5) organización, los contenidos se organizan con base en una narrativa que apoye a la finalidad del aprendizaje; 6) narración, la relación de los contenidos se presenta al público objetivo; 7) investigación/recuperación, finalmente el público participa mediante la retroalimentación para mejorar el contenido. En este proceso no se deben de dejar de lado los propósitos del aprendizaje.

Para fines de esta investigación nos quedaremos en uno de los modelos que podría ser considerado de los más básicos, el titulado las cuatro S por sus siglas en inglés Search Select, Sense y Share. Que implica primero buscar el contenido en distintas fuentes de información, segundo filtrarlo y organizarlo tercero darle sentido al público que va dirigido es decir adaptarlo y por último compartirlo esto es propuesto por Leiva-Aguilera en el 2013 y Guallar en el 2014 (citados en Mendoza Pescador, 2017)

Curando materiales

Se trabajó con 21 docentes dentro de un módulo de curaduría que tuvo como competencia a desarrollar: Gestiona el proceso de curaduría para obtener recursos educativos abiertos que logren objetivos de aprendizaje o competencias con responsabilidad empática y considerando los retos de la enseñanza de las matemáticas de manera presencial e híbrida.

Durante el módulo, los docentes conocieron el concepto de curaduría, el internet, los operadores Booleanos, los repositorios de recursos educativos abiertos y la importancia de distinguir la información verdadera entre la falsa que circula en el internet.

Proceso de curaduría

El proceso de curaduría que se planteó con los docentes se presenta en la Figura 3., el cual se basó como ya se mencionó en el modelo de las 4S's, en la fase de búsqueda se planteó que en colectivo se establecieran los criterios de búsqueda, el tipo y propósito de recurso; en la fase de selección, de manera individual, se eligió con base en el repositorio y tipo de licencia; en la dotación de sentido, se trabajó en grupos afines (por materia) para el etiquetado de los materiales; en la última fase, difusión de la información, se realizó en colectivo mediante TEAMS.

Fase de selección, repositorios

En esta fase se les enseñó el concepto de Repositorio, justificando que aunado a la emergencia sanitaria que vivimos en el 2020, las escuelas migraron su educación al trabajo a distancia. Por lo que los docentes tuvieron que adaptar su clase utilizando tecnología y adoptando el uso de Repositorios de Recursos Educativos Abiertos considerados como la forma más adecuada de salvaguardar y mantener los Recursos Educativos Abiertos (García-Solano, et al, 2021a)

El listado de repositorios que se les proporcionó a los docentes fue el siguiente:

Nombre del repositorio	Enlace
Apple Education	https://www.apple.com/education/k12/
Aprende	https://aprende.org/aprende
Ariadne	https://www.ariadne-eu.org
Athabasca University Press	https://www.aupress.ca
Biblioteca Digital UNAM	https://bidi.unam.mx
Bibliotecas BUAP	https://bibliotecas.buap.mx/portal/

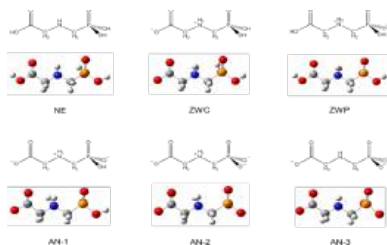
Centro Universitario de Ciencias Económico-Administrativas Universidad de Guadalajara	https://bibliotecas.buap.mx/portal/
Clasco	http://biblioteca.clasco.edu.ar/
Curriki	https://www.curriki.org
EduTEKA	http://eduteka.icesi.edu.co/recursos/
GeoGebra	https://www.geogebra.org/materials
Intech Open	https://www.intechopen.com
Interamerican Development Bank	https://www.iadb.org/en
Khan Academy	https://es.khanacademy.org
Massachusetts Institute of Technology	https://blossoms.mit.edu
Mathematics Assessment Project	https://www.map.mathshell.org/stds.php?standardid=1158
Merlot	https://www.merlot.org/merlot/index.htm
Middlesex University London	https://www.mdx.ac.uk/our-research/open-access
Milne Open Textbooks	https://milneopentextbooks.org
Minerva Repositorio Institucional	https://minerva.usc.es/xmlui/?locale-attribute=gl
National Programme on Technology Enhanced Learning	http://nptel.ac.in/
Numeracy guide	https://numeracyguidet.global2.vic.edu.au/resources/
Open Education Global	https://www.oeconsortium.org/
Open Educational Resources Commons	https://oercommons.org/oer
Open Michigan	http://open.umich.edu
Open Michigan	https://open.umich.edu/find-open-resources-u-m
Open Stax	http://openstax.org

Open Stax	https://openstax.org
Open Textbook Library	https://open.umn.edu/opentextbooks
Open Yale Courses	http://oyc.yale.edu/
PLOS	https://plos.org
Procomún	http://procomun.educalab.es/es
Programa de Entornos Virtuales de Aprendizaje	https://proeva.udelar.edu.uy/institucional/proyectos/latin/
Project Gutenberg	https://www.gutenberg.org
PruebaT	https://pruebat.org
Red de Información Educativa	http://redined.mecd.gob.es/xmlui/page/redined
Red Digital Proyecto Descartes	https://proyectodescartes.org/descartescms/
Red Universitaria de Aprendizaje	https://www.rua.unam.mx/portal/
Redalyc	https://www.redalyc.org
Repositorio de Innovación Educativa UNAM	http://www.innovacioneducativa.unam.mx:8080/jspui/
Repositorio Institucional BUAP	https://repositorioinstitucional.buap.mx/home
Repositorio Tecnológico de Monterrey	https://repositorio.tec.mx
Repositorios de acceso vía BUAP	https://bibliotecas.buap.mx/portal/trial
Repositorio Colegio de Bachilleres	https://repositorio.cbachilleres.edu.mx
Rincones Didácticos	https://rincones.educarex.es
Saylor Academy	https://www.saylor.org
SciELO	https://scielo.org
Sparc	https://sparcopen.org

Estructuras de glifosato en el medio ambiente

El glifosato como gas existe principalmente en tres formas: la estructura con carga neutra (NE) que predomina en el 90% de las moléculas, mientras que las dos estructuras de zwitterión posibles (con carga negativa en el grupo carboxilato (ZWC) y con carga negativa en el grupo fosfato (ZWP)) solo están presentes en el 5%, debido a que requieren altos niveles de energía para existir (Fliss, O. et al., 2021) (Figura 5).

En disolución, la formación de diferentes estructuras de glifosato depende principalmente de dos factores: el pH y la concentración de sales en la disolución. En aguas dulces de riego y agua potable (con baja concentración de sales) con un pH entre 5 y 7, existe como zwitterión (ZWP). En aguas saladas (con alta concentración de sales) de cauces de ríos, con un pH entre 7 y 9, existe como anión con carga -1 (AN-1), mientras que por encima de un pH de 9, en agua de mar, se encuentra la forma de anión con carga -3 (AN-3). El anión con carga -2 (AN-2) solo existe en agua dulce (baja concentración de sales) y con valores de pH entre 7 y 9 (Peixoto, M. M. et al., 2015) (Figura 5).



Nanoestructuras y glifosato

Se han reportado estudios experimentales y teóricos donde se utilizaron diferentes nanoestructuras de carbono para atrapar glifosato. En 2017, de Oliveira y col. investigaron la absorción de glifosato utilizando nanocajas de boro nitrógeno B₁₂N₁₂ mediante cálculos DFT, obteniendo una energía de adsorción de

-53.97 kcal/mol (de Oliveira, O. V. et al., 2017) (Figura 6 a)).

En 2018, Ashwin y col. emplearon calix[4]arenos funcionalizados con grupos terbutilo en el borde superior y dopados con nanopartículas de Fe para detectar la presencia de glifosato en disolución a través de experimentos de fluorescencia, obteniendo resultados positivos en la detección de glifosato (Ashwin, B. et al., 2018) (Figura 6 b)).

En 2020, Diel y col. utilizaron nanotubos de carbono funcionalizados con grupos COOH dopados con nanopartículas de Fe para remover glifosato de una matriz acuosa mediante procesos de adsorción, logrando una remoción del 86% (Diel, J. C. et al., 2021) (Figura 6 c)).

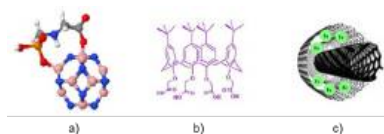


Figura 6. Nanoestructuras de carbono utilizadas para la remoción de glifosato: a) Nanocaja de boro nitrógeno, b) Calix[4]areno funcionalizado y c) Nanotubo de carbono (de Oliveira, O. V. et al., 2017; Ashwin, B. et al., 2018; Diel, J. C. et al., 2021).

Modelando Calix[n]arenos

Entre los compuestos macrocíclicos, los calixarenos (CX[n]) son probablemente los más prometedores para su aplicación en el área de complejos anfitrión-huésped (host-guest complexes). Su disponibilidad sintética, baja toxicidad y presencia de anillos reactivos son características que los hacen relevantes dentro de la química supramolecular.

Son derivados de la condensación de fenoles y aldehídos formados por un número de unidades variable, que puede estar entre 4 y 20 unidades, aunque los calix[n]arenos de 4, 5, 6, 7 y 8 unidades son los más comunes (Böhmer, V. & Shvanyuk, A., 2000) (Figura 7 a)). Pueden existir en una conformación que recuerda a una canasta o un jarrón; de hecho, el

nombre calixareno se deriva de un tipo de jarrón griego llamado cálix (Fulton, D. A. & Stoddart, F., 2001) (Figura 7 b)).

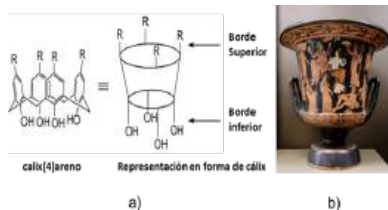


Figura 7. Comparación entre a) la estructura del calix[4]areno y b) un cálix usado en la antigua Grecia (Yousaf, A. et al., 2003; Google, s.f.).

Los calix[n]arenos tienen la capacidad de actuar como receptores de una variedad de especies huésped (guest). Pueden interactuar con sustratos orgánicos neutros, catiónicos y aniónicos, así como con iones metálicos. Para el reconocimiento y detección de moléculas se emplean calix[n]arenos funcionalizados, que contienen distintos grupos funcionales capaces de generar interacciones de tipo π -catión, electrostáticas, puentes de hidrógeno, entre otras, formando complejos estables (Gassoumi, B. et al., 2021a).

Es decir, los calix[n]arenos funcionalizados actúan como sensores moleculares, ya que poseen una estructura superficial específica con propiedades químicas interfaciales, con diferentes formas de cavidades, para facilitar la estabilización del complejo anfitrión-huésped (host-guest complex) (Gassoumi B. et al., 2021b).

A través de la distribución de la densidad electrónica en las moléculas es posible conocer diferentes propiedades, como los sitios reactivos propensos a ataques nucleofílicos (regiones en color azul) o electrofílicos (regiones en color rojo), o los sitios susceptibles de llevar a cabo interacciones intermoleculares (regiones en color amarillo y verde), analizando el mapa del potencial electrostático molecular (MEP) (Figura 8 a)).

Otras propiedades topológicas que dependen de la densidad electrónica

son los puntos críticos de enlace y los caminos de enlace, conceptos relacionados con el enlace químico a través de la teoría cuántica de átomos en moléculas (QTAIM).

Además, la estabilidad de una molécula o complejo depende en gran medida del tipo de enlaces o interacciones entre los átomos que la conforman. La representación gráfica de interacciones no-covalentes (NCI) y el mapa de gradiente de densidad reducida (RDG) (Figuras 8 b) y c)) permite entender cómo las interacciones no-covalentes entre la molécula anfitrión (host) y las moléculas huésped (guest) estabilizan a este tipo de complejos, explicando su gran capacidad de adsorción (Gassoumi, B. et al., 2022a, Gassoumi, B. et al., 2022b, Gassoumi, B. et al., 2022c).

Actualmente, nuestro grupo de investigación estudia las propiedades fisicoquímicas de la molécula de glifosato y su interacción con calix[n]arenos con $n = 4, 6$ y 8 , usando métodos de la química computacional, a fin de proponer alternativas para la remoción de glifosato del medio ambiente (Figura 8).

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Agradecimientos

MJT agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por la beca de Maestría (CVU 1267115). Los autores agradecen al proyecto 100256733-VIEP2024 de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP-BUAP), al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México (LNS-BUAP) y al Cuerpo Académico BUAP-CA-263 (SEP, PRODEP).

Referencias

Ashwin, B. C. M. A., Saravanan, C., Stalin, T. Muthu, P. & Rajagopal, S. (2018). FRET based solid state luminescent sensor for glyphosate using calixarene grafted ruthenium (II) bipyridine doped silica nanoparticle. *ChemPhysChem*. 19. 2768. doi: 10.1002/cphc.201800447.

Böhmer, V. & Shivanyuk, A. (2000). Calixarenes in self-assembly phenomena, in *Calixarenes in Action*, Imperial College Press, London Eds., 203–240, doi: 10.1002/chem.200305633.

CIMA (2020). Importaciones y exportaciones de maíz. Página web: https://www.cima.aserca.gob.mx/work/models/cima/pdf/ci_ie/2020/Importaciones/y/exportaciones_maiz_240620. (último acceso 29 de enero de 2024).

COFEPRIS (2020). Lista de evaluación de inocuidad caso por caso de los organismos genéticamente modificados (OGM). Página web: <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistemanacional/registro/lista-evaluacion-inocuidad-181-portal.pdf> (último acceso 29 de enero de 2024).

CONAHCYT (2020). Expediente científico sobre el glifosato y los cultivos GM. Página web: <https://conahcyt.mx/expediente-cientifico-sobre-el-glifosato-y-los-cultivos-gm/> (último acceso 29 de enero de 2024).

CONANP (2020). Programa de manejo reserva de la biosfera la encrucijada Chiapas. Página web: www.conanp.gob.mx/datos_abiertos/DGCD/50.pdf (último acceso 29 de enero de 2024).

De Oliveira, O. V., dos Santos, J. D., Silva, J. C. F., Luciano, T. C., Junior, M. F. F. & Franca, E. F. (2017). Theoretical Investigations of the Herbicide Glyphosate Adsorption on the B12N12 Nanocluster. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*. 9, 3, 175-180. doi: 10.17807/orbital.v9i3.991

Diel, J. C., Franco, D. S. P., dos Santos, S. N., Pereira, H. A., Moreira, K.

S., de L. Burgo, T. A., Foletto, L. E. & Dotto, G. L. (2021). Carbon nanotubes impregnated with metallic nanoparticles and their application as an adsorbent for the glyphosate removal in an aqueous matrix. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9, 2213-3437. doi: 10.1016/j.jece.2021.105178.

Dill, G. M., Sammons, R. D., Feng, P. C. C., Kohn, F., Kretzmer, K., Mehrsheikh, A., Bleeke, M., Honegger, J. L., Farmer, D., Wright, D. & Hauptfear, E. A. (2010). Glyphosate: Discovery, Development, Applications, and Properties. In *Glyphosate Resistance in Crops and Weeds*, Nandula Editorial, 319–325. doi: 10.4236/as.2013.44028.

ElDiario.es (2023) Revista Ecologista nº96, de Ecologistas en Acción. Edición de periódicos, Madrid. Página web: https://www.eldiario.es/opinion/zona-critica/plaguicidas-agua-consumo-humano_129_9895813.html (último acceso 29 de enero de 2024).

Fliss, O., Essalah, K. & Fredj, B. A. (2021). Stabilization of glyphosate zwitterions and conformational/tautomerism mechanism in aqueous solution: insights from ab initio and density functional theory-continuum model calculations. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 23. 46. doi: 10.1039/D1CP03161A.

Fulton, D. A. & Stoddart J. F. (2001) Neoglycoconjugates based on cyclodextrins and calixarenes, *Bioconjugate Chemistry*. 12, 655-672. doi:10.1021/bc0100410.

Funke, T. Yang, Y. Han, H. Healy-Fried, M. Olesen, S. Becker, A. & Schönbrunn, E. (2006). Structural basis of glyphosate resistance resulting from the double mutation Thr97 Ile and Pro101 Ser in 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase from *Escherichia coli*. *Journal of Biological Chemistry*, 281(51), 38412-38419. doi:10.1074/jbc.M608512200.

Gassoumi, B., Ezzahra, B. F., Ghalla, H., & Chaabane, R. B. (2021a). Possibility of Complexation of the Calix[4]Arene Molecule with the Polluting Gases: DFT and NCI-RDG Theory. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.93838.

Gassoumi, B., Mohamed, F. E., Castro, M.E., Melendez, F.J., Karayel, A. L. Nouar, F.,

Ghalla, H., Özkinalı, S., Kovalenko, V. I., Chaabane, R. B. & Ouada, B. H. (2021b). In silico exploration of O-H...X₂⁺ (X = Cu, Ag, Hg) interaction, targeted adsorption zone, charge density iso-surface, O-H proton analysis and topographic parameter theory for calix[6]arene and calix[8]arene as model, *Journal of Molecular Liquids*. 334. doi:10.1016/j.molliq. 116127.

Gassoumi, B., Echabaane, M., Mohamed, F. E., Nouar, L., Madi, F., Karayel, A., Ghalla, H., Castro, M. E., Melendez, F. J., Özkinalı, S., Rouis, A. & Chaabane, R. B. (2022a). Azo-methoxy-calix[4]arene complexes with metal cations for chemical sensor applications: Characterization, QTAIM analyses and dispersion-corrected DFT- computations, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 264. doi:10.1016/j.saa.2021.120242.

Gassoumi, B., Mehri, A., Hammami, H., Castro, M. E., Karayel, A., Özkinalı, S., Melendez, F. J., Nouar, L., Madi, F., Ghalla, H., Chaabane, R. B., & Ouada, H. B. (2022b). Spectroscopic characterization, host-guest charge transfer, Hirshfeld surfaces, AIM-RDG and ELF study of adsorption and chemical sensing of heavy metals with new derivative of Calix [4]quinone: A DFT-D3 computation. *Materials Chemistry and Physics*. 278, doi:10.1016/j.matchemphys.2021.125555.

Gassoumi, B., Dlala, N. A., Echabaane, M., Ghalla, H., Zhou, Y., Castro, M. E., Melendez, F. J., Leila, N., Madi, Fatiha. & Chaabane, R. B. (2022c). Adsorption of toxic and non-toxic metals with new model of CX[4]: Experimental and computational investigation, Spectroscopic, QTAIM, and Antibacterial activity analyses. *Journal of Molecular Structure*. 1268. doi:10.1016/j.molstruc.2022.133618.

Humphries, D., Byrtus, G. & Anderson, A. M. (2005). Glyphosate residues In Alberta's atmospheric deposition, soils and surface waters. *Water Research Users Group Alberta Environment*. 10-20. Página web: <http://www3.gov.ab.ca/env/info/infocentre/publist.cfm> (último acceso 29 de enero de 2024).

Lajmanovich, R. C., Repetti, M. R., Boccioni, A. P. C., Michlig, M. P., Demonte, L., Attademo, A. M. & Peltzer, P. M. (2023). Cocktails of pesticide residues in *Prochilodus lineatus* fish of the Salado River (South America): First record of high concentrations of polar herbicides. *Science of the Total Environment*. 870. 162019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162019

Maggi, F., Cecilia, D., Tang, F. H. M. & McBratney, A. (2020). The global environmental hazard of glyphosate use. *Science of The*

Maqueda, C., Undabeytia, T., Villaverde, J., & Morillo, E. (2017). Behaviour of glyphosate in a reservoir and the surrounding agricultural soils. *Science of the Total Environment*. 593–594, 787–795. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.202

National Center for Biotechnology Information (2023). PubChem Compound Summary CID 3496, Glyphosate, Página web: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Glyphosate> (último acceso 29 de enero de 2024).

Peixoto, M. M., Bauerfeldt, F. G., Herbst, H. M., Pereira, S. M. & da Silva, O. C. (2015). Study of the Stepwise Deprotonation Reactions of Glyphosate and the Corresponding pKa Values in Aqueous Solution. *Journal of Physical Chemistry*. 119, 5241-5249. doi: 10.1021/jp5099552

Ramírez, M. F. (2021). El herbicida glifosato y sus alternativas. Serie Informes Técnicos IRET. 44. Universidad Nacional, Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas, Heredia. 7. Página web: http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ipen.org/sites/default/files/documents/serie_tecnica_44_glifosato_1_1.pdf. (último acceso 29 de enero de 2024).

Rendon- von Osten, J. & Dzúl-Caamal, R. (2017). Glyphosate Residues in Groundwater, Drinking Water and Urine of Subsistence Farmers from Intensive Agriculture Localities: A Survey in Hopelchén, Campeche, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 14, 595-600. doi:10.3390/ijerph14060595

Ruíz-Toledo, J., Castro, R., Rivero-Pérez, N., Bello-Mendoza, R. & Sánchez, D. (2014). Occurrence of Glyphosate in water bodies derived from intensive agriculture in a tropical region of Southern Mexico, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 93, 289-293. doi: 10.1007/s00128-014-1328-0

Souza, M. G., da Silva, A. C. dos Santos, A. R. & Rigotto, R. M. (2019). Evaluation of the atmospheric contamination level for the use of herbicide glyphosate in the northeast region of Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 191, 604. doi: 10.1007/s10661-019-7764-x.

Yousaf, A., Hamid, A. S., Bunnori, M. N. & Ishola, A. A. (2015). Applications of calixarenes in cancer chemotherapy: facts and perspectives. *Drug Design, Development and Therapy*. 9, 2831-2838. doi:10.2147/DDDT.S83213

LA BIOINFORMÁTICA Y LA FORMACIÓN DE ESTUDIANTES DEL ÁREA DE LA SALUD

BIOINFORMATICS AND THE TRAINING OF HEALTH SCIENCES STUDENTS

Iván Guzmán León
María Yadira Rosas Bravo
Lilia Mercedes Alarcón Pérez
Enrique González Vergara

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 136 - 150

<https://orcid.org/0009-0004-4244-335X>
<https://orcid.org/0000-0001-8808-3178>
<https://orcid.org/0000-0001-6101-6231>
<https://orcid.org/0000-0002-9883-4921>

Año 11, 31 Recibido:
10/10/2024 Aprobado:
2/12/2024 Publicado:
20/01/2025

Doctorado en Investigación e Innovación Educativa BUAP
Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado BUAP
Centro de Química, ICUAP
ivan.guzman@correo.buap.mx; yadira.rosasbravo@correo.buap.mx
diie.ffyl@correo.buap.mx; enrique.gonzalez@correo.buap.mx

Resumen

La bioinformática es un campo que comenzó con la investigación de macromoléculas como proteínas y ácidos nucleicos. Utiliza técnicas computacionales, matemáticas y estadísticas para analizar, interpretar y generar datos biológicos, con aplicaciones en biología, genómica y biotecnología. La BI ha sido una herramienta vital en el desarrollo de varias disciplinas, incluidas la genómica, la nutrigenómica, la transcriptómica, la metabolómica y la epigenómica. Los programas de medicina deberían formar profesionales de la salud capaces de interactuar con las ciencias ómicas para una mejor visualización, entendimiento, diagnóstico y tratamiento de las enfermedades, por lo que su presencia en los planes de estudio universitarios, está ampliamente justificada. Varias bases de datos en ciencias de la salud, como PDB, NCBI y PubMed, se utilizan para estudios de enfermedades genéticas, entre otras. Junto con la inteligencia artificial, la minería de datos y el aprendizaje automático, se están produciendo resultados más confiables, mejorando la calidad del producto y permitiendo la adquisición de conocimientos para resolver problemas biomédicos. Al permitir comprender y aprovechar el vasto volumen de datos biológicos generados en la medicina moderna, la bioinformática es una herramienta fundamental para los estudiantes del área de la salud.

Palabras clave: Bioinformática; Formación de estudiantes; Ciencias médicas; Estudiantes universitarios; Área de la salud.

Abstract

Bioinformatics is a field that began with the research and understanding of macromolecules such as proteins and nucleic acids. It uses computational, mathematical, and statistical techniques to analyze, interpret, and generate biological data, with applications in biology, genomics, and biotechnology. BI has been vital in developing several disciplines, including genomics, nutrigenomics, transcriptomics, metabolomics, and epigenomics. Medical programs should train health professionals capable of interacting with omic sciences to visualize, understand, diagnose, and treat diseases, so its presence in university curricula is widely justified. Numerous databases in health sciences, such as PDB, NCBI, and PubMed, are used for studies of genetic diseases, among others. In conjunction with artificial intelligence, data mining, and machine learning, reliable results are produced, improving product quality and allowing the preparation needed to solve biomedical problems. By enabling students to understand and exploit the vast volume of biological data generated in modern medicine, bioinformatics is a fundamental tool for healthcare students.

Keywords: Bioinformatics, Student formation, Medical sciences; College students; Health sciences

Introducción

Los sistemas de cómputo en bancos y supermercados, los videojuegos, las Smart TV, los teléfonos móviles y los relojes inteligentes son algunos ejemplos de cómo la tecnología computacional está presente en nuestra vida cotidiana, en actividades que van desde la recreación, hasta las laborales. Está tan presente que podemos afirmar que, queramos o no, la tecnología afecta nuestra cotidianidad. La educación no se queda atrás, sobre todo después de la pandemia. Grandes y pequeños interactúan a través de plataformas y herramientas para construir y adquirir conocimiento.

El nivel superior no es la excepción. La tecnología educativa ha permeado todas las áreas del conocimiento. En el área de la salud, está tan presente que ha detonado interfaces interactivas en donde la relación con el estudiante permite visualizar y analizar datos que antes solo estaban en la imaginación.

Dentro de las diferentes aplicaciones que tiene la tecnología computacional en el área de la salud humana, podemos encontrar a la bioinformática (BI), la cual permite el análisis computacional y molecular de todos los niveles de organización biológica. En este artículo, se hará énfasis en la aplicación que tiene la BI en el área de biología celular y molecular y las herramientas para el estudio de las biomoléculas que componen a los seres vivos.

Con el apoyo de estas herramientas, se ha permitido la secuenciación del genoma humano y la creación de las ciencias ómicas en bioquímica y biología molecular, con programas computacionales valiosos para la investigación y la práctica médica. La bioinformática es fundamental para los estudiantes de medicina y áreas afines, ya que permite comprender y aprovechar el vasto volumen de datos biológicos generados en la medicina moderna. Razón por lo cual, ninguna institución educativa de nivel técnico superior o superior pueden ignorar los avances recientes de la bioinformática.

Los antecedentes de la bioinformática en las ciencias médicas y biológicas

La bioinformática (BI) inicia a partir de las investigaciones realizadas a macromoléculas como las proteínas y los ácidos nucleicos (Gauthier et. al., 2019; Hagen, 2000). Las proteínas fueron lo primero en secuenciarse en el laboratorio, mediante el método de Edman, continuando con el ácido desoxirribonucleico (ADN).

Margaret Dayhoff, quien es considerada como la madre de la bioinformática, utilizó sus conocimientos en computación para aplicarlos a la biología, bioquímica y medicina, llevando a cabo estudios a las secuencias de proteínas para analizar el cambio evolutivo a nivel molecular, por lo que elaboró programas de cómputo para dicho fin. Los resultados experimentales de ella y de varios grupos de investigación formaron parte de su obra conocida como el Atlas of Protein Sequence and Structure (Strasser, 2010).

Adicionalmente, produjo matrices de sustitución conocidas como Dayhoff o PAM para el alineamiento de secuencias mediante el uso de códigos de una letra de los aminoácidos para facilitar el procesamiento de la información. Por lo tanto, el Atlas se considera la primera base de datos de secuencias, siendo almacenado en tarjetas perforadas que empleaban las computadoras para su análisis (Hagen, 2000; Portillo-Bobadilla et. al., 2022). Con la llegada del internet y el paso de los datos a cintas magnéticas, la información viajó por todo el mundo a través de la red.

La BI se define como el uso de técnicas computacionales, matemáticas y estadísticas para el análisis, interpretación y generación de datos biológicos. Tiene aplicaciones en biología, bioquímica, genética y biotecnología.

También, se ha empleado para comprender las funciones de los genes, analizar la dinámica de microorganismos e integrar métodos computacionales con resultados experimentales. Se ha aplicado en varios campos, como la producción de alimentos, la genética y la remediación ambiental.

Ejemplos incluyen la anotación y selección de genes, estrategias de control de plagas, la comprensión del metabolismo humano y la biorremediación. La BI también se ha utilizado en la creación de bases de datos como el Protein Data Bank (PDB), GenBank, FASTA y BLAST, que ayudan a comprender la dinámica celular y la visualización molecular en 3D (Alcalde, 2014; Franco et. al., 2008; Sánchez-Lara 2022).

En la actualidad, también se le relaciona con el estudio de la minería de datos de ácidos nucleicos, proteínas, lípidos, azúcares y metabolitos mediante diferentes aproximaciones. A partir de la secuencia de nucleótidos, es posible predecir la composición de aminoácidos de una proteína. Este proceso ayuda a inferir tanto la arquitectura molecular como la función de una proteína, basándose en el conocimiento de un gen (Martínez-Barreneche, 2007; Pellegrini et. al., 1999). Este análisis ha llevado a nuevas teorías y descubrimientos en áreas como la investigación biomédica, la agricultura, la biorremediación, la medicina y la industria farmacéutica.

La genómica y la proteómica: el proyecto del genoma humano (PGH)

El Proyecto del Genoma Humano (PGH), fundado en 1990, fue un estudio en colaboración con científicos en diferentes países para determinar la secuencia de pares nitrogenados en el material genético de las células (Cañas y Buschiazzi 2000).

Actualmente, el genoma humano consta de 23,000 genes, de los cuales 8,000 corresponden a genes asociados a enfer-

medades (Santillan-Garzón et. al., 2015; Valdespino-Gómez et. al., 2013).

Estos descubrimientos se han utilizado para varios proyectos, tales como la identificación de genes y su función en los genomas humanos. Por ejemplo, en la identificación genética de soldados muertos en combate, la comercialización de tomates transgénicos, la secuenciación completa de cromosomas humanos, el estudio de cromosomas en el ámbito de la microbiología, y el análisis de las enfermedades a nivel genético, entre otras muchas aplicaciones. Podemos ver que con la obtención del genoma humano, se revolucionó la biología, la genética y la medicina (Casero, 2001).

En 2003, la secuencia del genoma humano condujo a la creación de la medicina molecular y a la aparición de la genómica comparada; disciplina crucial en áreas como la biología y la medicina. Estos estudios pioneros nos llevan ahora a una era postgenómica, que tiene como objetivo estudiar todos los procesos moleculares que afectan a los organismos vivos, en particular aquellos que involucran genes y proteínas.

La bioinformática ha sido una herramienta vital en el desarrollo de disciplinas como la genómica, la nutrigenómica, la transcriptómica, la metabolómica y la epigenómica, lo que permite una mejor comprensión de cómo se lleva a cabo la regulación génica y la producción de información vital para el entendimiento de los procesos biológicos (Vela y Gutiérrez, 2017).



Imagen 1: representación de la interacción de un profesional de la salud con las ciencias ómicas para una mejor visualización, entendimiento, diagnóstico y tratamiento. https://www.fda.gov/files/ImpactStory_Schizophrenia_1600x900_201110.png

la medicina molecular y la bioinformática

La bioinformática (BI) ha influido significativamente en el desarrollo de otras ciencias como la biología y la medicina, contribuyendo a la creación de nuevas disciplinas como las ciencias ómicas. Dicho sea de paso, la BI ha evolucionado para adaptarse a las nuevas necesidades en el campo clínico de las enfermedades, incluidos los estudios genéticos, el desarrollo de fármacos y el análisis de secuencias.

También ha contribuido a la comprensión de las enfermedades infecciosas, la identificación de mutaciones relacionadas con la presencia de tumores y el estudio de las enfermedades raras. Adicionalmente, ha permitido el desarrollo de tratamientos terapéuticos predictivos basados en características genéticas individuales. Como resultado, surgió una nueva ciencia llamada medicina molecular, basada en los avances científicos en genética, genómica y postgenómica. Su objetivo es desarrollar nuevos métodos diagnósticos y terapéuticos basados en las causas moleculares de las enfermedades y los rasgos genéticos de los pacientes (Andalia y Arencibia, 2004).

La BI es esencial para el avance de la medicina molecular y la biotecnología, que son dos áreas de innovación tecnológica que tienen como objetivo mejorar la investigación molecular y postgenómica. La combinación de medicina molecular y genómica consolidará la medicina molecular como un medio vital para el bienestar social en el futuro.

La BI y el cáncer

La BI tiene un papel relevante en el estudio del cáncer, ya que se pueden analizar y comprender datos biológicos de gran complejidad con una exactitud sin precedentes. Mediante los conocimientos de la biología, la informática y la estadística se interpreta la información genómica y proteómica que se emplea

con fines diagnósticos, preventivos y para el tratamiento personalizado del cáncer.

La secuenciación de próxima generación (NGS) permite llevar a cabo estudio de mutaciones somáticas para la identificación de variantes genéticas específicas vinculadas con varios tipos de cáncer, como los que se refieren al de mama, pulmón y próstata (Kamps et. al., 2017).

La bioinformática médica ha sido empleada en la investigación de enfermedades oncológicas, y ha sido utilizada en la propuesta de biomarcadores, sustancias en el organismo que sirven como indicadores de algún proceso biológico normal o anormal, estado de enfermedad o respuesta que puede darse por la administración de medicamentos como medida terapéutica. Claros ejemplos son los biomarcadores para el diagnóstico de cáncer de mama hereditario, BRCA1 y BRCA2; con el uso de estas herramientas se puede predecir el carácter patogénico o benigno de la variante genética.

Por lo expuesto anteriormente, el uso de bases de datos genéticas, clínicas y moleculares es esencial para el diagnóstico y clínico del cáncer hereditario, ya que se puede establecer el efecto patogénico o neutro de una variante genética identificada de carácter dudoso.

Es de considerar que los programas que más se utilizan en la BI permiten estudiar las modificaciones estructurales o funcionales que tendrían como efecto en la proteína en cuestión; otros, pueden predecir si la variante identificada tendría repercusión en los procesos relacionados con los mecanismos de transcripción del gen (Sociedad Española de Oncología [SEOM], s.f.).

Medicina personalizada y farmacogenómica

La medicina personalizada es un enfoque revolucionario para la atención médica, que enfoca en obtener tratamientos y estrategias de prevención personaliza-

das. Esto se centra en tres puntos: 1) el empleo de biomarcadores y la prevención de enfermedades mediante el trabajo y elección de soluciones basadas en evidencia; 2) el uso de tecnologías ómicas y bioinformática combinada con el big data; 3) sus aplicaciones en diagnósticos, tratamientos hereditarios, selección de medicamentos, prevención de enfermedades y terapia génica. Ortíz y Tabak (2012) explican que la farmacogenómica investiga cómo la variabilidad genética de los individuos tiene como efecto diversas respuestas en la eficacia de un fármaco.

Como consecuencia de factores como la capacidad metabólica que varía en función de la presencia de distintos polimorfismos para los genes que codifican para proteínas, particularmente, de las enzimas que llevan a cabo esta capacidad mencionada.

La farmacogenómica y la BI se han asociado en beneficio del desarrollo de la medicina personalizada. Como ejemplo, la BI identifica polimorfismos genéticos que influyen en la eficacia o toxicidad de los medicamentos; las bases de datos como PharmGKB y dbSNP se utilizan para este objetivo, ya que contienen información genética de relevancia farmacológica y clínica (Mayo Clinic Bioinformatics Tools, NIH Library, 2024).

Un caso similar de aplicación de las herramientas bioinformáticas es el gen CYP2C19, que participa en el metabolismo de múltiples fármacos como los relacionados con enfermedades cardiovasculares (Vélez et. al., 2018). Los algoritmos de aprendizaje automático también han revolucionado la capacidad de predecir interacciones gen-fármaco y el diseño de medicamentos dirigidos.

Adicionalmente, herramientas como AutoDock y los programas de modelado molecular analizan las interacciones entre moléculas y proteínas específicas, promoviendo el desarrollo de terapias innovadoras, particularmente para patologías complejas como el cáncer, en el que los procesos genéticos como las mutaciones determinan la eficacia de las terapias dirigidas (Thorn, 2013).



Imagen 2. Ilustración de lo que parecería “manipular” las moléculas para un mejor entendimiento de la enfermedad o, como en este caso se intenta representar, del tratamiento médico. <https://i.vuzopedia.ru/storage/app/uploads/public/62a1d8f3e62a1d8f3e5c90335787237.jpg>

Base de datos y programas bioinformáticos de interés en medicina PubMed

Es un software crucial para la información de salud y genética, desarrollado por el Centro Nacional de Información Biomédica y la Biblioteca Nacional de Medicina (NLM, National Library of Medicine). Sirve como base de datos y motor de búsqueda, permitiendo la revisión de los datos de Medline y artículos que no forman parte de ella. PubMed colabora con editores de varias revistas biomédicas y tiene una amplia red de colaboración con alrededor de 70 países y 4800 revistas estadounidenses.

También tiene un punto de acceso separado, PubMed Central, que es un repositorio digital de textos completos en ciencias biomédicas. El software se utiliza en varios campos, incluyendo la práctica clínica, la investigación y la gestión. Ayuda en el uso eficiente de los recursos humanos y materiales en las instituciones de salud, asegurando una atención al paciente eficiente y efectiva (Trueba-Gómez y Estrada-Lorenzo, 2010). NCBI Por sus siglas, Centro Nacional para la Información Biotecnológica (National Center for Biotechnology Information, en inglés), es un repositorio que forma parte de la NLM.

Creado en 1988 para la generación de sistemas de información referente a la biología molecular y contiene a la base de datos de GenBank, fuente de secuencias de ácidos nucleicos y proteínas

que colabora con el Banco de Datos de ADN de Japón (DDB; DNA Data Bank of Japan) y la base de datos de secuencias de nucleótidos del Laboratorio Europeo de Biología Molecular (EMBL-EBI; The European Bioinformatics Institute).

Asimismo, posee diversos sistemas de recuperación de información y recursos computacionales para el análisis de sistemas biológicos como el Blast y otras bases de datos como PubMed y OMIM, productos de las contribuciones de la comunidad científica (Guzmán-López et. al., 2023).

PDB. Protein Database Bank. La base de datos que se integra de estructuras tridimensionales de proteínas y ácidos nucleicos. El empleo de técnicas como la cristalografía de rayos x y la resonancia magnética nuclear (RMN) fueron los medios para producir los modelos computacionales de dichas macromoléculas en un inicio. Creado por el Laboratorio Nacional de Brookhaven en la dirección de Edgar Meyer (Meyer, 1997), el PDB consistía en un archivo de siete estructuras, y después, cada año aumentaba el número de entradas al banco de datos.

Como consecuencia de los nuevos procedimientos de cristalografía y RMN, el almacenamiento de datos fue aumentando junto con las aportaciones de varios grupos de investigación en las estructuras moleculares (Rudiño-Piñera, et. al., 2022; Sánchez-Lara 2022).

En la actualidad, se adicionan otras técnicas experimentales y computacionales a las ya mencionadas para la elucidación de estructuras de proteínas tridimensionales: la microscopía crioelectrónica (crio-EM); el modelado por homología; la predicción computacional avanzada con AlphaFold y la combinación de todas las anteriores (métodos múltiples).

Este recurso es fundamental para el análisis de la estructura y función de macromoléculas biológicas, impactando en áreas como la biomedicina, el diseño de fármacos y la ingeniería de proteínas (Berman, et. al., 2000). Para el 2024, el PDB tenía 248,044 estructuras depositadas (<https://www.wwpdb.org/stats/>

deposition).



Imagen 3, interface del Protein Data Bank <https://www.rcsb.org/>

Blast. Es una herramienta bioinformática del tipo de búsqueda de alineamiento local básico (en inglés Basic Local Alignment Search Tool), que forma parte del NCBI y de PubMed (Hernández Flores y Valdez-Mijares, 2018). Se utiliza como un programa de alineamiento de secuencias de proteínas y ácidos nucleicos. Dentro de sus variantes está él: 1) Blastn, realiza una comparación de una secuencia nucleotídica con una base de datos de nucleótidos; 2) Blastx, para la selección de una secuencia de nucleótidos, se traduce y consulta en una base de datos de proteínas en un solo paso; 3) Blastp, realiza una comparación de una secuencia de proteínas con una base de datos de proteínas; 4) tBlastn, compara una secuencia proteica con una base de datos de nucleótidos; 5) tBlastx, compara las traducciones de una secuencia de consulta de nucleótidos contra las traducciones de una base de datos de secuencias de nucleótidos (Pertsemlidis A. y Fondon J. 2001).

Clustal es una serie de programas diseñados para comparar secuencias utilizando múltiples alineaciones para macromoléculas como ácidos nucleicos y proteínas, así como la generación de árboles filogenéticos para estudiar las relaciones evolutivas entre especies. Creado por Des Higgins en 1988, Clustal ha evolucionado para incluir tecnología más avanzada. El programa requiere que todas las secuencias tengan el formato GCG, FASTA, EMBL, GenBank, PIR, NBRF, Phylip o SWISS-PROT. Las variaciones de Clustal incluyen Clustal IV, ClustalW, ClustalIX, Clustal y Clustal 2 con mayor precisión y eficiencia (Larkin, et. al.,

2007; Sievers y Higgins, 2014; Thompson, et. al., 1994).

OMIM. Se trata de una base de datos de conocimientos integral referente a genes humanos y su relación con trastornos genéticos, contiene información de genes y fenotipos genéticos, específicamente enfermedades de relevancia para estudiantes, investigadores y médicos (OMIM, 2022). Sus antecedentes comienzan en 1960 como una trilogía de catálogos de fenotipos autosómicos recesivos y ligados al cromosoma X. Desde diciembre de 1995 se distribuye a todo el mundo a través del NCBI del NLM. También, su información se actualiza constantemente y su autoría y edición tiene como sede la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins (EUA).

HGMD. (Human Gene Mutation Database). La base de datos de mutaciones genéticas recopila de manera sistemática todas las patologías genéticas que se conocen atribuidas a procesos hereditarios publicados en la literatura científica. Establecido en 1996 con la finalidad de facilitar la investigación científica de los mecanismos mutacionales en genes humanos implicados en las enfermedades hereditarias y que, en los últimos 20 años, se ha transformado en un repositorio central unificado de la variación genética (Stenson et. al., 2020).

La convergencia entre la bioinformática, el aprendizaje automático, big data y la inteligencia artificial

La bioinformática (BI) es un campo interdisciplinario que combina biología, informática y matemáticas para analizar grandes volúmenes de datos biológicos. Se enfoca en diseñar y construir sistemas computacionales avanzados que faciliten la interpretación de la información biológica. Por su parte, la inteligencia artificial (IA), una rama de las ciencias computacionales, tiene como objetivo emular y automatizar comportamientos inteligentes mediante algoritmos y modelos matemáticos. Dentro de la IA, el

aprendizaje automático (AA, machine learning en inglés) y sus técnicas derivadas, como las redes neuronales profundas (NDR), juegan un papel fundamental en la resolución de problemas complejos. Estas herramientas permiten la identificación de patrones ocultos en datos masivos, como genomas, transcriptomas y proteomas.

La combinación de BI, IA, AA y el análisis de big data está revolucionando las ciencias médicas. Estas tecnologías posibilitan el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos para abordar problemas de salud complejos, desde el diagnóstico temprano de enfermedades hasta el desarrollo de tratamientos personalizados. Por ejemplo, las NDR se han utilizado con alta precisión para predecir mutaciones genéticas asociadas con el cáncer (Alvarado-Parra y Serrano-Gamboa, 2023; Gordon, 2022; Helmy et. al., 2020).

La inteligencia de big data es crucial para detectar tendencias a gran escala y diseñar estrategias efectivas de salud pública (Martínez-Martínez, 2022). Por ejemplo, el análisis de big data fue decisivo para responder a la pandemia de COVID-19 mediante el seguimiento en tiempo real de las variantes del virus y la optimización de la producción de vacunas mediante simulaciones de IA, permitiendo el desarrollo de productos farmacéuticos con el objetivo de reducir costos y tiempo.

Así, gracias a big data, AlphaFold, uno de los sistemas utilizados por DeepMind, ejecuta predicciones de proteínas en el laboratorio de manera virtual a partir de una secuencia de aminoácidos. En la Figura 1, se muestra una predicción molecular de la estructura de la nucleocápside del SARS-CoV-2 que aún se encuentra desconocida, pero que, a partir de la secuencia de aminoácidos, AlphaFold es capaz de construir un posible modelo.

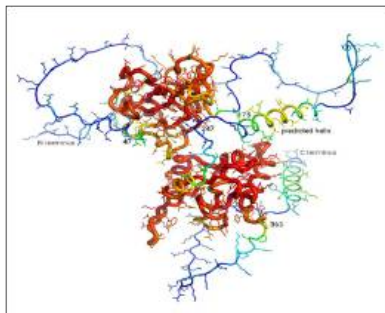


Figura 1. AlphaFold es un programa de DeepMind de la empresa Google, para la predicción de estructuras de proteína mediante el sistema de aprendizaje profundo. Esta figura muestra la predicción de AlphaFold para la nucleocápside del SARS-CoV-2. <http://bit.ly/4gQbfX5>

La bioinformática y la enseñanza de la bioquímica humana en el nivel superior

El empleo de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) y las tecnologías del aprendizaje y del conocimiento (TACS) son importantes para distintos usos del profesional de la medicina, desde actividades relacionadas con la investigación hasta la clínica e incluso para el área farmacéutica. El fin que se persigue en las ciencias médicas es el de emplear sus conocimientos para obtener la salud pública y en beneficio del bienestar humano. El trabajo clínico en hospitales y consultorios requiere de la generación, almacenamiento y análisis de un gran volumen de información, que con la ayuda de los dispositivos electrónicos y sus programas es posible llevar a cabo todo lo mencionado.

La bioinformática puede procesar datos genéticos y genómicos procedentes de la investigación biomédica y biotecnológica. Sus programas y bases de datos permiten la producción, el almacenamiento y el análisis de información, lo que conduce al desarrollo de las ciencias ómicas y el conocimiento del genoma humano. Esto ha dado lugar a una amplia gama de conocimientos que influyen en la salud, como las pruebas diagnósticas, la predicción de enfermedades, la medicina molecular, la medicina personalizada y la

terapéutica, especialmente en farmacogenética. Como se puede observar, son varias las razones que justifican el uso de la bioinformática en la práctica y la enseñanza médica.

Sin embargo, la inserción de la BI en los planes de estudio encuentra obstáculos. Por poner un ejemplo, en un estudio de Huerta-Ibarra del CINVESTAV (2019), se lleva a cabo una investigación documental para examinar qué escuelas de medicina a nivel licenciatura y posgrado incluyen la formación de informática biomédica en sus planes de estudio. La informática biomédica es la combinación de informática médica y bioinformática. Contrastando un estudio en los Estados Unidos de 2011, en donde se reportan 73 instituciones que enseñan 636 cursos relacionados con la informática biomédica, con las 40 instituciones que, en 2018, lo hacían en México (siete años después).

En sus palabras, se puede apreciar el relativo retraso, existiendo una carencia en la enseñanza de las TIC y de la informática biomédica (ni se diga para el caso de la BI). Esto genera un círculo vicioso donde, al no haber enseñanza, hay una cantidad baja de especialistas, un número reducido de investigaciones y de formación de estudiantes que repercuten en la salud social e incluso en la industria. Otra problemática es la falta de competencias digitales en el manejo de software, de competencias lingüísticas en el idioma inglés y de conocimientos en estadística, que complican aún más la implementación de la BI en medicina.

En contraste, en el mapa curricular de la licenciatura de médico cirujano de la facultad de Medicina de la Universidad Nacional autónoma de México (UNAM), se ofertan por lo menos dos cursos de informática biomédica, donde se ha incluido la bioinformática (Sánchez, 2015). En ese sentido, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla no puede ignorar los avances recientes de la bioinformática y la inteligencia artificial. Es por esto que se deben integrar cuidando que sean utilizados, enriqueciendo el aprendizaje de los contenidos de bioquímica humana, de manera que no causen rechazo en el estudiantado, con estrategias didácticas

como el aprendizaje basado en proyectos (PBL), la búsqueda guiada en el Internet (Webquest) y los visualizadores moleculares -desde el histórico RASMOL hasta los más recientes-, desarrollados por inteligencia artificial. Esto constituye un gran reto, pero debemos empeñarnos en lograrlo.



<https://medicina.buap.mx>

Conclusiones

La bioinformática (BI) es una tecnología que organiza, analiza y distribuye información para resolver problemas complejos en biología, utilizando datos matemáticos, estadísticos y computacionales. Está especializada en varios campos de la salud, incluyendo la medicina, la biomedicina y la práctica clínica. BI ha evolucionado de analizar estructuras moleculares de proteínas y ácidos nucleicos a utilizar visualizaciones moleculares en 3D y comparar genomas completos. También ha permitido la obtención de vacunas en poco tiempo y tiene el potencial de crear tratamientos personalizados, nuevos medicamentos y una comprensión más profunda de los factores celulares, moleculares y celulares involucrados en las enfermedades genéticas. La combinación de BI y las ciencias ómicas podría llevar a una mejor calidad de vida y a una sociedad sin enfermedades, similar a la utopía de Aldous Huxley de un mundo feliz.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Agradecimientos

Especial agradecimiento por la guía y apoyo en la realización de este trabajo al cuerpo académico del Doctorado en Sistemas y Ambientes Educativos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y en particular al Dr. Daniel Mocencahua Mora por el conocimiento compartido en el taller Escribir para Divulgar.

Referencias

- Ahmad, S., Mohd Noor, A. S., Alwan, A. A., Gulzar, Y., Khan, W. Z., & Reegu, F. A. (2023). eLearning Acceptance and Adoption Challenges in Higher Education. *Sustainability*, 15(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su15076190>
- Balamuralithara, B., & Woods, P. C. (2009). Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(1), Article 1. <https://doi.org/10.1002/cae.20186>
- Bjelica, M., & Simić-Pejović, M. (2018). Experiences with remote laboratory. *International Journal of Electrical Engineering & Education*, 55(1), 79–87. <https://doi.org/10.1177/0020720917750960>
- Cohen, E., & Nycz, M. (2006). Learning Objects and E-Learning: An Informing Science Perspective. *Interdisciplinary Journal of E-Learning and Learning Objects*, 2(1), 23–34.
- Cooper, M. (2005). Remote laboratories in teaching and learning – issues impinging on widespread adoption in science and engineering education. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (ijOE)*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v1i1.298>
- Fabregas, E., Farias, G., Dormido-Canto, S., Dormido, S., & Esquembre, F. (2011). Developing a remote laboratory for engineering education. *Computers & Education*, 57(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.02.015>
- Ferreira, P., Fidalgo, A., & Gericota, M. G. (2019). Pedagogical theories for e-learning engineering degrees based on remote laboratories: The e-lives approach.
- EDULEARN19 Proceedings 11th International Conference on Education and New Learning Technologies: Palma, Spain. 1-3 July, 2019, 2019,

Haque, E., Ahmed, F., Das, S., & Salim, K. M. (2015). Implementation of remote laboratory for engineering education in the field of Power electronics and Telecommunications. 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 213-216. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2015.7506834>

Hernandez, R. M. (2017). Impact of ICT on Education: Challenges and Perspectives. *Journal of Educational Psychology - Propósitos y Representaciones*, 5(1), 337-347.

INEGI. (2021). Encuesta para la Medición del Impacto COVID-19 en la Educación

(ECOVID-ED) 2020. <https://www.inegi.org.mx/investigacion/ecovided/2020/>

Muttappallymyalil, J., Mendis, S., John, L. J., Shanthakumari, N., Sreedharan, J., &

Shaikh, R. B. (2016). Evolution of technology in teaching: Blackboard and beyond in Medical Education. *Nepal Journal of Epidemiology*, 6(3), 588-594. <https://doi.org/10.3126/nje.v6i3.15870>

Pastor, R., Tobarra, L., Robles-Gómez, A., Cano, J., Hammad, B., Al-Zoubi, A.,

Hernández, R., & Castro, M. (2020). Renewable energy remote online laboratories in Jordan universities: Tools for training students in Jordan. *Renewable Energy*, 149, 749-759. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.100>

Roda-Segarra, J. (2021). Virtual Laboratories During the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review. 2021 XI International Conference on Virtual Campus (JICV), 1-4. <https://doi.org/10.1109/JICV53222.2021.9600344>

Santamaría-Sandoval, J. R., Chanto-Sánchez, E., & Soto-Calderón, M. (2022). Aplicación de laboratorios virtuales en la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones,

Siemens, G. (2005). Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age. *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, 2. http://www.itdl.org/Journal/jan_05/article01.htm

Soria, M., Fernandez, R., Gómez, M., Paz, H., Pozzo, M., DOBBOLETTA, E., Fidalgo, A., Alves, G., Sancristobal, E., Loro, F., Castro, M., & Diaz, G. (2017, septiembre 15). Perspectivas de los Laboratorios Remotos en la Educación Media y Superior de Santiago del Estero.

Stroeve, O. A., Zviagintceva, Y., Tokmakova, E., Petrukina, E., & Polyakova, O. (2019). Application of remote technologies in education. *International Journal of Educational Management*, 33(3), 503–510. <https://doi.org/10.1108/IJEM-08-2018-0251>

Thorsteinsson, S. E., Geirsdottir, G., Andersen, K., Thorbergsson, H., & Gudmundsson, K. S. (2018). Trial with a Remote Laboratory in Telecommunications Engineering. 2018 IEEE International Professional Communication Conference (ProComm), 74–79. <https://doi.org/10.1109/ProComm.2018.00026>

Van den Beemt, A., Groothuijsen, S., Ozkan, L., & Hendrix, W. (2023). Remote labs in higher engineering education: Engaging students with active learning pedagogy. *Journal of Computing in Higher Education*, 35(2), 320–340. <https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>



EDUCACIÓN EN EL ÁREA DE INGENIERÍA Y EL AVANCE ACELERADO DE LA TECNOLOGÍA

EDUCATION IN THE FIELD OF ENGINEERING AND THE ACCELERATED
ADVANCE OF TECHNOLOGY

Daniel Hernández-Rodríguez
Iván Olmos-Pineda
Josefina Castañeda-Camacho

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 151 - 163

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0009-0007-2622-8221>
<https://orcid.org/0000-0003-1698-000X>
<https://orcid.org/0000-0002-4356-1698>

Año 11, No. 31

Recibido: dd/mm/aaaa

Aprobado: 2/12/2024

Publicado: 20/01/2025

Facultad de Ciencias de la Computación
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Ciudad Universitaria, Av. San Claudio, Jardines de San Manuel
C.P. 72570, Puebla, Pue. México

daniel.hernandezrodr@alumno.buap.mx, ivan.olmos@correo.buap.
mx*, josefina.castaneda@correo.buap.mx

La tecnología ha experimentado un crecimiento exponencial, transformando los enfoques educativos y dando lugar a la implementación de nuevas herramientas de enseñanza. En el ámbito de las ingenierías, donde la adquisición de habilidades prácticas mediante el uso de laboratorios es fundamental, los espacios físicos se ven restringidos y limitados por diversas razones. Para resolver parte de esta problemática, surgen los laboratorios remotos basados en los entornos virtuales de aprendizaje. La pandemia causada por el virus SARS-CoV-2 aceleró la aceptación de estos entornos, optimizando el aprendizaje en línea y rediseñando las herramientas digitales, abriendo además la posibilidad de generar laboratorios remotos para superar las limitaciones de los métodos tradicionales. Sin embargo, en la perspectiva educativa es evidente la falta de adaptación al uso de herramientas diferentes a las tradicionales, siendo relevante la actualización de los modelos de enseñanza y planes educativos para una óptima implementación de laboratorios remotos que reduzcan la carencia de habilidades adquiridas regularmente en los espacios e interacciones físicas, tales como la comunicación y el trabajo en equipo. En el presente trabajo se muestra un resumen sobre lo que son los entornos virtuales y los laboratorios remotos, así como las ventajas y retos implicados.

Palabras clave: Laboratorio remoto, Tecnología educativa, Educación a distancia, COVID-19, conectivismo.

Abstract

Technology has grown exponentially, reshaping educational trends and fostering the widespread adoption of innovative learning tools. In engineering, where acquiring practical skills in laboratories is crucial, physical spaces frequently face constraints and limitations due to various factors. In response to these constraints, remote laboratories based on virtual learning environments have emerged as a solution. The SARS-CoV-2 pandemic has accelerated the acceptance of these environments, optimizing e-learning and prompting a redesign of digital tools. This underscores the relevance of enhancing remote laboratories' implementation to overcome traditional methods' limitations. It's important to note, though, that the education field hasn't changed much to use non-traditional tools. This means that teaching models and lesson plans need to be updated for remote laboratories to work best. This would enable us to address the deficiency in skills typically acquired through face-to-face spaces and interactions, such as communication and teamwork. We present a summary of virtual environments and remote laboratories, outlining their definitions, advantages, and challenges.

Keywords: Remote Laboratory, Educational Technology, e-learning, COVID-19, connectivism



Impacto de la pandemia y migración a entornos virtuales

El impacto global a causa de la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2 generó una adaptación en la forma de ejecutar nuestros procesos de educación, trabajo y socialización. Incorporando el uso de herramientas digitales que suplantaron las herramientas físicas que eran parte de nuestro día a día, en particular, en la educación, se migró a las clases virtuales mediante plataformas de aprendizaje como Google Classroom y Microsoft Teams y software de videoconferencias como Zoom y Google Meet. Además de plataformas digitales para optimizar la interacción durante las clases, como software de evaluaciones didácticas o juegos educativos en línea.



<https://www.educalinkapp.com/blog/entornos-virtuales-de-aprendizaje-que-son-y-cuales-son-sus-ventajas/>

La sorpresiva inmediatez de este cambio, sumado a la falta de experiencia en el uso de estas herramientas, mostró que para resolver los problemas causados por la imposibilidad de utilizar espacios físicos presenciales no basta con la migración a herramientas de enseñanza en línea, sino que se requieren diversas adaptaciones a los modelos educativos (Roda-Segarra, 2021).

Tan solo en México se considera que existen dos años de rezago escolar, además de que el 26.6% de alumnos que dejaron la escuela fue debido a que consideraron que la forma en que se implementaron las herramientas virtuales no fue adecuada o efectiva (INEGI, 2021). Lo cual crea un área de oportunidad para optimizar estos

ambientes y procesos, de forma que se pueda combatir la deserción escolar.

Desde la perspectiva opuesta, este impacto llevó también a que socialmente se aumentara la aceptación del trabajo y la educación a distancia. Actualmente, es muy común realizar reuniones por medio de plataformas de videollamadas, impartir clases de forma remota a estudiantes de cualquier país o tomar un curso que sea impartido en un lugar lejano de forma virtual.

Esto ha generado un crecimiento del aprendizaje en línea, el cual está definido como el uso de un dispositivo conectado a Internet para adquirir conocimientos sin importar el lugar ni el momento. Este tipo de educación está acompañada generalmente de los Sistemas de Gestión del Aprendizaje (Learning Management System o LMS, por sus siglas en inglés), los cuales son plataformas que ofrecen una gran cantidad de herramientas para entregar el conocimiento, siendo un complemento o en algunos casos un suplemento del aprendizaje presencial en escuelas y universidades (Ahmad et al., 2023).

Los LMS se encuentran en las plataformas que ofrecen cursos en línea y son aquellos que permiten gestionar el contenido del curso, visualizar la información de manera ordenada, generar foros de debate, compartir resultados con los demás participantes, entre otras opciones. Por ejemplo, en la Figura 2 se muestra un esquema de organización para un centro de educación en línea.

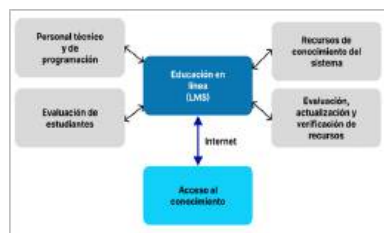


Figura 2. Esquema de organización para un centro de educación en línea. Realización propia basada

en (Cohen & Nycz, 2006)

Si juntamos la tendencia creciente de

la implementación de tecnología en la educación y la confianza depositada en los entornos virtuales posterior a la pandemia, se aumenta la pertinencia de desarrollar, mejorar y construir laboratorios remotos, cuyo concepto no es nuevo ni exclusivo de un área en particular. De forma general, el aprendizaje remoto es aquel que puede ser accesible desde cualquier parte del mundo, con el único requisito de tener acceso a una conexión de Internet. En el caso particular de los laboratorios remotos, se definen como aquellos que existen físicamente, pero que pueden ser manipulados a distancia por medio del uso de una computadora conectada a Internet desde cualquier parte del mundo para llevar a cabo experimentos reales (Bjelica & Simić-Pejović, 2018).

La evolución hacia estos ambientes virtuales permite acercar la educación a personas que no podrían tener acceso a un laboratorio físico o para las que ese acceso podría estar limitado debido a ciertos factores, dentro de los cuales se identifica su ubicación geográfica, falta de acceso a universidades con laboratorios equipados o estudiantes con

algún tipo de discapacidad. A su vez, la carencia en el uso de laboratorios en la formación académica de los ingenieros impacta directamente en la adquisición de conocimientos y puesta en práctica del aprendizaje.

Los entornos virtuales ofrecen flexibilidad en la forma de estudiar, debido a que los LMS fomentan el proceso de individualización del aprendizaje. Según Santamaría-Sandoval et al. (2022), esta flexibilidad en la gestión del conocimiento y la variedad que existe en los medios para recibir información hacen imprescindible y necesaria la migración a modelos totalmente virtuales, principalmente en los cursos que tienen una duración larga como es el caso de asignaturas universitarias (Bjelica & Simić-Pejović, 2018). Estas características se asemejan con las propuestas en el paradigma educativo conocido como conectivismo planteado por Siemens (2005), el cual se basa en la consideración de que todo está conectado, incluido el conocimiento. Por lo tanto, el aprendizaje reside fuera del aprendiente, requiriendo desarrollar habilidades que permitan localizar ese

conocimiento mediante la creación de conexiones entre fuentes de información, fomentando que los estudiantes analicen la información y decidan lo que les será útil para resolver los problemas planteados.

Laboratorios remotos y entornos virtuales

Los entornos virtuales, debido a su naturaleza de implementación a distancia, llevan a los estudiantes a un aprendizaje activo en el cual ellos son los encargados de construir el conocimiento, causando que sean los responsables de su propio proceso educativo mediante tareas formativas dictadas por los educadores en un rol de facilitadores de conocimiento, generando en los alumnos un proceso de reflexión, retroalimentación e interiorización de lo aprendido (Van den Beemt et al., 2023). Sumado a estas ventajas, el uso de laboratorios ayuda a reducir la brecha existente entre la industria y la educación (Pastor et al., 2020).

En torno a las simulaciones y los laboratorios remotos, que son las opciones principales de migración de laboratorios tradicionales a espacios virtuales, es importante considerar sus ventajas y retos. De acuerdo con Haque et al. (2015), las simulaciones tienen la principal desventaja de no ser capaces de recrear experiencias de aprendizaje prácticas. Principalmente, debido a que no son una representación confiable del mundo real; en tanto que, algunos de los principales beneficios de implementar laboratorios remotos son su uso en horarios extendidos y sin la limitación de la necesidad de que los estudiantes estén de forma presencial en un campus universitario.

Además de que no requieren la supervisión y el tiempo de un laboratorista o docente mientras se realizan las prácticas, lo que genera un ahorro en el costo de implementación en comparación con un laboratorio estándar. Los casos donde es recomendable migrar de un software de simulación a un laboratorio remoto, según Cooper (2005), son los que conllevan un análisis y observación de datos no ideales, estudio de un caso

complejo donde no se puede confiar en sistemas de simulación simplificados o aquellos en donde se tienen limitaciones en la potencia del procesamiento de un simulador.

Las estructuras generales de este tipo de laboratorios en el área de ingeniería implican inicialmente que los estudiantes puedan agendar una sesión de uso del laboratorio remoto las 24 horas del día y los 7 días de la semana, dependiendo de la disponibilidad del mismo.

En torno a la implementación física, incluyen hardware que puede ser controlado o programado a distancia mediante una computadora conectada de forma remota a un equipo ubicado en el mismo espacio geográfico que el hardware a controlar. Esto puede ser realizado mediante un software de acceso remoto.

Para aplicaciones especializadas, el hardware deberá contar además con el equipo necesario para medir y ejecutar las prácticas diseñadas en este entorno.

Es necesario incluir una cámara web que le permita al estudiante visualizar en tiempo real el funcionamiento del hardware que está controlando. En la Figura 3 se muestra un diagrama de un laboratorio remoto, donde se puede observar el hardware, el equipo a ser controlado de forma remota y el estudiante que realiza la práctica.

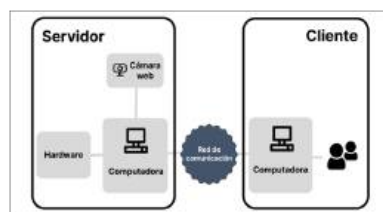


Figura 3. Esquema de una arquitectura de laboratorio remoto. Elaboración propia

Existen diversas publicaciones de la aplicación de este tipo de espacios en la enseñanza de ingenierías, sin embargo, en la mayoría de estas no se presentan adecuaciones respecto a la parte educativa de estas implementaciones y los análisis se enfocan en la aceptación y uso que tienen los laboratorios remotos

por parte de los estudiantes y maestros mediante el uso de cuestionarios y entrevistas, pero no evalúan el proceso de educación. Los resultados mostrados por Thorsteinsson et al. (2018), Soria et al. (2017) y Santamaría-Sandoval et al. (2022) son positivos en la adaptación y aceptación que tienen los profesores y alumnos; también se muestra que la cantidad promedio de intentos para realizar una práctica en el caso de un laboratorio enfocado en el área de ingeniería electrónica es de 2.2 sesiones por estudiante (Bjelica & Simić-Pejović, 2018), reforzando la ventaja que tienen los estudiantes de repetir las prácticas tantas veces como sea necesario.

Soria et al. (2017) menciona que el concepto de un laboratorio remoto es positivo desde el punto de vista pedagógico; por otro lado, se considera que en algunos parámetros como el trabajo en equipo y la comunicación profesor-alumno y alumno-alumno se podrán presentar carencias de habilidades.

Por ello, se deben desarrollar diversas herramientas que cubrirán estas necesidades, tales como los LMS, los cuales según Bjelica & Simić-Pejović (2018) tienen una tendencia creciente de ser implementados junto con los laboratorios remotos, ya que permiten establecer comunicación entre los participantes, así como diseños instruccionales que permitan adecuar los entornos y herramientas educativas a este tipo de soluciones.

Para Pastor et al. (2020), el desarrollo de los cursos con laboratorios remotos deberá incluir en su desarrollo cinco puntos importantes: Estructura de diseño, contenido, recursos, instructores y calidad, con el objetivo de poder construir educación de calidad para entornos en línea.

Adicionalmente, para Ferreira et al. (2019), el aprendizaje en línea debe estar basado en descomponer el contenido de los cursos en una secuencia de pequeños temas, establecer objetivos relacionados con los resultados de aprendizaje, brindar retroalimentación posterior a cada práctica, dar independencia a los aprendientes y apoyarse del contenido previo para construir conocimiento nuevo.

Para Stroeve et al. (2019), la efectividad del aprendizaje remoto radica en el entendimiento profundo del contenido o el módulo que se planea enseñar y la calidad de la información presentada, siendo los programas en línea el futuro para la enseñanza de la educación en nivel superior. Para Cooper (2005), se requiere el planteamiento de objetivos para decidir cuáles son los experimentos que deben ser trasladados a un entorno remoto, como debe ser el diseño de la interfaz, el uso del espacio remoto, la accesibilidad del entorno, las herramientas de colaboración y el andamiaje educativo o scaffolding.

Finalmente, no todo es positivo; también es importante considerar que la resistencia al cambio o la poca motivación por implementar nuevas herramientas pueden ser factores por considerar para la correcta incorporación de herramientas virtuales.

En el estudio realizado por Soria et al. (2017), por ejemplo, se concluye que en su muestra conformada de estudiantes y docentes de educación media y superior, el 71.3% de los profesores mostraron poco interés o desconocimiento sobre los laboratorios remotos.

Conclusión

Con base en lo expuesto en el presente trabajo, se concluye la necesidad de implementación de herramientas digitales en el ámbito educativo y el ajuste de nuestros métodos de enseñanza-aprendizaje-evaluación, como parte de los retos que estos ambientes nos presentan, para optimizar estos procesos y mejorar la calidad educativa.

Esto se debe a la inevitabilidad del avance de la virtualización a nivel global y su influencia en los diversos aspectos que componen nuestra vida cotidiana. Adicionalmente y posterior a la pandemia, se ha observado que el incremento en el uso y en el desarrollo de herramientas virtuales y remotas aumentó de forma exponencial.

No obstante, no es suficiente solamente con aprender a utilizar estas herramientas e implementarlas en la educación, sino que se tiene que generar conciencia de las adaptaciones necesarias en los modelos educativos vigentes.

conocimiento y posibilita la reducción de brechas educativas originadas por factores como la accesibilidad, limitaciones físicas de las personas o restricciones geográficas.

Finalmente, el uso de herramientas remotas contribuye a la individualización del

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Declaración de no conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Agradecimientos

Especial agradecimiento por la guía y apoyo en la realización de este trabajo al cuerpo académico del Doctorado en Sistemas y Ambientes Educativos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y en particular al Dr. Daniel Mocencahua Mora por el conocimiento compartido en el taller Escribir para Divulgar.

Referencias

- Ahmad, S., Mohd Noor, A. S., Alwan, A. A., Gulzar, Y., Khan, W. Z., & Reegu, F. A. (2023). eLearning Acceptance and Adoption Challenges in Higher Education. *Sustainability*, 15(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su15076190>
- Balamuralithara, B., & Woods, P. C. (2009). Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(1), Article 1. <https://doi.org/10.1002/cae.20186>
- Bjelica, M., & Simić-Pejović, M. (2018). Experiences with remote laboratory. *International Journal of Electrical Engineering & Education*, 55(1), 79–87. <https://doi.org/10.1177/0020720917750960>
- Cohen, E., & Nycz, M. (2006). Learning Objects and E-Learning: An Informing Science Perspective. *Interdisciplinary Journal of E-Learning and Learning Objects*, 2(1), 23–34.
- Cooper, M. (2005). Remote laboratories in teaching and learning – issues impinging on widespread adoption in science and engineering education. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (ijOE)*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v1i1.298>
- Fabregas, E., Farias, G., Dormido-Canto, S., Dormido, S., & Esquembre, F. (2011). Developing a remote laboratory for engineering education. *Computers & Education*, 57(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.02.015>
- Ferreira, P., Fidalgo, A., & Gericota, M. G. (2019). Pedagogical theories for e-learning engineering degrees based on remote laboratories: The e-lives approach.
- EDULEARN19 Proceedings 11th International Conference on Education and New Learning Technologies: Palma, Spain. 1-3 July, 2019, 2019,

Haque, E., Ahmed, F., Das, S., & Salim, K. M. (2015). Implementation of remote laboratory for engineering education in the field of Power electronics and Telecommunications. 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 213-216. <https://doi.org/10.1109/ICAEE.2015.7506834>

Hernandez, R. M. (2017). Impact of ICT on Education: Challenges and Perspectives. *Journal of Educational Psychology - Propósitos y Representaciones*, 5(1), 337-347.

INEGI. (2021). Encuesta para la Medición del Impacto COVID-19 en la Educación

(ECOVID-ED) 2020. <https://www.inegi.org.mx/investigacion/ecovided/2020/>

Muttappallymyalil, J., Mendis, S., John, L. J., Shanthakumari, N., Sreedharan, J., &

Shaikh, R. B. (2016). Evolution of technology in teaching: Blackboard and beyond in Medical Education. *Nepal Journal of Epidemiology*, 6(3), 588-594. <https://doi.org/10.3126/nje.v6i3.15870>

Pastor, R., Tobarra, L., Robles-Gómez, A., Cano, J., Hammad, B., Al-Zoubi, A.,

Hernández, R., & Castro, M. (2020). Renewable energy remote online laboratories in Jordan universities: Tools for training students in Jordan. *Renewable Energy*, 149, 749-759. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.100>

Roda-Segarra, J. (2021). Virtual Laboratories During the COVID-19 Pandemic: A Systematic Review. 2021 XI International Conference on Virtual Campus (JICV), 1-4. <https://doi.org/10.1109/JICV53222.2021.9600344>

Santamaría-Sandoval, J. R., Chanto-Sánchez, E., & Soto-Calderón, M. (2022). Aplicación de laboratorios virtuales en la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones,

Siemens, G. (2005). Connectivism: A Learning Theory for the Digital Age. *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, 2. http://www.itdl.org/Journal/jan_05/article01.htm

Soria, M., Fernandez, R., Gómez, M., Paz, H., Pozzo, M., DOBBOLETTA, E., Fidalgo, A., Alves, G., Sancristobal, E., Loro, F., Castro, M., & Diaz, G. (2017, septiembre 15). Perspectivas de los Laboratorios Remotos en la Educación Media y Superior de Santiago del Estero.

Stroevea, O. A., Zviagintceva, Y., Tokmakova, E., Petrukina, E., & Polyakova, O. (2019). Application of remote technologies in education. *International Journal of Educational Management*, 33(3), 503–510. <https://doi.org/10.1108/IJEM-08-2018-0251>

Thorsteinsson, S. E., Geirsdottir, G., Andersen, K., Thorbergsson, H., & Gudmundsson, K. S. (2018). Trial with a Remote Laboratory in Telecommunications Engineering. 2018 IEEE International Professional Communication Conference (ProComm), 74–79. <https://doi.org/10.1109/ProComm.2018.00026>

Van den Beemt, A., Groothuijsen, S., Ozkan, L., & Hendrix, W. (2023). Remote labs in higher engineering education: Engaging students with active learning pedagogy. *Journal of Computing in Higher Education*, 35(2), 320–340. <https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>



LA BUAP EN LA DÉCADA DE LOS OCHENTA

BUAP IN THE EIGHTIES

Gloria A. Tirado Villegas

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 164 - 175

RD-ICUAP

<https://orcid.org/0000-0003-4775-0653>

Año 11, No. 31

Recibido: 4/Noviembre/2024

Aprobado: 8/Diciembre/2024

Publicado: 20/Enero/2025

Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades-BUAP
gtiradovillegas@gmail.com

Este artículo analiza el contexto político y educativo en el que la Universidad Autónoma de Puebla impulsó de manera decisiva la investigación científica y los estudios de posgrado en esta institución. A partir del movimiento estudiantil de 1968, una izquierda heterogénea modifica sustancialmente las funciones universitarias de docencia, investigación y extensión en el proceso conocido como Segunda Reforma Universitaria. Cuando el químico Sergio Flores Suárez es electo rector de la Universidad, las confrontaciones con el Frente Universitario Anticomunista no se hicieron esperar. Los años siguientes fueron difíciles en un ambiente universitario polarizado en que la investigación empieza a ocupar un lugar importante. En 1974 se crea el Instituto de Ciencias de la Universidad Autónoma de Puebla (ICUAP). En 1975 asume la rectoría el ingeniero Luis Rivera Terrazas con el programa Universidad Democrática, Crítica y Popular. Consolidar el ICUAP fue una prioridad y el instituto crece en cantidad de investigadores, en proyectos y recursos. En este proceso, anterior al de los años ochenta, destacan investigadores e investigadoras comprometidos con la institución, son quienes después crean los centros de investigación. Asimismo, son jóvenes investigadores con doctorado quienes crean y desarrollan el posgrado de Química, una instancia de investigación que ha formado varias generaciones

Palabras clave: : Universidad pública, movimiento estudiantil, investigación, posgrados, reforma universitaria

Abstract

This article analyzes the political and educational context in which the Autonomous University of Puebla decisively promoted scientific research and postgraduate studies at this institution. Beginning with the student movement of 1968, a heterogeneous left substantially modified the university's functions of teaching, research, and extension in the process known as the Second University Reform. When the chemist Sergio Flores Suárez was elected rector of the University confrontations with the Anti-Communist University Front were not long in coming. The following years were difficult in a polarized university environment in which research began to occupy an important place. The Universidad Autónoma de Puebla established the Institute of Sciences (ICUAP) in 1974. In 1975, engineer Luis Rivera Terrazas assumed the rectorship with the Democratic, Critical, and Popular University program. Consolidating the ICUAP was a priority, and the institute grew in number of researchers, projects, and resources. In this process, which precedes the 1980s, there are researchers who are committed to the institution and who later create the research centers. Likewise, young researchers with doctorates are those who create and develop the Chemistry postgraduate program, a research institution that has trained several generations.

Keywords: Public university, student movement, research, postgraduate studies, university reform

Los impetus de la chaviza

Para situar la década que abordaré debo recurrir al 68. Utilizo un término coloquial de la época, la chaviza, para referirme a los jóvenes, porque cuando nos asomamos al mundo de los estudiantes a veces los imaginamos con una visión romántica y homogénea. Lo difícil es comprender la heterogeneidad de ideas y de prácticas políticas y sociales. Hablamos de una generación sin ver las diferencias de actitud por la edad y el grado de estudios. Las reacciones no son las mismas entre los jóvenes preparatorianos y los que estudian en el nivel superior, y aún no he mencionado a los de posgrado. El término chaviza se refiere a la confrontación de ideas nuevas, la de los jóvenes, los chavos, con las de generaciones anteriores, la momiza, las autoridades.

Al analizar los años ochenta me enfrento a un problema de periodización: es una década que no se puede separar de 1968 en la historia universitaria por los efectos que este movimiento tuvo; fue el más importante en la historia de nuestro país y el segundo después de la Revolución Mexicana, no por la represión del 2 de octubre y el número de presos políticos, sino por ser un movimiento que luchó por la libertades democráticas, por el derecho a la educación de tantos jóvenes que deseaban estudiar como la única forma de alcanzar una movilidad social. Muchos de esos estudiantes fueron los primeros de su familia en llegar a estudios superiores.

Nuestra Universidad era pequeña entonces, apenas 10,500 alumnos asistían a ella y, desde luego, no todos participaron en el movimiento. Dos corrientes políticas se confrontaban entre pasiones y golpizas. Durante el movimiento del 68 pareció haber una tregua, pero en los años setenta reaparecieron nuevamente esas fuerzas en el escenario: los democráticos y de izquierda, por un lado, y los del Frente Universitario Anticomunista. Los democráticos aumentaron sus simpatizantes durante el movimiento y, además, los

comités de huelga se transformaron en comités de lucha. Por consiguiente, la izquierda combativa creció: ya no solo eran democráticos y liberales, sino una izquierda heterogénea. La confrontación entre los grupos fue cada vez más ríspida en la medida en que los democráticos ganaron espacios en el Consejo Universitario. Así, en las elecciones para rector del 10 de junio de 1972 lograron que el químico Sergio Flores Suárez quedara como rector interino y el 10 de septiembre de ese año fuera electo rector. Como saben, el químico Flores Suárez era militante comunista. Desde luego, su elección no fue bien vista ni por la derecha ni por el gobierno. Años después, en una entrevista que el ingeniero Luis Rivera Terrazas concedió a la investigadora Florencia Correas rememoró cómo se había ganado la rectoría. 1

A principios de los años setenta llegamos a lo que podría llamarse un poder de alianza entre liberales y comunistas. Los primeros estaban encabezados por el rector interino, el abogado Martín Carbajal Caro, y junto con él estaban Marco Antonio Rojas, el Lic. Nicandro Juárez, el Lic. Juan José Barrientos. En alianza con ellos derrotamos al grupo de "La Salerosa", que mantenía estrecha relación con el entonces gobernador Moreno Valle. En 1972 formábamos una fuerza bien estructurada. (...) En el fondo eran más oportunistas que liberales, sin embargo, liberales. Nosotros nombramos al químico Sergio Flores como rector interino. Sergio Flores era comunista, pero en ese momento no había gente que pudiese hacer frente al compromiso y ellos lo sabían (Correas, 1989, 27).

Así que los primeros años setenta estuvieron enmarcados en el ambiente internacional conocido como Guerra Fría, en el que la confrontación con la derecha se agudizó. Aunque dentro de la Universidad no eran numerosos los integrantes de la Federación Estudiantil Universitaria, organización afín al Frente Universitario Anticomunista (FUA) sí lo eran fuera de ella porque además del FUA estaban el Yunque, el gobernador, la Junta de Mejoras y el empresariado,

a quienes se agregaban los medios de comunicación.

La autonomía de la Universidad Autónoma de Puebla fue defendida por diferentes grupos organizados, por los comités de lucha y muchos estudiantes, una chaviza que entonces soñaba cambiar el mundo y arriesgaba la vida; sabía que se podía enfrentar con grupos de porros cercanos al gobernador. Un movimiento estudiantil pujante, convencido de modificar su entorno. En esos días casi todo el mundo hablaba del inicio de una nueva era de igualdad, de educación democrática. El nacimiento de la Preparatoria Popular Emiliano Zapata en 1969 había sido una grata experiencia, un laboratorio de lo que vendría después; sus profesores fundadores dieron clases durante dos años sin cobrar salarios. En muchos momentos era un movimiento estudiantil popular, de apoyo a los campesinos, a los obreros, a los vendedores ambulantes. Lo que ahora nos piden como pertinencia social se hacía de diferentes formas.

La Universidad necesitaba impulsar la investigación. Los inicios se fincan en el rectorado de Sergio Flores Suárez, cuando se crea el Instituto de Ciencias de la UAP, (ICUAP) en 1974. El primer director del Instituto fue el ingeniero Luis Rivera Terrazas. La investigación se impulsa sustancialmente con el programa Universidad Democrática Crítica y Popular que dio a conocer durante su campaña para rector el ingeniero Rivera Terrazas en 1975 y con el que gana las elecciones. En el ICUAP, además de crearse las áreas de Física, Microcomputadoras, Semiconductores y Fisicoquímica, se fundan varios centros de investigación social: el Centro de Investigaciones de Historia del Movimiento Obrero; el Centro de Estudios Históricos y Sociales; el Centro de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas y el Departamento de Filosofía y Letras. En todos ellos se impulsaría la formación de investigadores y la investigación propiamente dicha (Terrazas, 1978, 50-54).

Lo que se logró con el químico Sergio Flores fue muy importante pese a

todos los avatares que enfrentó, como la retención de subsidio y asesinatos no esclarecidos hasta la fecha. Baste recordar lo ocurrido en 1972: a los asesinatos de Joel Arriaga Navarro, el 20 de julio, y de Enrique Cabrera Barroso, el 20 de diciembre, siguieron los del 1 de mayo de 1973: francotiradores disparan contra los estudiantes; se escuchan detonaciones que provienen de edificios aledaños a la Universidad, incluso de una torre de la Catedral (a dos calles del edificio central), otras desde el edificio Samborn's, a tres cuartas. Las balas fueron certeras, disparadas con precisión por armas de alto poder. Eran sicarios. Como consecuencia del ataque murieron cuatro personas: tres estudiantes, Víctor Manuel Medina Cuevas, Enrique González Romano, José Norberto Suárez Lara, y un profesor, Alfonso Calderón Moreno, de estos hechos los analiza la autora (Tirado, 2017, 35-47).. La versión difundida por los periódicos afirmaba que los disparos los iniciaron los estudiantes.

En los medios de comunicación se culpó a los comunistas y, sobre todo, se señaló al ingeniero Luis Rivera Terrazas como el actor intelectual de los sucesos, a pesar de que ese día él estaba trabajando en el Observatorio de Tonantzintla, Puebla. Los desplegados publicados, firmados por distintas organizaciones, culparon a los comunistas, incluso a Alfonso Calderón Moreno. Por la creciente exigencia de esclarecimiento de los hechos que hicieron los universitarios el gobernador Gonzalo Bautista O'Farril tuvo que dimitir a la gubernatura. No obstante, el 18 de mayo se publica un desplegado en El Sol de Puebla, que dice:

"LA UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA DEL ESTADO DE PUEBLA, CONSCIENTE DE TODO LO ANTERIOR, PRETENDE DAR CONTINUIDAD A LA FORMACIÓN INTEGRAL DEL JOVEN LOGRANDO QUE EL ESTUDIANTE ALCANCE SU PLENA INTEGRACIÓN SOCIAL, REALIZÁNDOSE COMO HOMBRE Y PROYECTÁNDOSE COMO PROFESIONISTA DIRIGENTE, CONOCEDOR DE QUE LA CULTURA DEBE ESTAR AL SERVICIO DEL

PUEBLO QUE LO SOSTIENE.”²

A finales del mes de mayo se publicó la convocatoria para las inscripciones en la UPAEP con su oferta de carreras.

Todas esas tensiones y problemas –que no terminarían ahí– no impidieron que una vida cultural activa, alternativa, se desarrollara en la institución universitaria. Eran muchos los activistas y había cineclubes, conciertos, encuentros y muchas actividades que se enriquecían en los contactos con embajadas, con muchas experiencias de gente que vino de la UNAM y de otras universidades del interior del país. Después llegaron los chilenos, argentinos, etc. Difusión Cultural emprendió programas interesantes y formó a generaciones de jóvenes.³ La violencia tampoco evitó la titulación de egresados de varias generaciones de distintas carreras, salvo en Administración de Empresas y en Arquitectura, que se separaron de la Universidad para fundar la UPAEP.

Por supuesto, esa generación de jóvenes se había formado con un pensamiento crítico, de justicia social y sufrieron los embates de la derecha. Eric Hobsbawm explica: “el marxismo había sido siempre una crítica revolucionaria del statu quo con serias pretensiones intelectuales, y no tardó en establecerse como la crítica más influyente y dominante de todas” (Hobsbawm, 2011, 353). La influencia del marxismo estaba presente en mucha literatura. Para la feminista Bell Hooks, “Pensar ya es una acción. Para todos los intelectuales en ciernes, los pensamientos son el laboratorio en el que se formulan preguntas y se encuentran respuestas.” (Hooks, 2022, 17). Pero el motor del pensamiento está en la acción, en la praxis de esos jóvenes y en los referentes de la memoria de los movimientos que antecedieron, los de 1961 y 1964.

Una universidad democrática, crítica y popular

Los jóvenes democráticos y de izquierda, más allá de quiénes elaboraron ese programa, cerraron filas en torno a esos

conceptos que se volvieron simbólicos. Había muchos estudiantes y profesores que comulgaban con la reforma universitaria porque esta se podía entender como cambios de planes y programas de estudio, creación de nuevas carreras, nuevas formas de organizar las academias, formas de dirigir las escuelas, ampliación de la matrícula, impulso a la investigación.

En síntesis, inquietudes para construir una nueva Universidad, El ICUAP, que se fundó en 1974 con el empuje y dirección del ingeniero Rivera Terrazas, se desarrolla desde 1975. Surgió con 26 investigadores y 18 auxiliares, varios de ellos egresados de Física o Matemáticas. Fueron pocos quienes salieron a estudiar un posgrado en el extranjero y regresaron a su alma mater a trabajar en la investigación. El segundo director del ICUAP fue Jaime Kravzov Jinich, un destacado científico en el área de Química.⁴

Es a partir de 1976 que se incorporan o crean varios departamentos y centros: el Departamento de Matemáticas, el Departamento de Aplicación de Microcomputadoras. Con el apoyo del doctor Alfred Zehe, entonces investigador de la Universidad Técnica de Dresden, República Democrática Alemana, se funda el laboratorio de Luminiscencia, núcleo del área del Departamento de Física del Estado Sólido.

El Centro de Investigaciones de Historia del Movimiento Obrero se adscribió al ICUAP desde 1975 y entre 1977 y 1978 se incorpora el Centro de Investigaciones Históricas Sociales e inicia sus actividades el Centro de Ciencias del Lenguaje (Veinticinco, 2003, 9). En 1980 se integra el Departamento de Investigaciones de Ciencias Fisiológicas, aunque desde 1976 la Fisiología se había desarrollado sólo en el plano docente.

En 1981 se incorporó al ICUAP el Departamento de Investigaciones Biomédicas y se reincorporan al Departamento de Investigaciones de Arquitectura Urbana los integrantes que realizaron sus estudios de posgrado en el extranjero

El proyecto de Universidad Democrática, Crítica y Popular ponía énfasis en la investigación y en la divulgación de la ciencia; promovía actividades culturales y conmemoraba algunas fechas. El compromiso social se expresaba de distintas formas; por ejemplo, el Colegio de Antropología e Historia invitaba a los pasantes de las diferentes escuelas de la UAP a realizar sus tesis o el servicio social en alguna rama que fuese de beneficio al pueblo. El proyecto consistía en realizar investigaciones en el campo social y en todos los aspectos, como en el económico y el médico.⁵

Todavía en la década de los ochenta se crearon nuevos centros de investigación, como el Centro de Estudios Contemporáneos, coordinado por el doctor Enrique Semo Calev, quien llegó con un equipo de investigadores de la UNAM. Este fue el último centro de investigación en el área de Humanidades.

Como impulso a la investigación se promovió que los jóvenes investigadores que ingresaban a los departamentos y centros estudiaran posgrados y, al mismo tiempo, que se incorporara en ellos investigadores posgraduados que estuviesen realizando investigaciones; de esta manera se consolidarían sus áreas. Lograr mejores relaciones con el gobierno del estado ayudó a destensar el ambiente polarizado y a obtener mayor apoyo económico del gobernador Alfredo Toxqui de Lara. La creación del CONACYT en 1970 llegó a cubrir una importante función pues se requerían recursos suficientes.

En el orden político internacional hubo golpes de estado en varios países latinoamericanos, rechazados por las autoridades, estudiantes y profesores nuestra alma mater, que se solidarizaron con la población. El movimiento estudiantil salió a manifestarse con volantes, pintas y actividades político culturales que denunciaban la política imperialista de Estados Unidos.

Un somero resumen podría decir que después del golpe militar en Chile, ocurrido en septiembre de 1973, el gobierno mexicano alojó a varios exiliados. Los chilenos llegaron poco a poco y algunos fueron a trabajar a otras partes del país. Los que tenían una carrera se ubicaron pronto, como Dino Gnecco en la Escuela de Ciencias Químicas,⁶ por mencionar a uno, pero llegaron varios intelectuales y científicos que influyeron en la construcción de la Universidad.

La gestión rectoral del ingeniero Terrazas en su primera fase, entre el 10 de septiembre de 1975 y el 3 de mayo de 1976, se desarrolló en un ambiente de creciente tensión y provocación que culminó el 27 de abril de 1976 con el asalto al edificio Carolino. Así, cuando llegó el siguiente grupo de exiliados se encontró una Universidad con libertad de expresión, de pensamiento, pero polarizada internamente por las confrontaciones derivadas de la toma del edificio Carolino. Al inicio no fue fácil que entendieran lo que sucedía en una institución que estaban por conocer (Tirado, 2024, 511-520).

Los momentos esterales de posgrados

En los años ochenta el escenario universitario cambió; las políticas públicas también cambiaron. Comencemos por las elecciones para rector. En 1981 ganó la rectoría el licenciado Alfonso Vélez Pliego; su periodo comprendió de 1981 a 1984 y lograría reelegirse por un periodo más.

Cuando terminó su periodo como rector, el ingeniero Rivera Terrazas se incorporó al Departamento de Física como coordinador general, ahí permaneció desde 1981 hasta su fallecimiento, el 20 de marzo de 1989. Por la renuncia del doctor Jaime Kravzov Jinich, en 1982, se nombró al doctor Raymundo Bautista Ramos como coordinador general del ICUAP.⁷

Hago un paréntesis para situar y reconocer a quienes fueron coordinadores del ICUAP. En la tesis de maestría en Historia, Bernardo Pérez Mino describe cómo "Je-

sús Pérez Romero sostiene que, siendo estudiante, él, Raymundo Bautista y otros entusiastas alumnos formaron un grupo que daba charlas en las preparatorias de la ciudad sobre matemáticas utilizando viejas filminas que costaban entre 10 y 15 pesos y un proyector.” (2020, 67).

Jamás cejaron en su lucha porque las matemáticas fueran un área estudiada y defendieron sus ideas. No fue casual que aceptaran acompañar el desarrollo del Instituto, conocían desde abajo las necesidades de la investigación y la impulsaban.

En este marco, el ICUAP enfocó sus actividades en tres objetivos fundamentales: (A). Participar en el movimiento científico promoviendo proyectos en el campo de las ciencias básicas y aplicadas con el propósito de contribuir a superar la dependencia científico-técnica de nuestro país al exterior. (B). Dotar a la institución y a los universitarios de habilidades y capacidades para el estudio de su entorno social. (C). Coadyuvar a elevar el nivel académico de los profesores. Muy pronto el Instituto comenzó a arrojar resultados positivos. A tres años de su fundación contaba con 65 investigadores, de ellos diez tenían doctorado, catorce maestría y el resto licenciatura. En 1978 el ICUAP queda dividido en dos grandes ramas: Ciencias Físico-Matemáticas y Ciencias Sociales; en la primera se encontraban los departamentos de Estado Sólido, Semiconductores, Matemáticas Puras y Aplicadas, y en la segunda Historia y Sociología. En ese año se plantea la creación del Departamento de Lingüística (Espinosa, López, 2014).

Aunque el nacimiento del Instituto de Ciencias abrió un espacio de investigación importante, donde se aplicarían recursos, también generaba problemas en las escuelas o facultades. Obtener recursos era una tarea compleja por las políticas nacionales de financiamiento. El objetivo de CONACYT era impulsar la investigación, pero apoyaba más a instituciones como la UNAM y el CINVESTAV, por ejemplo. Sin embargo, trataba de ampliar los servicios educativos más allá de las grandes ciudades y las principales capitales estatales.

En 1979 se creó el Plan Nacional de Educación Superior, que en la década siguiente generó otros programas, como el Programa Nacional de Educación Superior 1984-1985, el Programa Integral para el Desarrollo de la Educación Superior 1986, y el Programa para la Modernización Educativa 1989.

Con base en criterios de eficacia y eficiencia para el desempeño institucional; de pertinencia social de los servicios universitarios; de redistribución de la oferta educativa y el grado de madurez de la docencia y la investigación, se fue construyendo un proceso de planificación y evaluación que se extendió hasta los tiempos actuales a todo el sistema de escuelas de educación superior en el país.

La transformación más significativa en esos años fue un nuevo dispositivo de regulación gubernamental para las universidades sustentado en los siguientes instrumentos básicos: articulación de procedimientos de evaluación, programas de financiamiento extraordinario y exigencias específicas de cambio en las instituciones. La planeación se desplaza hacia la evaluación y con ello al control del proceso a la verificación de los productos. A este desempeño del Estado se le conoce como el Estado evaluador.

Otra política que fortaleció la investigación fue la creación del Sistema Nacional de Investigadores en 1984, con él se posibilitó la formación de investigadores. En pocos años se vio el incremento de SNIs: en 1992 la UAP registró a 104 investigadores e investigadoras en el Padrón del Sistema Nacional de Investigadores, de ellos 78 eran hombres (75%) y sólo 26 fueron mujeres (25 %). 8

En la Universidad sobrevino la etapa de creación de posgrados. La Maestría en Física era ya reconocida en el país y estaba dispuesta a transmitir su experiencia y a apoyar académicamente a otras áreas afines. En 1984, mediante un programa de colaboración con la República Democrática Alemana, a través del Dr. Alfred Zehe se crearon los programas de la Maestría en Estado Sólido y del Doctorado en Física. En 1990 se constituyó el Instituto

de Física, siguiendo a Raúl Adriano Brito (Veinticinco, 2003, 9).

Algunos posgrados nacieron en los ochenta, como la maestría en Química, de la que hoy festejamos cuatro décadas. Sin embargo, en la Universidad había nuevos embates, divisiones de opinión, políticas y fricciones por las instalaciones. En la conmemoración de los 25 años del ICUAP el doctor Fernando Santiesteban Llaguno escribió cómo se desarrolló la investigación en la Facultad de Ciencias Químicas:

En esa época, la investigación no era apoyada ni a nivel nacional ni mucho menos en el ámbito local; en el ámbito institucional se hicieron algunos intentos que fracasaron. La formación de nuestros estudiantes estuvo muy enfocada a la parte práctica o técnica. En ese tiempo contábamos con tres laboratorios y un espacio para la dirección en el edificio Carolino. (...) Y además de todos los embates que enfrentaron, las disputas internas: Lo que realmente sorprendía era la hostilidad de algunos maestros de la Escuela y hasta el Departamento de Orgánica, que nos sugerían “amigablemente” que nos fuéramos al ICUAP, llegando a promover la “toma” de nuestras instalaciones en varias ocasiones (Veinticinco, 2003, 17). De lo escrito por la doctora María de la Paz Elizalde retomo lo siguiente:

En mayo de 1984 la Maestría en Química fue aprobada por la SEP, otorgándosele además un jugoso –para entonces– financiamiento de 8 millones de antiguos pesos. En los meses siguientes hubo que organizar horarios, la llegada de un visitante de la Universidad Técnica de Dresde (UTD), e inclusive acondicionar el primer saloncito de clases en las antiguas instalaciones de Ciencias Químicas, que en ese tiempo albergaba al Laboratorio de Investigación Fisicoquímica del ICUAP. Con la aprobación oficial, el Dr. Enrique González Vergara finalmente aceleró su retorno a la UAP después de su postdoctorado en Estados Unidos.⁹

Dicho sea de paso, María de la Paz corrobora la falta de espacios adecuados y cómo el entusiasmo de los investigadores les permitía adecuarse a ellos. Su

incorporación al Centro de Química del ICUAP coincidió con la contratación del doctor Fernando Santiesteban en la Facultad de Ciencias Químicas. Para que los egresados de la Maestría en Química se formaran integralmente se decidió abarcar las áreas de Fisicoquímica, Química Inorgánica y Química Orgánica con una planta de profesores de base integrada por la doctora Elizalde, el doctor González y el doctor Santiesteban, quienes a su vez constituyeron el primer comité académico.

Los gestores de este posgrado tenían doctorado y posdoctorado. La doctora Elizalde se doctoró muy joven, a los 27 años de edad, e ingresó en 1982. Así la UAP contrató a la primera mujer con doctorado en Química. Cuarenta años más tarde María de la Paz Elizalde González se convirtió en la primera académica de la institución en obtener la máxima distinción del Sistema Nacional de Investigadores: Investigadora Nacional Emérita. Fue, también, la primera científica de la BUAP en patentar sus hallazgos en tres países del extranjero, Alemania, España, Estados Unidos; en total seis, desde 2002.¹⁰

Y qué decir de la gestión de recursos para los laboratorios. La distribución de los recursos del ICUAP se determinaba entonces en el Consejo Académico, con representantes de cada área. La distribución casi siempre generaba molestias, por eso fue importante que los doctores María de la Paz y Enrique González Vergara realizaran gestiones conducentes a lograr recursos y consolidar el posgrado. Destaco la firme voluntad de estos investigadores para seguirse formando en otras instituciones y la presentación de conferencias, como puede corroborarse en oficios resguardados en el Archivo Histórico de la BUAP sobre la doctora María de la Paz:

El decanato de la facultad de química de la Universidad Estatal de Moscú “M. V. Lomonosov” comunica a usted que la ciudadana mexicana Elizalde de Dávila María de la Paz, realizó una estadia científica del 20 de septiembre al 15 de noviembre de 1983 en el laboratorio de adsorción y cromatografía de acuerdo al plan de trabajo considerado.

Subdecanato de la facultad de química de la universidad Estatal de Moscú "M. V. Lomonosov" Sello Fac. Quím. Prof. G. S. Sergueien¹¹

Sus inquietudes académicas la llevan a dar conferencias y a tomar cursos. De dicha estadía entregó un informe muy amplio. Lo aquí mostrado permite conocer que los investigadores que formaron el posgrado eran sumamente activos, como el doctor Enrique González Vergara, quien egresó de la Licenciatura en Química en 1977, pronto realizó la Maestría en Bioinorgánica, en la Universidad de San Diego, California, en 1979, más tarde su doctorado en la Universidad de San Diego California en 1982 y el posdoctorado en la University of Iowa City, USA.

Eran contados los investigadores formados con estudios de doctorado. Sobre el perfil académico del doctor González, además de ser investigador SNI II, destaca por su dedicación a la divulgación científica y las investigaciones que realiza.

En relación con el posgrado, las cifras del Anuario 2002-2003 reportan que solo diez programas pertenecen al Padrón Nacional de Posgrados y veinte obtienen beneficios del Programa Institucional de Fortalecimiento al Posgrado.

Además, 462 estudiantes de posgrado se encuentran becados por el CONACyT.¹² Estas cifras destacan los esfuerzos académicos colectivos y muestran su grado de compromiso con nuestra Universidad.

El padrón institucional de investigadores, que a inicios del 2002 incluía 354 miembros, se actualizó en abril de 2003 y registró 416 investigadores. En lo que respecta al SNI, al mes de julio son 223 investigadores e investigadoras (candidatos: 28; Nivel I: 136; Nivel II: 52 y Nivel III: 7).¹³

Conclusión

Los esfuerzos de los fundadores del posgrado en Ciencias Químicas, creado en la década de los ochenta, se realizaron en un marco en el que apenas se gestaban los estudios de posgrado en la Universidad. Con el propósito de contribuir a esta casa de estudios, con entusiasmo sus creadores se dieron a la tarea de construir este espacio académico que permitió la formación de varias generaciones de egresados. Es un posgrado diferente a otros porque fueron doctores con mucha experiencia quienes llegaron del extranjero y lo fundaron. Reconozcamos el ímpetu científico, de investigación y docencia de los fundadores.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Referencias

(2003). Veinticinco años de investigación en la BUAP. Memoria, BUAP, Dirección General de Fomento editorial.

"A la juventud mexicana. Al pueblo en general", 18 de mayo de 1973, El Sol de Puebla.

"Antropología e Historia coordinará la elaboración de tesis", 31 de octubre de 1974, Combate, un periódico popular, UAP.

AHBUAP, Sección: ICUAP, exp: F-259.

AHUAP, caja 5, Sección ICUAP, exp. 8, 30 de junio de 198, fojas 1 y 2

Anuario Estadístico 2003, Ciclo escolar 2002-2003, BUAP.

Brito, O. (2003). "La enseñanza de posgrado en el Instituto de Física de la BUAP", en Veinticinco años de investigación en la BUAP. Memoria, BUAP, Dirección General de Fomento editorial.

Castillo, T. A. (2020). Marco Antonio Cruz: la construcción de una mirada (1976-1986), Conacyt- Instituto Mora, México.

Correas, V. F. (1989). (entrevista), Luis Rivera Terrazas. Recuento, Centro de Estudios Universitarios, Centro de Investigaciones Jurídico Políticas de la Escuela de Derecho y Ciencias Sociales, UAP, Puebla.

Elizalde, M. P. (s.n.a.) "La BUAP y el posgrado en química. El inicio hace 30 años", revista Digital de Divulgación del Instituto de Ciencias de la BUAP (RD-ICUAP) RD ICUAP.

Espinosa, B., López, O. (s.n.a.) "40 Aniversario del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Compilación de hechos históricos del ICUAP", en revista Digital de Divulgación del Instituto de Ciencias de la BUAP (RD-ICUAP) RD ICUAP.

Hobsbawm, E. (2011). *Cómo cambiar al mundo*, Barcelona, Crítica.

Hooks, B. (2022). *Enseñar pensamiento crítico*, Barcelona, Rayo Verde Editorial S. L. Pérez M.

Martínez, M. G. (s.n.a.). "La trayectoria académica de Luis Rivera Terrazas", texto leído en el homenaje con motivo de los veinte años de su fallecimiento, Instituto de Física de la BUAP, inédito. <https://icup.buap.mx/sites/default/files/Revistas/A%C3%B1o%200%2C%20No.%201/Temas/trayectoria-luis--rivera-terrazas.pdf>

Pérez, M. B. (2020). *De amateurs a profesionales. La institucionalización de las matemáticas en Puebla, 1950-1982*, tesis de maestría en Historia, ICSyH.

Rivera, T. L. (1978), *Informe del rector ingeniero Luis Rivera Terrazas 1975-1977*, Universidad Autónoma de Puebla, Biblioteca José María Lafragua.

Sánchez, D. G. y Crisanto C. O. (2003). "La actividad científico-tecnológica en la BUAP", en *Veinticinco años de investigación en la BUAP*. Memoria, BUAP (pp. 33-47). Dirección General de Fomento editorial.

Santiesteban LI., F. (2003). "Desarrollo de la investigación en la Facultad de Ciencias Químicas de la BUAP", en *Veinticinco años de investigación en la BUAP*. Memoria, BUAP, (pp. 13-18). Dirección General de Fomento editorial,

Tirado V. G. (2022). *Halcones y palomas. Avances y reacciones en la reforma universitaria*. UAP, 1971-1973, ICSyH- BUAP.

Tirado, V. G. (2024). "El ascenso de la izquierda y el apoyo a exiliados

LOS INDICADORES FINANCIEROS EN LA TOMA DE DECISIONES EN LAS MIPYMES MAQUILADORAS DE HUEJOTZINGO ANTE LAS CRISIS ECONOMICAS

FINANCIAL INDICATORS IN DECISION-MAKING IN HUEJOTZINGO
MSME MAQUILDORAS IN THE FACE OF ECONOMIC CRISES

Gisela Pérez-Juarez (1*), Daniel
Mocencahua-Mora (2)
Luis Abraham Sánchez-Gaspariano (3)

<https://orcid.org/0009-0005-6963-2967>
<https://orcid.org/0000-0003-4718-7442>
<https://orcid.org/0000-0002-3899-0746>

Año 11 No. 31

Recibido: 17/Mayo/2023

Aprobado: 14/Diciembre/2024

Publicado: 20/Enero/2024

(1) Docente-Investigadora. Universidad Tecnológica de Huejotzingo. Doctorante del programa de Doctorado en Sistemas y Ambientes Educativos. Facultad de Ciencias de la Electrónica. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 18 Sur, Puebla, México.

(2) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ciencias de la Electrónica. Av. San Claudio y 18 Sur, Puebla, México.

(3) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ciencias de la Electrónica. Av. San Claudio y 18 Sur, Puebla, México.

bve230879@viep.com.mx
daniel.mocencahuamora@viep.com.mx
luis.sanchezgaspariano@viep.com.mx

Resumen

En este artículo se identifica la situación que vive la industria textil en nuestro país, la presencia de las empresas maquiladoras en el estado de Puebla y de las MiPyMES en la región de Huejotzingo. De cómo estas organizaciones han seguido vigentes a pesar de las diversas crisis económicas; sobre todo de la última, el COVID-19, identificando las acciones recurrentes como consecuencia de la toma de decisiones que realizan quienes están al frente de estas. Se mencionan la importancia y algunos beneficios a los que serán acreedoras si contratan a un experto en el tema financiero o si los propietarios de estas organizaciones puedan tomar las decisiones acertadas para la gestión administrativa y financiera de su organización. Decisiones que basadas en algunos indicadores como el Costo de Deuda (K), Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Flujo de Efectivo (FFE) fortalezcan la situación económica y financiera de este tipo de organizaciones.

Palabras clave: MiPyMES, Costo de Capital, Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Flujo de Efectivo (FFE).

Abstract

This article identifies the situation of the textile industry in our country, the presence of the maquiladora companies in the state of Puebla and the MSMEs in the region of Huejotzingo. How these organisations have remained in force despite the various economic crises, especially the last one, COVID-19, identifying the recurrent actions as a result of the decisions made by those who are at the head of these organisations. It mentions the importance and some of the benefits to which they will be entitled if they hire a financial expert or if the owners of these organisations can make the right decisions for the administrative and financial management of their organisation. Decisions based on some indicators such as Cost of Debt (K), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Cash Flow (CFF) strengthen the economic and financial situation of this type of organisations.

Keywords: MSMEs, Cost of Capital (K), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Cash Flow (CFF)

Introducción

De acuerdo con información de INEGI (2020). El estado de Puebla está conformado por 217 municipios, de los que; Huejotzingo ocupa el número 74 con una población de 90,794 personas, cuenta con 241 unidades económicas en la industria manufacturera misma que contribuye con una remuneración económica de 197,429 millones de pesos y con una población ocupada para este sector y actividad de 4,605 personas. Dentro de las actividades manufactureras se contempla la industria textil, en este municipio las familias desarrollan dicha actividad, formando parte fundamental para la derrama económica de este territorio al menos 241 unidades familiares se identifican para la actividad.

La existencia de las MiPyMES en nuestro país es de importancia pues participan de manera directa en la generación del producto interno bruto (PIB). Según La Comisión Económica para América Latina (CEPAL), las Pequeñas y Medianas empresas (PyME) tienen una participación del 99% en el tejido industrial, son generadoras de empleo y su participación en el producto interno bruto (PIB) se limita al 25%, con una productividad baja en comparación con la de las grandes empresas (CEPAL, 2020). Mientras que las MiPyMES en Huejotzingo han logrado permanecer vigentes en el mercado, incluso lograron sobrevivir a la crisis económica que trajo el coronavirus en 2019, lo anterior se logró gracias a la toma de decisiones por parte de quienes están al frente de estas organizaciones quienes suelen ser, los jefes de familia o patriarcas que asumen el papel de director de la empresa por lo que; las decisiones tienen sustento en cuanto a experiencias anteriores o en situaciones que han ocurrido con sus colegas, mismas que en ocasiones traen consigo resultados positivos y en muchos otros casos resultados negativos. Lo ideal sería que las actividades realizadas se encuentren encaminadas a la generación de empleo y a su vez a la obtención de utilidades para los emprendedores.



Figura 1. Mapa del Municipio de Huejotzingo y de la junta auxiliar Santa Ana Xalmimilulco. Imagen tomada de google maps 2024. https://www.google.com/maps/search/Boulevard+Aeropuerto,+Puebla/@19.1723377,-98.4452627,23113m/data=!3m1!1e3?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MTAxNi4wIKXMDSoASAF-QAw%3D%3D

Desarrollo

El Coronavirus (COVID-19) surgió, en el mes de diciembre del año 2019, en Wuhan, China. Rápidamente se trasladó a Europa y pocos meses después invadió el continente Americano, originando un golpe para la economía mundial, según el Fondo Monetario Internacional (FMI) se preveía un crecimiento de la economía mundial del 3,3%, superior al del 2019 (2,9%), debido a que las crisis de comercio entre USA y China habían sido superadas. Sin embargo, el brote del virus en la ciudad de Wuhan China dio lugar a una crisis económica a gran escala que impactó a todos los sectores económicos a nivel mundial (Minsalud, 2020).

La pandemia del COVID-19, la peor en un siglo, ha generado una crisis económica mundial que ha sido caracterizada por la Directora Gerente del Fondo Monetario Internacional (FMI) como la peor desde la Gran Depresión de los años treinta del siglo pasado (Georgieva, 2020). En el reciente informe del FMI sobre perspectivas de la economía mundial (FMI, 2020a) se estima una disminución del producto interno bruto (PIB) mundial a tasas de cambio de mercado del 4,2% en 2020.



Figura 2. Imagen de la crisis económica y el COVID-19. Imagen generada con la inteligencia artificial Artguru 2024. <https://www.artguru.ai/es/>

Este es el resultado de caídas de entre el 5% y el 7% de las principales economías desarrolladas y del 5% o más de las economías emergentes y en desarrollo, siendo América Latina, entre estas últimas, la región con peor desempeño. La profunda recesión refleja los efectos devastadores del confinamiento sobre la actividad económica: contracciones trimestrales que ya fueron marcadas en el primer trimestre y que pueden ser de dos dígitos en muchas economías en el segundo trimestre. El pronóstico básico del FMI supone que esos efectos se irán disipando gradualmente, pero claramente existe la incertidumbre de si existirán recursos médicos que impidan nuevos rebotes.

Esta crisis, que tiene un alcance realmente global, será ciertamente más fuerte que la que experimentó la economía mundial durante la crisis del Atlántico Norte (-2,0% en 2009, según el FMI, a tasas de cambio de mercado), que no tuvo lugar en un amplio grupo de economías emergentes y en desarrollo. Si se compara con la Gran Depresión, la velocidad de la contracción ha sido más acelerada, pero puede ser menos profunda y, sobre todo, menos prolongada.



Figura 3. Imagen de la crisis económica Mexicana denominada efecto tequila. Imagen creada con la inteligencia artificial Microsoft Designer 2024.

<https://designer.microsoft.com/image-creator>

La proyección básica del FMI es de un crecimiento del 5,4% en 2021, que compensaría con creces la recesión de 2020, aunque no en todos los países. Sin embargo, si contener la pandemia toma más tiempo de lo esperado, el FMI estima que habría una caída del 3% adicional en 2020, y si se combina con un rebote en 2021, la actividad se ubicaría un 8% por debajo de lo proyectado para el próximo año. De acuerdo con Torres (2012), las crisis financieras también pueden originarse a menudo cuando; por razones diversas, se produce una insuficiencia más o menos inesperada de liquidez, lo que hace escasear los medios de pago, bloquea la financiación y provoca la alteración entre oferta y demanda que da lugar a la crisis que, generalmente en este caso, se traslada enseguida a la economía real.

En 1994 se iniciaba en México una de las crisis económicas de impacto a nivel mundial denominada "Efecto Tequila". La crisis se propagó en Latinoamérica y tuvo incluso consecuencia en otros continentes. Según información presentada en internet y de acuerdo a la opinión de (Krugman, 2022) sencillamente porque para muchos inversionistas ignorantes todos los países latinoamericanos son iguales. Así que el pánico de lo que había pasado en México se extendió a otros países, que de la noche a la mañana se vieron escasos de fondos y endeudados a corto plazo. Después de que estalló en México la primera crisis de la globalización con el llamado "efecto tequila", el Fondo Monetario Internacional (FMI) trabajó en el diseño de medidas para evitar

las crisis financieras internacionales. Ruiz (2019) plantea que, para la ciencia económica ha sido muy difícil predecir la ocurrencia de una crisis económica, lo que lleva a la reflexión de que no ha sido suficientemente estudiada en cuanto a sus causas, no así en cuanto a sus efectos.

Con frecuencia los economistas definen al ciclo económico como el movimiento de la producción capitalista a través de fases que se van sucediendo: crisis, depresión, reanimación y auge. Cada crisis, termina al final de su fase de descenso, iniciándose a partir de ese punto un nuevo ciclo (BBVA, 2019). Con todo lo descrito entendemos que las crisis económicas han estado presente a lo largo de la historia y que las empresas en nuestro país han logrado su permanencia en el mercado, siendo estas competitivas a pesar de las adversidades que pudieran haber encontrado a lo largo de su vida.



Figura 4. Banco de palabras imagen creada con mentimeter 2024. <https://www.mentimeter.com/app>

Dentro de los censos económicos cada día las pequeñas y medianas empresas van tomando fuerza y forman parte importante de la economía mexicana pues como se ha descrito son generadoras de empleo logrando hacer diferencia en comunidades que tienen conocimiento de la existencia de una crisis económica por las noticias, porque el dinero que rayan a la semana ya no les es suficiente para cubrir sus necesidades básicas y comienzan a buscar otras alternativas en cuanto a la parte económica, por mencionar algunas son la búsqueda de otro empleo o trabajar mayor número de horas si eres trabajador y si eres dueño de las maquiladoras la alternativa recurrente es buscar un nuevo punto de venta sin importar si es en otro estado o si los costos son altos, lo que ellos necesitan es dinero para cubrir las

necesidades primarias de sus familias y sus colaboradores.

Industria textil

La posición estratégica de la industria textil en el contexto nacional, así como su relación con otros subsectores industriales, hizo que el gobierno mexicano considerara a la cadena fibras-textil-vestido, como una de las 12 ramas prioritarias con vistas a desarrollar programas de competitividad sectorial (Secretaría de Economía -SE-, 2002 y 2004a).

La segunda (hilados y tejidos), y tercera etapa (confección de prendas), son las actividades que pertenecen al sector de Textiles y Prendas de Vestir, según clasificación de la Secretaría de Economía (2002), pero sin incluir, cómo se ha mencionado anteriormente, a la industria del cuero y del calzado a efectos de este trabajo. Los hilados y tejidos muestran una actividad importante, pero es la tercera etapa -confección de prendas de vestir, de punto y otros textiles- la que destaca por ser la que agrupa al mayor número de unidades productivas y ser además la actividad que genera la mayor producción bruta y el mayor valor agregado de todas las anteriormente citadas.

La industria textil y del vestido -sin incluir la rama del cuero-, está integrada en un 99,5% por MIPYMES; además agrupa en total al 17,6% (742,986) de las personas ocupadas en el sector manufacturero, que representa un 5,2% del total nacional ocupado en la manufactura. De ahí la importancia, no sólo económica sino social, de esta rama productiva (INEGI, 1999 y 2004).

Este sector presenta varios factores que afectan su competitividad, entre las que se encuentra el retraso tecnológico, no sólo en las líneas de producción, sino también en los sistemas de comercialización y de diseño. Si bien la rama textil se vio beneficiada, a partir de la apertura del país a los mercados internacionales, México no mostró una actitud más agresiva en la captación de nuevos mercados, sino que centró la venta de su producción en un solo país, los Estados Unidos (Zaga, 2004; Factor Económico, 2005).



Figura 5. Imagen de un cluster textil en el municipio de Huejotzingo, Puebla. Imagen creada con la inteligencia artificial ChatGpt 2024. <https://chatgpt.com/auth>

En opinión de Rodríguez y Fernández (2006). Ahora las empresas mexicanas han visto desplazadas en Estados Unidos las prendas confeccionadas en territorio nacional a favor de los productos chinos, situación que llevó a México en 2003 a pasar del primer al segundo puesto como proveedor en textiles y vestido y a estar dependiente de los vaivenes económicos de ese país. Las empresas mexicanas textiles y de la confección tienen la necesidad de nuevas estructuras organizacionales que les permitan introducirse en los nuevos esquemas de competencia, por lo que el gobierno mexicano propone dos alternativas para hacer frente a los grandes competidores actuales y futuros: las cadenas productivas o clusters, y la formación de empresas integradoras.

Estas acciones, se insertan dentro de una estrategia de competitividad nacional y sectorial que las apoyan para su éxito. En México existe experiencia sobre clusters en otras ramas productivas, pero no en la industria textil. En cuanto al número de clusters no se cuenta con información oficial publicada sobre el total existente en este sector, ni sobre el número de empresas que se agrupan dentro de las actividades textiles y de la confección, o sobre los casos de éxito, lo cual no ocurre en otras ramas productivas (SE, 2002; Rojas, 2004; García de Alba, 2004). Por otra parte, la empresa integradora es: “una forma de organización empresarial básicamente enfocada a ayudar a las MiPyMES”. Según datos de la Secretaría de Economía (2023), en México existen 750 empresas integradoras en las diferentes ramas productivas, de las cuales 150 son de la industria manufacturera y 25 específicamente de la industria textil.

Sólo una es considerada empresa integradora de éxito por los resultados que ya obtiene. Esta es la integradora INTTEX 2001 (ubicada en el estado de Hidalgo). Estas empresas se topan con muchos obstáculos, no sólo para integrarse, sino para trabajar en forma coordinada. Algunos de esos problemas son la desconfianza entre los socios potenciales, la carencia de una visión compartida y de largo plazo, la ausencia de liderazgo, las relaciones de competencia que prevalecen sobre las de cooperación y la heterogeneidad del grupo, entre otros (Salcedo, 2004).

Si bien se tienen buenas perspectivas en cuanto a la agrupación de las empresas textiles ya sea en clusters o en empresas integradoras, no se puede llevar a cabo debido a que son pocas las empresas que participan, incluso porque muchas de estas se encuentran en la informalidad, ya que; de las 43.520 unidades económicas textiles y de la confección registradas como MiPyMES en el censo de 1999, actualmente sólo 220 empresas participan dentro del programa de empresas integradoras (INEGI, 2004).

En los últimos años el estado de Puebla se ha posicionado dentro del país como un territorio en el que el sector textil ha tomado fuerza, con la presencia de parques industriales, aeropuerto e incluso tianquis en diferentes municipios del estado, se ha logrado la supervivencia, comercialización y crecimiento de organizaciones que dedican la actividad económica a este sector. Después de la pandemia del COVID-19 muchas MiPyMES se encuentran en recuperación y necesitan tomar decisiones que las ayuden a continuar vigentes en el mercado, en especial las que se encuentran en Huejotzingo ya que en su mayoría; son organizaciones familiares, las decisiones tomadas por lo regular son por el patriarca o jefe de familia lo que hace notar la ausencia de profesionales que les guíen para la toma de decisiones.

Algunos expertos mencionan que las empresas seguirán asumiendo las implicaciones por la recesión económica, producto de la elevada inflación que golpea a México, cuyo impacto es, en la demanda interna, lo que hará el entorno empresarial más complicado. De ahí la importancia de que los emprendedores o microempresarios conozcan y dominen

algunos indicadores financieros para la toma de decisiones correctas y la supervivencia en el mercado.

De acuerdo al texto anterior a lo largo de la historia en nuestro país y el mundo las crisis económicas siempre han estado presente, trayendo consigo estragos a largo plazo en todos los ámbitos de las actividades cotidianas, por lo que la supervivencia de las empresas familiares se encuentran en peligro, en esta zona territorial existen emprendimientos que llevan más de tres décadas de existencia e incluso han sido heredadas de padres e hijos, algunas se encuentran en la economía informal pero no por ello dejan de formar parte del tejido empresarial de ese territorio.

Surgen algunas interrogantes, ¿cómo han sobrevivido y cómo se han financiado estas organizaciones? ¿Acaso los emprendedores cuentan en su haber con los conocimientos básicos en finanzas? De ser así; deberían identificar, calcular e interpretar para la toma de decisiones financieras a mediano y largo plazo algunos indicadores financieros que fortalezcan la permanencia y el éxito de sus organizaciones.

De manera breve y de acuerdo a algunos autores expertos en temas financieros, a continuación se dará una breve definición sobre los indicadores básicos en tema de las finanzas.

Costo de Capital (K)

- Interés (i). La tasa de interés que en su momento pagará por verse beneficiado por un financiamiento, es el porcentaje que deberá pagar por utilizar capital proveniente de terceros.

De acuerdo con Baca (2013) para formar una empresa o realizar un proyecto se debe utilizar una inversión inicial. El capital de inversión y si éste proviene de instituciones de crédito se tendrá que pagar un costo una tasa de interés.

En su libro Graham, Smart y Megginson (2011) mencionan que el costo de capital es también conocido como costo de oportunidad, es una tasa que puede representar el riesgo del proyecto o de cierta forma el costo que tiene que devolver el proyecto.

Entendemos, que el costo de capital es una tasa representada en porcentaje,

misma que tienes que pagar por el uso o disfrute de capital externo o de terceros. Pero también puede ser el porcentaje que recibas como beneficio si decides realizar inversión de capital con terceros por ejemplo alguna financiera, caja de ahorro o algún otro instrumento de inversión.

Flujos de Efectivo o Flujo de Caja (FFE)

- Flujos de Efectivo (FFE) o El flujo de caja, este indicador determina las entradas y salidas de efectivo que ha tenido o que puede tener la empresa durante un tiempo determinado.

Citando a Martínez et al 2023, no son muchas las investigaciones orientadas a evaluar las decisiones financieras que en las Mipymes se toman para la operación de la empresa, a sabiendas de que conllevan al flujo de caja, herramienta básica para la toma de decisiones financieras a corto y largo plazo, capacidad de negociación, gestión y control de la liquidez, solvencia y capacidad de capital de trabajo. La falta de este tipo de estudios hace más compleja la difícil situación que se presenta para la supervivencia de las mismas, en Colombia solamente el 50% sobreviven el primer año y solo el 20% al tercero y en México las cifras son similares, 60% y 15% respectivamente, (Domínguez 2016).

En este sentido, las MiPyMES se enfrentan a situaciones financieras confusas de carácter estructural, debilidades que hacen más compleja su competitividad y condicionan su capacidad de productividad, supervivencia y crecimiento. Masilo y Aguirre (2016) explican que la planificación financiera estratégica, es una herramienta fundamental para la toma de decisiones en una empresa.

Pero este tipo de organizaciones al tener ausente esta herramienta y desconocimiento de la importancia del flujo de caja, tienen como consecuencia la falta de liquidez, carencia o poca participación al acceso de fuentes de financiamiento tanto a corto, mediano y largo plazo, por lo que; la administración financiera de este tipo de organizaciones no cuentan con la eficiencia para el uso de los recursos económicos incluyendo el éxito en las ventas para gestionar el manejo

eficiente del efectivo no es exitosa trayendo consigo la quiebra debido a la pérdida de mercancías y suministros, desactualización de los precios de la materia prima, insumos y mercancías, además del descontrol en la capacidad de pago.

De acuerdo con Córdoba (2012) la importancia radica en atender las necesidades de financiación, establecer un acumulado real y una proyección del efectivo, así como; realizar el presupuesto de efectivo para ayudar al fortalecimiento financiero de las empresas logrando de manera exitosa su desempeño.

Por último, si estás empresas aplican un procedimiento que incorpore el flujo de efectivo como herramienta para la toma de decisiones se logrará una administración eficiente y así se obtendrán mejores resultados de liquidez y de rentabilidad. Se entiende entonces por Flujo de Efectivo, la cantidad con la que cuentan los empresarios después de haber restado de las entradas las salidas para la operación de cualquier organización.

Valor Presente Neto (VPN)

El Valor Presente Neto (VPN), muestra los beneficios netos generados por el proyecto durante su vida útil después de cubrir la inversión inicial y obteniendo la ganancia requerida de la inversión.

De acuerdo con Baca, (2013) es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial, sumar los flujos descontados en el presente y restar la inversión inicial equivale a comparar todas las ganancias esperadas contra todos los desembolsos necesarios para producir esas ganancias, en términos de su valor equivalente en este momento o tiempo cero.

Por su parte Graham, Smart y Megginson (2011) Mencionan que, para entender el concepto de valor presente neto, en primera instancia se debe aclarar el término descuento, entendiéndolo como lo contrario al interés compuesto, por ejemplo: si gana 5% (r) sobre su dinero, ¿qué cantidad es lo máximo que estaría dispuesto a pagar ahora por la oportunidad de recibir en un futuro dinero en un determinado número de periodos? Con lo anterior el descontar, ayuda a determinar el valor presente de una cantidad futura,

suponiendo una oportunidad de ganar un rendimiento determinado(r) sobre el dinero.

Según Solórzano (2002), se define como el valor presente del conjunto de flujos de fondos que derivan de una inversión, descontados a la tasa de retorno requerida menos la inversión inicial, todo valuado al momento justo de desembolsar la inversión. El criterio de aceptación o rechazo de la inversión se establece en función del monto del valor presente neto. La regla es aceptar toda inversión cuyo VPN sea mayor a cero.

Tasa Interna de Retorno, Rentabilidad o Rendimiento (TIR)

- Tasa Interna de Retorno (TIR) que representa la rentabilidad interna del proyecto y es la tasa de actualización o de descuento que hace cero al valor actual neto.

Palomar (2022) menciona que, la TIR es el tipo de descuento que anula el VAN de una inversión, es decir, que iguala a cero la suma actualizada de todos los flujos de caja de la inversión, deduciendo el desembolso inicial.

Graham, Smart y Megginson (2011). Definen a la TIR como la tasa de descuento que causa que el valor presente neto de todos los flujos de efectivo del proyecto sea igual a cero.

Baca, (2013). Define a la TIR como la tasa (i) que hace que la suma de los flujos descontados sea igual a la inversión inicial. La i en este caso actúa como una tasa de descuento y, por tanto, los flujos de efectivo a los cuales se aplica vienen a ser flujos descontados.

Conclusión

Según Rodés (2018). El proyecto de creación de una empresa nace en virtud de un impulso de la persona generado a partir de diversos factores combinados: sus inquietudes, su deseo de desarrollo, su creatividad y su imaginación. Se trata de factores que, en alianza con la inmediatez de satisfacer sus necesidades más elementales mediante la consecución de un trabajo y de unos ingresos, se combinan y suscitan el pensamiento innovador.

De acuerdo con Vecino et al. (2019) para llevar a cabo la selección de proyectos en las empresas, la teoría sugiere que se deben utilizar métodos adecuados de evaluación de inversiones con el fin de que se tomen decisiones acertadas en cuanto a la destinación de los recursos correspondientes a cada una de las posibilidades de inversión.

Los directivos de las PyME deben de perder el miedo y hacer conciencia sobre la importancia que tienen los indicadores financieros, sobre las opciones de inversión existentes en el mercado para que al recibir los beneficios de estas a corto, mediano o largo plazo puedan seguir siendo impulsoras de empleo y contribuir al PIB nacional.

Los indicadores financieros que se describieron anteriormente pueden considerarse básicos para la gestión financiera de cualquier empresa, en el caso de las MiPyMES en la región de Huejotzingo; la mayoría de las unidades económicas desconocen su existencia y no permiten el acercamiento de los especialistas en el tema ya sea por; desconocimiento, miedo e incluso desinterés, debido a que, como se mencionó anteriormente las decisiones tomadas han sido útiles para su permanencia, sin embargo; a pesar de no aplicarlas continúan vigentes en un mercado que les ha permitido obtener ingresos y ganancias mismas que al no ser reinvertidas o destinadas a rubros que fortalezcan el beneficio económico, debiendo cuestionarnos ¿Qué actividades realizan si llegan a generar ganancia? La mayoría de los microempresarios optan por invertir en activos fijos como automóviles o motocicletas que no son utilizadas como equipos de reparto o para actividades de la empresa, sí no

que; se destinan para uso personal de los dueños y sus familiares, sirviendo incluso para ostentar y dar a conocer ante el resto de su comunidad el éxito financiero que tienen.

Algunos otros dirigen el efectivo ganado para la adquisición de terrenos o casas que en su momento serán heredadas para sus descendientes y los menos destinan el recurso en capital de trabajo, es decir; para la compra de materia prima o el pago de la mano de obra que identifiquen sea necesaria para la organización. Por último, utilizan el dinero de sus ganancias en eventos sociales, eventos personales, vacaciones y en apoyo para fiestas patronales.

Lo anterior porque carecen del conocimiento o efecto que tiene el dinero a través del tiempo, no han tenido la experiencia de poder realizar inversiones que pueden darles ganancia a mediano y largo plazo, sin que ellos tengan que arriesgarse pues su capital estará libre de riesgo, llegará el tiempo en que por realizar de manera cotidiana actividades que disminuyen su efectivo no contarán con el disponible para cubrir algunas de sus obligaciones, de ahí la importancia de contar con algún experto en el tema de las finanzas, incluso tomar cursos de salud financiera o finanzas personales, mismos que ayudarán a que las MyPyMES, tengan en su haber conocimientos sobre los indicadores financieros para tomar decisiones adecuadas que las hagan seguir permanentes en un mercado donde la competencia se encuentra presente día a día, que identifiquen sumarse a la formalidad en cuanto al registrarse ante la Secretaría de Hacienda y Crédito Público e incluso realizar el registro de marca. Aunque continúen operando en los mismos lugares de comercialización, dichas actividades traerán consigo beneficios como la seguridad para comercializar sus productos y la facilidad para ser acreedoras a financiamientos o apoyos económicos por parte de instancias gubernamentales, así continuarán siendo impulsoras del crecimiento local e incluso regional, con la generación de empleos y con la emisión de sueldos competentes. Finalmente, estas acciones fortalecerán la gestión administrativa y el crecimiento financiero de su organización.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimiento

Los autores agradecen al CONAHCYT por la beca otorgada a la estudiante de posgrado Gisela Pérez Juárez número 888404.

Referencias

- Baca, Urbina, G. (2013). Evaluación de proyectos. (7.ª ed.). McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V. ISBN 978-607-15-0922-2
- Barba, J. (26 de diciembre de 2022). 2023, un año difícil para las pymes. El economista. <https://www.eleconomista.com.mx/revistaimef/2023-un-ano-dificil-para-las-pymes-20221226-0039.html>
- BBVA (2019). ¿Qué es un ciclo económico? Obtenido de BBVA. México: <https://www.bbva.com/es/que-es-un-ciclo-economico/>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL. Informe especial COVID-19 No.3. El desafío social en tiempos de COVID-19 Mayo 2020.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2020, 2 de junio). <https://www.cepal.org/es/subtemas/micro-pequenas-medianas-empresas-mipyme#>
- Córdoba, M. (2012). Gestión financiera (1ª. ed.). Bogotá: ECOE Editores.
- Domínguez, J. (2016). Mipymes generan alrededor del 67% del empleo en Colombia. Bogotá D.C.: Actualícese
- El Economista, (2023, octubre 5). Bancos centrales subestimaron la inflación: P. Krugman. <https://www.eleconomista.com.mx/economia/Bancos-centrales-subestimaron-la-inflacion-P.-Krugman-20221117-0129.html>
- Fondo Monetario Internacional. (2020). Informa Anual del FMI 2020. <https://www.imf.org/external/pubs/ft/ar/2020/eng/downloads/imf-annual-report-2020-es.pdf>
- Graham, J., Smart, S. y Megginson, W. (2010). Finanzas corporativas (3ª Ed). Cengage Learning
- Georgieva (2020). Declaración de la Directora Gerente del FMI Kristalina Georgieva tras una conversación ministerial del G-20 sobre la emergencia del coronavirus. Fondo monetario internacional. <https://www.imf.org/es/News/Articles/2020/03/23/pr2098-imf-managing-director-statement-following-a-g20-ministerial-call-on-the-coronavirus-emergency>
- INEGI (2022). Marco Geoestadístico, 2000. Inédito
- INEGI-DGG (2000) Superficie del país por entidad y municipio. 2000
- INEGI (2022) Puebla, XII Censo general de población y vivienda 2000, tabulados básicos. Tomo VIII.

Masilo, A., Gómez, M., (2016). Estudio de revisión sobre la planeación financiera y propuesta de modelo empírico para pymes de México. Revista CIMEXUS (11) 2

Martínez, A., Edilson, M., Velásquez, O. (2023). Evaluación de las decisiones financieras

operacionales que generan flujo de caja en las MIPYMES. Revista de métodos cuantitativos para la Economía y la empresa (34). 60-82. ISSN: 1886-516X

Minsalud. (2020). Así evoluciona el covid-19 en América Latina. Boletín de Prensa No.586 de 2020.

Palomar Jiménez, M. (2022). Análisis de la viabilidad económico-financiera de una idea de negocio real [Tesis de grado, Universidad de Zaragoza] <https://zaguan.unizar.es/record/120431>

Rodés A. (2018). Gestión económica y financiera de la empresa. 2ª edición actualizada, Ediciones Parinfo, SA ISBN:978-84-283-4024-3

Ruiz H. (2019). Sobre el significado de crisis económica, recesión, depresión y contracción, Revista Contribuciones a la Economía (julio-septiembre 2019). Recuperado de: <http://eumed.net/2/rev/ce/2019/3/significado-crisis-economica.html>

Secretaría de Economía (SE) (2002). Programa para la Competitividad de la Cadena Fibras-Textil-Vestido. ANIQ; CANAITEX; Cámara Mexicana de la Industria Textil Central; Cámara Textil de Occidente; Cámara Nacional de la Industria del Vestido. México. www.economia.gob.mx.

Secretaría de Economía (SE) (2004a). Acciones Concretas para Incrementar la Competitividad. Subsecretaría de Industria y Comercio. México. www.economia.gob.mx

Secretaría de Economía (SE) (2004b). Inversión Extranjera Directa en la Industria Textil. Dirección General de Inversión Extranjera. México www.economia.gob.mx

Solórzano, V. (2002). Valuación de proyectos de inversión a través de Opciones Reales. Trabajo presentado para el IX Premio de Investigación sobre Seguros y Fianzas 2002. Comisión Nacional de Seguros y Fianzas.

Vecino, C., Rojas, C., y Muñoz, Y. (2019). Prácticas de evaluación financiera de inversiones en Colombia, Estudios Gerenciales, (31)134, 41-49. ISSN 0123-5923, <https://doi.bibliotecabuaq.elogim.com/10.1016/j.estger.2014.08.002>.

Zaga G., Mayer (2004). México-China ¿Economías Competitivas o Complementarias? Ponencia presentada noviembre 2004 en la Cámara Nacional de la Industria Textil (CANAITEX).

DE ORIGEN INCIERTO A MÉXICO: EXPLORANDO EL POTENCIAL DE LA FLOR DE JAMAICA COMO CULTIVO SUSTENTABLE

FROM UNCERTAIN ORIGIN TO MEXICO: EXPLORING POTENTIAL OF
THE HIBISCUSFLOWER AS A SUSTAINABLE CROP

Jenaro Reyes Matamoros (1), David
Martínez Moreno (2), Dolores López
Morales(2), Yaselda Chavarin Pineda(1*)

<https://orcid.org/0000-0003-0078-7221>
<https://orcid.org/0000-0003-2378-3338>
<https://orcid.org/0000-0002-5752-3756>
<https://orcid.org/0000-0003-4524-0115>

Año 11, No. 31

Recibido: 9/Mayo/2024

Aprobado: dd/mm/202x

Publicado: dd/mm/202x

- (1) Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). 14 sur 6301, Col. San
Manuel, CU, 72570, Puebla, Pue., México,
229 55 00 ext. 5152 y 5240
- (2) Facultad de Ciencias Biológicas, BUAP. Blvd. Valsequillo y
Av. San Claudio, Edificio 112-A, Col. San Manuel, C.P. 72570, Puebla,
Pue., México.

jenaro.reyes@correo.buap.mx

davidman850@hotmail.com

dolores.lopez@correo.buap.mx

*yaselda.chavarinp@correo.buap.mx

Resumen

La flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) representa un tesoro agrícola arraigado en su rica diversidad genética y en la historia de México. Este cultivo, miembro de la familia Malvaceae, se ha integrado en la agricultura mexicana, aunque enfrenta desafíos en la identificación varietal y la exploración de su diversidad genética. La jamaica, además de ser cultivada en monocultivo, se ha incorporado con éxito en sistemas agrícolas asociados al maíz y tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria alimentaria, textil, cosmética y medicinal debido a sus compuestos fitoquímicos y nutrientes. A pesar de su importancia, la producción de jamaica en México no satisface la demanda interna, lo que resulta en la dependencia de importaciones. Aunque estados como Guerrero, Michoacán y Oaxaca sobresalen en la producción, se necesitan esfuerzos adicionales para impulsar el cultivo en regiones como Puebla. El análisis de la superficie sembrada, producción y rendimiento por hectárea en Puebla subraya la necesidad de políticas agrícolas más consistentes y sostenibles para aprovechar el potencial de la jamaica en México.

Palabras clave: : *Hibiscus sabdariffa*, diversidad genética, Malvaceae, Puebla.

Abstract

The hibiscus flower (*Hibiscus sabdariffa* L.) represents an agricultural treasure rooted in its rich genetic diversity and the history of Mexico. This crop, a member of the Malvaceae family, has been integrated into Mexican agriculture, although it faces challenges in varietal identification and exploration of its genetic diversity. In addition to being grown as a monoculture, Hibiscus has been successfully incorporated into agricultural systems associated with maize. It has a wide range of applications in the food, textile, cosmetic, and medicinal industries due to its phytochemical compounds and nutrients. Despite its importance, hibiscus production in Mexico does not meet domestic demand, resulting in dependence on imports. While states like Guerrero, Michoacán, and Oaxaca excel in production, regions like Puebla require additional efforts to enhance cultivation. The analysis of planted area, production, and yield per hectare in Puebla underscores the need for more consistent and sustainable agricultural policies to take advantage of the potential of hibiscus in Mexico.

Keywords: Cancer: *Hibiscus sabdariffa*, genetic diversity, Malvaceae, Puebla

Introducción

La flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) representa un tesoro agrícola arraigado en su rica diversidad genética. Este cultivo, miembro de la familia Malvaceae, ha encontrado su hábitat en diversos estados de la República Mexicana, aunque aún enfrenta desafíos en cuanto a la identificación varietal y la investigación exhaustiva de su diversidad genética. Más que simplemente un cultivo, la jamaica encarna una historia en constante desarrollo, fusionando tradición, salud y progreso agrícola en cada uno de sus cálices florecientes.

La jamaica no solo se cultiva en forma de monocultivo, sino que también se ha integrado con éxito en sistemas agrícolas asociados al maíz. Su importancia trasciende los límites de la agricultura; los cálices frescos o secos son ingredientes fundamentales en una amplia gama de productos, desde bebidas refrescantes hasta licores (Bolade et al., 2009).

Gracias a su composición rica en compuestos fitoquímicos como ácidos orgánicos, antocianinas, polisacáridos y flavonoides, se le atribuyen propiedades benéficas para la salud humana (Cid y Guerrero, 2012). Además, el cáliz se utiliza como colorante en la elaboración de cosméticos, perfumes, textiles, artesanías, medicinas e incluso alimentos. La semilla de jamaica también se destina a la producción de un aceite altamente valorado, mientras que su tallo, gracias a sus fibras, se emplea en la elaboración de cordeles similares a los de yute y cáñamo. Por último, la flor se utiliza comúnmente en la fabricación de alimento para aves.

Se trata de una planta ampliamente cultivada y utilizada con propósitos comerciales en todo el mundo, ya que tanto sus flores como sus frutos poseen una amplia gama de aplicaciones conocidas. Sin embargo, en la actualidad, en México se necesitan esfuerzos para revitalizar el cultivo de la jamaica, ya que la cantidad producida abastece menos del 50% de la demanda nacional; el déficit se importa de países de África y Asia. Este cultivo tiene un potencial en México, pero se requiere un impulso adicional para alcanzar niveles de producción que satisfagan la demanda

interna y reduzcan la dependencia de las importaciones.

La jamaica: una travesía botánica hasta México

Con un origen discutido entre África y la India, la jamaica llega a México en la época colonial y ahora está profundamente integrada en la cocina mexicana. Utilizada principalmente para preparar agua de jamaica, una de las aguas frescas aromatizadas, se disfrutaban a diario en todo México.

La jamaica es un arbusto que ha tejido su historia a través de continentes y culturas. Su origen, sin embargo, se encuentra envuelto en la incertidumbre, ya que diferentes fuentes sugieren diversas regiones de origen. Algunos etnobotánicos identifican a Sudán, en el norte de África, como el centro de origen (Mohamed et al. 2012), mientras que otros sugieren que es originaria de la India a Malasia (Morton 1987), de donde se introdujo en África en una época muy temprana. El origen incierto de la jamaica surge de la dificultad para identificar los centros exactos de su diversidad genética. Es más factible localizar los centros de diversidad genética de plantas cultivadas que determinar sus lugares de origen, ya que implica evaluar la distribución de la variabilidad poblacional de las especies en un espacio geográfico específico. Los centros de origen de plantas cultivadas, señalados por Vavilov en 1926, coinciden con la intersección de los centros de diversidad biológica y cultural. Uno de los indicios para localizar un posible centro de origen de plantas cultivadas es la presencia de poblaciones de sus parientes silvestres (Vavilov, 1997). Esta divergencia refleja la riqueza de la historia de la jamaica, que ha encontrado su lugar como un cultivo significativo en China, Sudán y Tailandia, y como una presencia menor pero valiosa en diversos países tropicales y subtropicales alrededor del mundo.

La diversidad de la jamaica se manifiesta en dos variedades principales: *Hibiscus sabdariffa* var. *altissima*, apreciada por su fibra de alta calidad, y *Hibiscus sab-*

dariffa var. sabdariffa, que se destaca en aplicaciones alimentarias. Desde sus cálices comestibles rojos o variegados hasta sus fibras utilizadas en la creación de cordones, esta planta ha forjado su camino en la historia agrícola y cultural.

Aunque su linaje es incierto, la jamaica ha viajado a América tropical desde África, India, Malasia y más allá. En México, se arraigó profundamente, llegando a bordo de la Nao de China desde Filipinas en 1565. Desde Acapulco, se dispersó y evolucionó, adaptándose a climas cálidos y encontrando terreno fértil en diversas partes del mundo, incluyendo zonas de África, India, sureste asiático y China, este último siendo el principal productor a nivel mundial.

La historia de la flor de Jamaica es un relato de migración, adaptación y multiplicidad, tejido en los campos de la agronomía y entrelazado con la herencia de cada región que ha acogido sus brillantes cálices (Figura 1).



El municipio de Chiautla, Puebla. Autoría: Yasetda

Chavarin Pineda

Redescubriendo las maravillas ocultas de la jamaica

La flor de jamaica se utiliza en la industria textil, cosmetología, perfumería, medicina y también como planta decorativa. De esta planta, se extraen semillas que se utilizan para hacer aceite comestible. Además, el arbusto produce una flor con un cáliz de color

rojo vino que se utiliza en diversas preparaciones, como té, licor, jalea, vinos, mermelada, gelatina, helado, jarabe, colorante, saborizantes, dulces, pudines y pasteles (Bolade et al., 2009).

Las hojas tiernas de la flor de jamaica son comestibles y se pueden disfrutar en ensaladas. Sorprendentemente, las fibras extraídas de los tallos de la planta se utilizan en lugar del yute y el cáñamo para hacer cuerdas y artesanías en diferentes partes del mundo.

Además, estudios de la jamaica confirman su riqueza en vitaminas A, C, B1, E, minerales y antioxidantes. Estos componentes la convierten en una aliada contra enfermedades, inflamaciones, problemas cutáneos, anemia e infecciones respiratorias. También, contribuye a la limpieza de órganos como el hígado y los riñones (Guardiola y Mach, 2014).

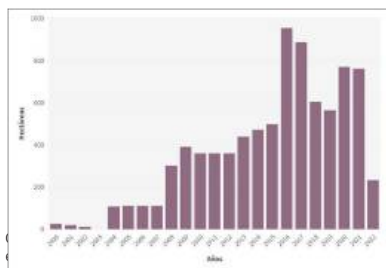
La infusión y el agua de jamaica son prácticas antiguas que se utilizaban para aliviar problemas de salud, combatir resacas, actuar como antiséptico intestinal, mejorar la digestión, conciliar el sueño y prevenir la hipertensión. Además, esta planta es reconocida por su alto contenido vitamínico, especialmente en vitamina C, que ayuda a prevenir el envejecimiento prematuro (Galicia et al., 2008).

Cuando se consume en forma de té, la jamaica tiene propiedades que ayudan a cicatrizar heridas en las encías, aliviar procesos gripales y enfermedades eruptivas, y prevenir infecciones respiratorias, anemia y fatiga. Estudios médicos respaldan la eficacia del agua de jamaica en el tratamiento preventivo de la hipertensión, reduciendo significativamente el colesterol malo y los triglicéridos (Geja y Kassahun, 2020).

El futuro de la jamaica en Puebla: Más allá de las cifras

Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pecuaria (SIAP, 2023), se muestra en el gráfico 1 la superficie sembrada de jamaica en Puebla durante el periodo de 2000 a 2022. En 2022, su cultivo se extendió a 10 estados de la república, destacando la producción en

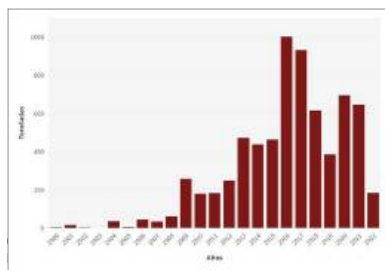
Guerrero, Michoacán y Oaxaca (Figura 2). A nivel nacional, se registró una producción de 7820.48 toneladas en una superficie cosechada de 17,481.2 hectáreas. Es importante destacar que Guerrero contribuyó con 5,830.24 toneladas en una superficie sembrada de 13,852.53 hectáreas, representando el 74.55% de la producción nacional. Por otro lado, Puebla ocupó el cuarto lugar con una producción de 182.68 toneladas en una superficie sembrada de 231.6 hectáreas, lo que equivale al 2.33% de la producción nacional.



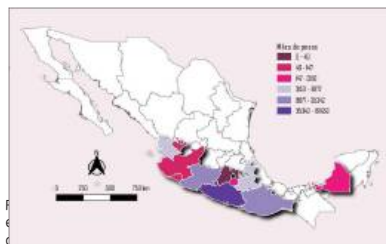
Elaboración propia, con datos de SIAP, 2022.

posterior. Es importante destacar que los años 2008 y 2009 sobresalen por un incremento en la siembra, posiblemente atribuible a cambios en las prácticas agrícolas.

En el gráfico 2 se observa la producción de jamaica en Puebla durante el periodo de 2000 a 2022 (SIAP, 2023). En 2022, en la entidad poblana se obtuvo una producción total de 182.68 toneladas. De los municipios productores, Huaquechula con 59.02 toneladas, Cohetzala con 14.82, Chiautla de Tapia con 53.51, Huehuetlán El Chico con 30.53, e Ixcamilpa de Guerrero con 24.8 toneladas.



propia, con datos de SIAP, 2022.

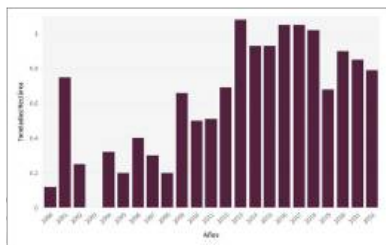


La superficie sembrada de jamaica por municipio en la entidad poblana en 2022 (SIAP, 2023), revela que se cosecharon un total de 231.6 hectáreas. Cabe señalar que ya son escasos los municipios donde se cultiva esta planta. Destacan Huaquechula con 38 hectáreas, Cohetzala con 24.3, Chiautla de Tapia con 86.3, Huehuetlán El Chico con 43, e Ixcamilpa de Guerrero con 40 hectáreas.

El análisis de la superficie sembrada de jamaica en Puebla, entre los años 2000 y 2022, revela fluctuaciones significativas. Se observa un aumento progresivo hasta 2016, seguido de una disminución

En cuanto a la producción de jamaica, se evidencia una tendencia similar a la superficie sembrada, con un crecimiento hasta 2016, seguido de variaciones posteriores. Durante los años 2009, 2010, 2011 y 2012, se observan niveles estables y relativamente altos de producción. No obstante, los años 2020 y 2021 muestran una disminución en la producción.

Por último, el gráfico 3 presenta el rendimiento de jamaica en Puebla durante el periodo de 2000 a 2022 (SIAP, 2023). En 2022, en la entidad poblana se logró un rendimiento promedio de 0.79 toneladas por hectárea. De los municipios productores, Huaquechula con 1.55 toneladas por hectárea, Cohetzala con 0.61, Chiautla de Tapia con 0.62, Huehuetlán El Chico con 0.71, e Ixcamilpa de Guerrero con 0.62 toneladas por hectárea.



El rendimiento de jamaica presenta un patrón de aumento constante hasta 2013, seguido de cierta estabilidad en los años posteriores. Los años 2015, 2016 y 2017 exhiben un rendimiento constante, mientras que los últimos años muestran un rendimiento inferior, aunque aún superior a los niveles iniciales.

Hacia una producción sustentable de jamaica

La jamaica es un monocultivo de temporal y su siembra se lleva a cabo entre junio y agosto, la cosecha se lleva a cabo de forma manual entre los meses de octubre y noviembre y usualmente se siembra en suelos de baja fertilidad y escasa retención de humedad en donde dichas actividades son realizadas por productores de escasos recursos (Fosado-Quiroz et al., 2021). Debido a que los rendimientos del cultivo de jamaica a nivel nacional son bajos, una opción es combinarlo con otro tipo de cultivos, como son el maíz y el frijol. De esta manera los campesinos obtienen alimento para autoconsumo y algún ingreso adicional por la venta de sus excedentes.

Con la finalidad de disminuir la degradación y la pérdida de fertilidad de los suelos, se han realizado algunas propuestas sobre el manejo del cultivo de jamaica, como la aplicación de sistemas agroforestales y mediante la implementación de protocolos alternativos de fertilización agroecológica (Silva-Galicia et al., 2023). Los árboles en dichos sistemas pueden mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo añadiendo una can-

tividad significativa de materia orgánica por encima y por debajo del suelo, así como liberando y reciclando nutrientes. La aplicación de estas estrategias ha permitido obtener resultados positivos en la producción ecológica de jamaica, como es el incremento de los rendimientos principalmente en zonas degradadas y con pendientes pronunciadas.

Conclusiones

La historia de la jamaica es una narrativa de migración, adaptación y diversidad. Aunque su origen exacto es incierto, su presencia se ha extendido desde África, India y Malasia hasta América tropical, arraigándose en la cultura y la agronomía mexicanas. La jamaica, con su diversidad genética y aplicaciones en diversas industrias, como la alimentaria, textil, cosmética y medicinal, es un recurso valioso por sus compuestos fitoquímicos y nutrientes que ofrecen propiedades antioxidantes y beneficios potenciales para la salud humana.

México tiene un gran potencial para el cultivo de jamaica, sin embargo, su producción actual no satisface la demanda interna, lo que lleva a la dependencia de importaciones. Aunque estados como Guerrero, Michoacán y Oaxaca destacan en la producción, se necesitan esfuerzos adicionales para impulsar el cultivo en regiones como Puebla. Las fluctuaciones en la superficie sembrada, producción total y rendimiento por hectárea en Puebla señalan la necesidad de políticas agrícolas más consistentes y sostenibles. El rendimiento en la producción de jamaica puede incrementarse mediante el establecimiento de alternativas que combinen diversos sistemas como el agroforestal, lo cual puede disminuir la degradación de los suelos e incrementar la producción.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno.

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos para la realización del experimento, se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Referencias

- Bolade, M.K., Oluwalana, I.B. & Ojo, O. 2009. Commercial practice of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) beverage production: Optimization of hot water extraction and sweetness level. *World Journal of Agricultural Sciences* 5: 126-131. <https://doi.org/10.1177/10820132209737>
- Cid, O., S. & Guerrero, B., J.A. 2012. Propiedades funcionales de la jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 6: 47-63. <https://doi.org/10.1177/10820132209737>
- Fosado-Quiroz, R.E., Castro-Rosas, J. & Gómez-Aldapa, C.A. (2021). Producción, composición y usos de la jamaica. *Universitarios Potosinos*, 20–25.
- Galicia, F., L.A., Salinas, M., Y., Espinoza, G., B.M. y Sánchez, F., C. 2008. Caracterización fisicoquímica y actividad antioxidante de extractos de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) nacional e importada. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 14(2): 121-129. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60911556003>
- Geja, W.W. & Kassahun, M.B. 2020. Performance of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in different agro-ecologies of Ethiopia. *Med Aromat Plants* (Los Angeles), 9(3), 352.
- Guardiola, S. y Mach, N. 2014. Potencial terapéutico del *Hibiscus sabdariffa*: una revisión de las evidencias científicas. *Endocrinología y Nutrición*, 61(5): 274-295. <https://10.1016/j.endonu.2013.10.012>
- Mohamed, B.A., Sulaiman, A.A. & Dahab, A.A. 2012. Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) in Sudan, Cultivation and their uses. *Bulletin Environment Pharmacological Life Science*, 1(6): 48–54. <https://bepls.com/may2012/10.pdf>
- Morton, F.J. 1987. Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). Fruit of warm climates. *Creative resources systems, Inc* Miami, Florida, p. 281–286. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1444850>

SIAP. 2023. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera, SAGARPA, México. [Consultado 10-12-2022]. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Silva-Galicia, A., Larsen, J., Álvarez-Espino, R. & Ceccon, E. (2023). Agroecological and agroforestry strategies to improve organic hibiscus productivity in an Indigenous non-governmental organization from Mexico. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38. <https://doi.org/10.1017/S1742170522000369>

Vavilov, N.I. 1997. Origin and geography of cultivated plants. St. Petersburg: VIR.

GLIFOSATO: EL HERBICIDA QUE ENVENENA AL PLANETA

GLYPHOSATE: THE HERBICIDE THAT POISONS THE PLANET

Miguel Juárez Tecua(1,2),
María Eugenia Castro(2),
Bouزيد Gassoumi(3),
Francisco J. Melendez(4)

<https://orcid.org/0009-0004-0972-941X>
<https://orcid.org/0000-0003-1716-7707>
<https://orcid.org/0000-0002-7913-7768>
<https://orcid.org/0000-0002-5796-0649>

Fecha de recepción: 6 de Junio 2024
Fecha de revisión: 10 de diciembre 2024
Fecha de publicación: 20 de enero 2025
Folio: A11N13.25/931

1Estudiante de Maestría en Ciencias Químicas, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP

2Centro de Química del Instituto de Ciencias, ICUAP, BUAP, 72570, Puebla, México

3Laboratory of Advanced Materials and Interfaces (LIMA), Faculty of Science, University of Monastir, 5000, Monastir, Tunisia

4Laboratorio de Química Teórica, Facultad de Ciencias Químicas, BUAP, 72570, Puebla, México

(222) 2295500 ext. 2830 y 7739

miguel.juarez@alumno.buap.mx*

mareug.castro@correo.buap.mx*

gassoumibouزيد2016@gmail.com

francisco.melendez@correo.buap.mx

Resumen

El glifosato es el herbicida más utilizado en el mundo, desde su introducción al mercado en la década de los 70's su consumo ha ido en aumento, principalmente en cultivos de soya y maíz transgénicos a nivel mundial. Este aumento trae como consecuencia una exposición masiva del glifosato al medio ambiente. Diferentes estudios han demostrado la capacidad del glifosato para penetrar en el suelo, favoreciendo la erosión y filtración en aguas tanto superficiales como profundas, contaminando no solo a los mantos acuíferos, sino también a la fauna acuática y a los subsuelos. Los calix[n]arenos (CX-[n]) destacan por su capacidad de ser anfitriones o receptores de moléculas mediante interacciones no-covalentes, por lo que se utilizan principalmente como nanotransportadores. En este artículo, se informa sobre el estado actual del glifosato como contaminante ambiental y el estudio de calix[n]arenos para su remoción, mediante el uso de la química computacional.

Palabras clave: Glifosato, herbicida, contaminación, calix[n]arenos, química computacional.

Abstract

Glyphosate is the most used herbicide in the world. Since its introduction to the market in the decade of the 70s, its consumption has been increasing, mainly in transgenic soybean and corn crops worldwide. This increase results in the massive exposure of glyphosate to the environment. Different studies have demonstrated the ability of glyphosate to penetrate the soil, favoring erosion and filtration in both surface and deep waters, contaminating not only the aquifers but also the aquatic fauna and subsoil. Calix[n]arenes (CX-[n]) stand out for their ability to be hosts or receptors of molecules through non-covalent interactions, which is why they are mainly used as nanocarriers. This article talks about how glyphosate is currently affecting the environment and how computational chemistry can be used to study calix[n]arenes as a way to get rid of it.

Keywords: Glyphosate, herbicide, pollution, calix[n]arenes, computational chemistry.

Historia del glifosato

El glifosato es una sal, isopropilamina de N-(fosfonometil) glicina, tiene un peso molecular de 169.07 g/mol, su presentación comercial en solución es clara, viscosa y de color ambarino, con olor a amina y un punto de fusión de 200 °C. En agua presenta una solubilidad de 1050 g/L (25 °C, pH 4.3), pero es insoluble en disolventes orgánicos comunes como acetona, etanol y xileno (NCBI et al., 2023).

Durante la década de los 70's, el Dr. John Franz, recién transferido al departamento de agricultura de la empresa Monsanto en Estados Unidos de América, empezó a investigar compuestos que sirvieran como potenciales agentes descalcificadores. Cerca de 100 compuestos análogos al ácido aminometilfosfónico (AMPA) fueron sintetizados, de los cuales dos compuestos mostraron actividad herbicida: el glifosato y el ácido aminometilfosfónico (ATMP). Fue así que por primera vez en 1970, Monsanto sintetizó al glifosato y fue introducido al mercado en 1974, con el nombre de "Roundup". Por su hallazgo, Franz recibió la Medalla Nacional de Tecnología en 1987 y la Medalla Perkin en Química Aplicada en 1990 (Dill, G. et al., 2010). Posteriormente, en 1996, Monsanto introdujo una línea de semillas genéticamente modificadas (transgénicas), resistentes al glifosato bajo la marca "Roundup ready", lo que incrementó las ventas en Estados Unidos y popularizó el uso de semillas transgénicas y glifosato en todo el mundo (Dill, G. M. et al., 2010).

Glifosato a nivel mundial

El glifosato se utiliza en todo el mundo como herbicida de tipo foliar, no selectivo y de amplio espectro, ingresando a la planta a través de las hojas en lugar de las raíces. Desde su introducción al mercado y con el desarrollo de cultivos genéticamente modificados su uso en todo el mundo ha aumentado en más de un 1,500%, principalmente en el cultivo de maíz, algodón y soja (CONAHCYT et al., 2020).

Actualmente, se utilizan alrededor de

600,000 a 750,000 toneladas al año de glifosato en el mundo y se espera que para el año 2025 la cantidad aumente a las 900,000 toneladas (Maggi, F. et al., 2020) (Figura 1).

La contaminación por herbicidas es un problema global. Sin embargo, según (Lajmanovich, R. et al. 2023), el 95% de los cultivos transgénicos se concentran en China, Estados Unidos, Canadá, Brasil y Argentina. Por mencionar algunos ejemplos, en Argentina, la provincia de Santa Fe se destaca como la principal productora de soja transgénica, enfrentando niveles elevados de contaminación por glifosato en ríos. Incluso, estudios han encontrado residuos de glifosato en el tejido muscular de peces destinados al consumo humano (Lajmanovich, R. et al. 2023).

En Brasil, se reportó la presencia de glifosato en muestras de aire de zonas urbanas con concentraciones promedio de 1.006 µg/m³. Esta cantidad se considera muy alta y representa un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente (Souza et al. 2019).



Figura 1. Imagen de un tractor que rocía herbicidas en campos de hortalizas (CONAHCYT et al., 2020).

Glifosato en México

En México, diferentes informes indican que el glifosato se utiliza en la agricultura industrial en cantidades entre 1.5 y 4.3 kg/ha. Desde la década de 1980, el glifosato también se ha utilizado como desecante en cultivos anuales de maíz, frijol, cebada, avena, papa, trigo, lentejas y garbanzos para acelerar y sincronizar la muerte de las plantas (COFEPRIS et al., 2020).

Por otro lado, México no es autosuficiente en la producción de maíz amarillo, por lo que el 45% de su maíz es importado de

Estados Unidos de América, país que consume anualmente el 19% del consumo total global estimado de glifosato y alrededor del 90% de su producción es transgénica (CIMA et al., 2020).

También se ha encontrado en el suelo y el agua potable de las ciudades de Hopelchén, Campeche, y en los embalses artificiales de Chiapas, algunos de los cuales se encuentran ubicados en áreas naturales protegidas (ANP) (Ruiz-Toledo, J. et al., 2014) (Figura 2).

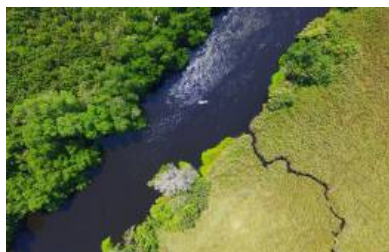


Figura 2. Fotografía panorámica de la reserva de la biósfera La Encrucijada en Chiapas (CO-NANP et al., 2020).

Mecanismo de acción del glifosato

La fitotoxicidad del glifosato se debe al bloqueo del complejo enzimático 5-enolpiruvil shikimato-3-fosfato sintasa (EPSPS) en la vía metabólica del shikimato (Figura 3a)), presente en los cloroplastos de la célula vegetal. El shikimato, anión del ácido shikímico, se une al sustrato natural del complejo, el fosfoenolpiruvato (PEP), actuando como precursor en la síntesis de aminoácidos esenciales: tirosina (TIR), fenilalanina (PHE) y triptófano (TRP). Estos aminoácidos son posteriormente utilizados en la producción de proteínas estructurales, enzimas, así como en sustancias importantes para la defensa de las plantas como fitoalexinas, fenoles, auxinas, antocianinas y lignina (Maqueda, C. et al., 2017) (Figura 3 b)). Esta vía metabólica sólo ocurre en plantas, algunas bacterias y hongos. El glifosato también puede reducir la fotosíntesis al inhibir la biosíntesis de la clorofila, los ácidos

grasos y los aminoácidos (Ramírez, M. F., 2014).

Las semillas resistentes al glifosato han sido modificadas genéticamente para expresar el gen CP4 de *Agrobacterium* sp., el cual codifica la EPSPS. Esta enzima tiene una estructura diferente a la EPSPS nativa de la planta. La diferencia clave es que la EPSPS de *Agrobacterium* sp. es insensible o menos sensible al glifosato en comparación con la EPSPS de las plantas no modificadas genéticamente. Por lo tanto, cuando se aplica glifosato sobre cultivos genéticamente modificados que expresan esta enzima, la planta puede continuar produciendo aminoácidos esenciales, mientras que la maleza y otras plantas sensibles al glifosato no pueden hacerlo (Funke, T. et al., 2009) (Figura 3 c)).

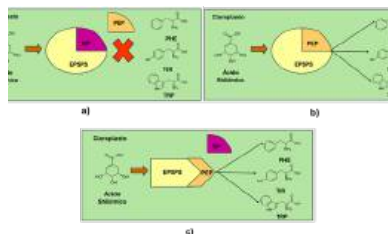


Figura 3. Vía metabólica de shikimato a) Síntesis afectada por glifosato (GP), b) Síntesis natural de aminoácidos y c) Síntesis modificada genéticamente resistente al glifosato.

Impacto ambiental

Los herbicidas que contienen glifosato tienen la capacidad de contaminar el suelo, el agua y los alimentos en el área donde se esparcen. Esta relación entre el glifosato y el medio ambiente es compleja y varía de un tipo de suelo a otro. El glifosato es altamente soluble en agua, pero también tiene la capacidad de unirse al suelo bajo ciertas condiciones, particularmente a suelos con arcillas, los cuales tienen alto contenido de silicatos de aluminio (Ruiz-Toledo, J. et al., 2014). Por lo tanto, puede eliminarse rápidamente de suelos comunes o durar más de un año en suelos con un alto contenido de arcilla. Incluso cuando se une a las partículas del suelo, puede disolverse nuevamente con el agua de lluvia en presencia de fosfatos (Humphries, D. et al., 2005).

Por otro lado, la lluvia transporta partículas de suelo que contienen glifosato a las aguas superficiales, donde se absorben por los sedimentos o se disuelven (Rendon-von Osten, J. & Dzul-Caamal, R., 2017) (Figura 4).

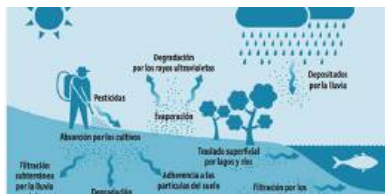


Figura 4. Ciclo de los pesticidas en el medio ambiente (El diario, Madrid, et al., 2023).

Estructuras de glifosato en el medio ambiente

El glifosato como gas existe principalmente en tres formas: la estructura con carga neutra (NE) que predomina en el 90% de las moléculas, mientras que las dos estructuras de zwitterión posibles (con carga negativa en el grupo carboxilato (ZWC) y con carga negativa en el grupo fosfato (ZWP)) solo están presentes en el 5%, debido a que requieren altos niveles de energía para existir (Fliss, O. et al., 2021) (Figura 5).

En disolución, la formación de diferentes estructuras de glifosato depende principalmente de dos factores: el pH y la concentración de sales en la disolución. En aguas dulces de riego y agua potable (con baja concentración de sales) con un pH entre 5 y 7, existe como zwitterión (ZWP). En aguas saladas (con alta concentración de sales) de cauces de ríos, con un pH entre 7 y 9, existe como anión con carga -1 (AN-1), mientras que por encima de un pH de 9, en agua de mar, se encuentra la forma de anión con carga -3 (AN-3). El anión con carga -2 (AN-2) solo existe en agua dulce (baja concentración de sales) y con valores de pH entre 7 y 9 (Peixoto, M. M. et al., 2015) (Figura 5).

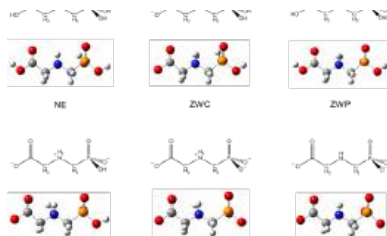


Figura 5. Estructuras de glifosato en el medio ambiente en gas y en disolución.

Nanoestructuras y glifosato

Se han reportado estudios experimentales y teóricos donde se utilizaron diferentes nanoestructuras de carbono para atrapar glifosato. En 2017, de Oliveira y col. investigaron la absorción de glifosato utilizando nanocajas de boro nitrógeno B₁₂N₁₂ mediante cálculos DFT, obteniendo una energía de adsorción de -53.97 kcal/mol (de Oliveira, O. V. et al., 2017) (Figura 6 a)).

En 2018, Ashwin y col. emplearon calix[4]arenos funcionalizados con grupos terbutilo en el borde superior y dopados con nanopartículas de Fe para detectar la presencia de glifosato en disolución a través de experimentos de fluorescencia, obteniendo resultados positivos en la detección de glifosato (Ashwin, B. et al., 2018) (Figura 6 b)).

En 2020, Diel y col. utilizaron nanotubos de carbono funcionalizados con grupos COOH dopados con nanopartículas de Fe para remover glifosato de una matriz acuosa mediante procesos de adsorción, logrando una remoción del 86% (Diel, J. C. et al., 2021) (Figura 6 c)).

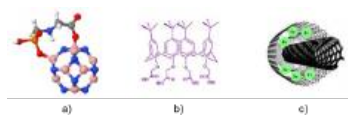


Figura 6. Nanoestructuras de carbono utilizadas para la remoción de glifosato: a) Nanocaja de boro nitrógeno, b) Calix[4]areno funcionalizado y c) Nanotubo de carbono (de Oliveira, O. V. et al., 2017; Ashwin, B. et al., 2018; Diel, J. C. et al., 2021).

Modelando Calix[n]arenos

Entre los compuestos macrocíclicos, los calixarenos (CX[n]) son probablemente los más prometedores para su aplicación en el área de complejos anfitrión-huésped (host-guest complexes). Su disponibilidad sintética, baja toxicidad y presencia de anillos reactivos son características que los hacen relevantes dentro de la química supramolecular. Son derivados de la condensación de fenoles y aldehídos formados por un número de unidades variable, que puede estar entre 4 y 20 unidades, aunque los calix[n]arenos de 4, 5, 6, 7 y 8 unidades son los más comunes (Böhmer, V. & Shivanyuk, A., 2000) (Figura 7 a)). Pueden existir en una conformación que recuerda a una canasta o un jarrón; de hecho, el nombre calixareno se deriva de un tipo de jarrón griego llamado cáliz (Fulton, D. A. & Stoddart, F., 2001) (Figura 7 b)).

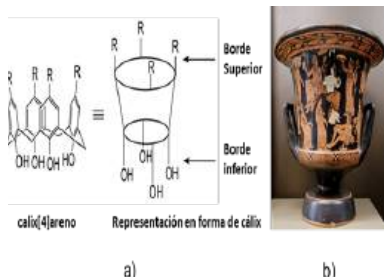


Figura 7. Comparación entre a) la estructura del calix[4]areno y b) un cáliz usado en la antigua Grecia (Yousaf, A. et al., 2003; Google, s.f.).

Los calix[n]arenos tienen la capacidad de actuar como receptores de una variedad de especies huésped (guest). Pueden interactuar con sustratos orgánicos neutros, catiónicos y aniónicos, así como con iones metálicos. Para el reconocimiento y detección de moléculas se emplean calix[n]arenos funcionalizados, que contienen distintos grupos funcionales capaces de generar interacciones de tipo T-catión, electrostáticas, puentes de hidrógeno, entre otras, formando complejos estables (Gassoumi, B. et al., 2021a).

Es decir, los calix[n]arenos funcionalizados actúan como sensores moleculares, ya que poseen una estructura superficial específica con propiedades químicas interfaciales, con diferentes formas de cavidades, para facilitar la estabilización del complejo anfitrión-huésped (host-guest complex) (Gassoumi B. et al., 2021b).

A través de la distribución de la densidad electrónica en las moléculas es posible conocer diferentes propiedades, como los sitios reactivos propensos a ataques nucleofílicos (regiones en color azul) o electrofílicos (regiones en color rojo), o los sitios susceptibles de llevar a cabo interacciones intermoleculares (regiones en color amarillo y verde), analizando el mapa del potencial electrostático molecular (MEP) (Figura 8 a)). Otras propiedades topológicas que dependen de la densidad electrónica son los puntos críticos de enlace y los caminos de enlace, conceptos relacionados con el enlace químico a través de la teoría cuántica de átomos en moléculas (QTAIM). Además, la estabilidad de una molécula o complejo depende en gran medida del tipo de enlaces o interacciones entre los átomos que la conforman.

La representación gráfica de interacciones no-covalentes (NCI) y el mapa de gradiente de densidad reducida (RDG) (Figuras 8 b) y c)) permite entender cómo las interacciones no-covalentes entre la molécula anfitrión (host) y las moléculas huésped (guest) estabilizan a este tipo de complejos, explicando su gran capacidad de adsorción (Gassoumi, B. et al., 2022a, Gassoumi, B. et al., 2022b, Gassoumi, B. et al., 2022c).

Actualmente, nuestro grupo de investigación estudia las propiedades fisico-químicas de la molécula de glifosato y su interacción con calix[n]arenos con $n = 4, 6$ y 8 , usando métodos de la química computacional, a fin de proponer alternativas para la remoción de glifosato del medio ambiente (Figura 8).

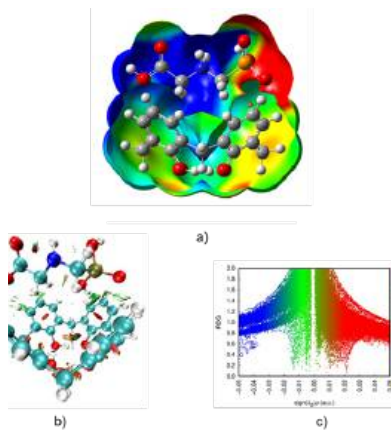


Figura 8. a) Mapa del potencial electrostático molecular (MEP) del complejo CX[4]-glifosato, b) Gráfica de interacciones no-covalentes (NCI) del complejo CX[4]-glifosato y c) Mapa de gradiente de densidad reducida (RDG) de las interacciones no-covalentes del complejo CX[4]-glifosato. Los puentes de hidrógeno se visualizan en color azul, las interacciones de van der Waals en color verde y las repulsiones electrostáticas en color rojo.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

Declaración de privacidad

Los datos de este artículo, así como los detalles técnicos se pueden compartir a solicitud directa con el autor de correspondencia.

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

MJT agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por la beca de Maestría (CVU 1267115). Los autores agradecen al proyecto 100256733-VIEP2024 de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP-BUAP), al Laboratorio Nacional de Supercómputo del Sureste de México (LNS-BUAP) y al Cuerpo Académico BUAP-CA-263 (SEP, PRODEP).

Referencias

Ashwin, B. C. M. A., Saravanan, C., Stalin, T. Muthu, P. & Rajagopal, S. (2018). FRET based solid state luminescent sensor for glyphosate using calixarene grafted ruthenium (II) bipyridine doped silica nanoparticle. *ChemPhysChem*. 19. 2768. doi: 10.1002/cphc.201800447.

Böhmer, V. & Shivanyuk, A. (2000). Calixarenes in self-assembly phenomena, in *Calixarenes in Action*, Imperial College Press, London Eds., 203–240, doi: 10.1002/chem.200305633.

CIMA (2020). Importaciones y exportaciones de maíz. Página web: https://www.cima.aserca.gob.mx/work/models/cima/pdf/ci_ie/2020/Importaciones/y/exportaciones_maiz_240620. (último acceso 29 de enero de 2024).

COFEPRIS (2020). Lista de evaluación de inocuidad caso por caso de los organismos genéticamente modificados (OGM). Página web: <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistemanacional/registro/lista-evaluacion-inocuidad-181-portal.pdf> (último acceso 29 de enero de 2024).

CONAHCYT (2020). Expediente científico sobre el glifosato y los cultivos GM. Página web: <https://conahcyt.mx/expediente-cientifico-sobre-el-glifosato-y-los-cultivos-gm/> (último acceso 29 de enero de 2024).

CONANP (2020). Programa de manejo reserva de la biosfera la encrucijada Chiapas. Página web: www.conanp.gob.mx/datos_abiertos/DGCD/50.pdf (último acceso 29 de enero de 2024).

De Oliveira, O. V., dos Santos, J. D., Silva, J. C. F., Luciano, T. C., Junior, M. F. F. & Franca, E. F. (2017). Theoretical Investigations of the Herbicide Glyphosate Adsorption on the B12N12 Nanocluster. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*. 9, 3, 175-180. doi: 10.17807/orbital.v9i3.991

Diel, J. C., Franco, D. S. P., dos Santos, S. N., Pereira, H. A., Moreira, K.

S., de L. Burgo, T. A., Foletto, L. E. & Dotto, G. L. (2021). Carbon nanotubes impregnated with metallic nanoparticles and their application as an adsorbent for the glyphosate removal in an aqueous matrix. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9, 2213-3437. doi: 10.1016/j.jece.2021.105178.

Dill, G. M., Sammons, R. D., Feng, P. C. C., Kohn, F., Kretzmer, K., Mehrsheikh, A., Bleeke, M., Honegger, J. L., Farmer, D., Wright, D. & Hauptfear, E. A. (2010). Glyphosate: Discovery, Development, Applications, and Properties. In *Glyphosate Resistance in Crops and Weeds*, Nandula Editorial, 319–325. doi: 10.4237/as.2013.44028.

ElDiario.es (2023) Revista Ecologista nº96, de Ecologistas en Acción. Edición de periódicos, Madrid. Página web: https://www.eldiario.es/opinion/zona-critica/plaguicidas-agua-consumo-humano_129_9895813.html (último acceso 29 de enero de 2024).

Fliss, O., Essalah, K. & Fredj, B. A. (2021). Stabilization of glyphosate zwitterions and conformational/tautomerism mechanism in aqueous solution: insights from ab initio and density functional theory-continuum model calculations. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 23. 46. doi: 10.1039/D1CP03161A.

Fulton, D. A. & Stoddart J. F. (2001) Neoglycoconjugates based on cyclodextrins and calixarenes, *Bioconjugate Chemistry*. 12, 655-672. doi:10.1021/bc0100410.

Funke, T. Yang, Y. Han, H. Healy-Fried, M. Olesen, S. Becker, A. & Schönbrunn, E. (2006). Structural basis of glyphosate resistance resulting from the double mutation Thr97 Ile and Pro101 Ser in 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase from *Escherichia coli*. *Journal of Biological Chemistry*, 281(51), 38412-38419. doi:10.1074/jbc.M608512200.

Gassoumi, B., Ezzahra, B. F., Ghalla, H., & Chaabane, R. B. (2021a). Possibility of Complexation of the Calix[4]Arene Molecule with the Polluting Gases: DFT and NCI-RDG Theory. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.93838.

Gassoumi, B., Mohamed, F. E., Castro, M.E., Melendez, F.J., Karayel, A. L. Nouar, F.,

Ghalla, H., Özkinali, S., Kovalenko, V. I., Chaabane, R. B. & Ouada, B. H. (2021b). In silico exploration of O-H...X₂⁺ (X = Cu, Ag, Hg) interaction, targeted adsorption zone, charge density iso-surface, O-H proton analysis and topographic parameter theory for calix[6]arene and calix[8]arene as model, *Journal of Molecular Liquids*. 334. doi:10.1016/j.molliq. 116127.

Gassoumi, B., Echabaane, M., Mohamed, F. E., Nouar, L., Madi, F., Karayel, A., Ghalla, H., Castro, M. E., Melendez, F. J., Özkinali, S., Rouis, A. & Chaabane, R. B. (2022a). Azo-methoxy-calix[4]arene complexes with metal cations for chemical sensor applications: Characterization, QTAIM analyses and dispersion-corrected DFT- computations, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 264. doi:10.1016/j.saa.2021.120242.

Gassoumi, B., Mehri, A., Hammami, H., Castro, M. E., Karayel, A., Özkinali, S., Melendez, F. J., Nouar, L., Madi, F., Ghalla, H., Chaabane, R. B., & Ouada, H. B. (2022b). Spectroscopic characterization, host-guest charge transfer, Hirshfeld surfaces, AIM-RDG and ELF study of adsorption and chemical sensing of heavy metals with new derivative of Calix [4]quinone: A DFT-D3 computation. *Materials Chemistry and Physics*. 278, doi:10.1016/j.matchemphys.2021.125555.

Gassoumi, B., Dlala, N. A., Echabaane, M., Ghalla, H., Zhou, Y., Castro, M. E., Melendez, F. J., Leila, N., Madi, Fatiha. & Chaabane, R. B. (2022c). Adsorption of toxic and non-toxic metals with new model of CX[4]: Experimental and computational investigation, Spectroscopic, QTAIM, and Antibacterial activity analyses. *Journal of Molecular Structure*. 1268. doi:10.1016/j.molstruc.2022.133618.

Humphries, D., Byrtus, G. & Anderson, A. M. (2005). Glyphosate residues In Alberta's atmospheric deposition, soils and surface waters. *Water Research Users Group Alberta Environment*. 10-20. Página web: <http://www3.gov.ab.ca/env/info/infocentre/publist.cfm> (último acceso 29 de enero de 2024).

Lajmanovich, R. C., Repetti, M. R., Boccioni, A. P. C., Michlig, M. P., Demonte, L., Attademo, A. M. & Peltzer, P. M. (2023). Cocktails of pesticide residues in *Prochilodus lineatus* fish of the Salado River (South America): First record of high concentrations of polar herbicides. *Science of the Total Environment*. 870. 162019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162019

Maggi, F., Cecilia, D., Tang, F. H. M. & McBratney, A. (2020). The global environmental hazard of glyphosate use. *Science of The Total Environment*. 137-167. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137167.

Maqueda, C., Undabeytia, T., Villaverde, J., & Morillo, E. (2017). Behaviour of glyphosate in a reservoir and the surrounding agricultural soils. *Science of the Total Environment*. 593-594, 787-795. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.202

National Center for Biotechnology Information (2023). PubChem Compound Summary CID 3496, Glyphosate, Página web: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Glyphosate> (último acceso 29 de enero de 2024).

Peixoto, M. M., Bauerfeldt, F. G., Herbst, H. M., Pereira, S. M. & da Silva, O. C. (2015). Study of the Stepwise Deprotonation Reactions of Glyphosate and the Corresponding pKa Values in Aqueous Solution. *Journal of Physical Chemistry*. 119, 5241-5249. doi: 10.1021/jp5099552

Ramírez, M. F. (2021). El herbicida glifosato y sus alternativas. Serie Informes Técnicos IRET. 44. Universidad Nacional, Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas, Heredia. 7. Página web: http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ipen.org/sites/default/files/documents/serie_tecnica_44_glifosato_1_1.pdf. (último acceso 29 de enero de 2024).

Rendon- von Osten, J. & Dzul-Caamal, R. (2017). Glyphosate Residues in Groundwater, Drinking Water and Urine of Subsistence Farmers from Intensive Agriculture Localities: A Survey in Hopelchén, Campeche, Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 14, 595-600. doi:10.3390/ijerph14060595

Ruíz-Toledo, J., Castro, R., Rivero-Pérez, N., Bello-Mendoza, R. & Sánchez, D. (2014). Occurrence of Glyphosate in water bodies derived from intensive agriculture in a tropical region of Southern Mexico, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 93. 289-293. doi: 10.1007/s00128-014-1328-0

Souza, M. G., da Silva, A. C. dos Santos, A. R. & Rigotto, R. M. (2019). Evaluation of the atmospheric contamination level for the use of herbicide glyphosate in the northeast region of Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 191, 604. doi: 10.1007/s10661-019-7764-x.

Yousaf, A., Hamid, A. S., Bunnori, M. N. & Ishola, A. A. (2015). Applications of calixarenes in cancer chemotherapy: facts and perspectives. *Drug Design, Development and Therapy*. 9, 2831-2838. doi:10.2147/DDDT.S83213

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: ALIADOS EN LOS ESTUDIOS SOCIOAMBIENTALES

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS: ALLIES IN
SOCIOENVIRONMENTAL STUDIES

Itzel Fabiola Arroyo Ortega

ISSN 2448-5829

Año 11, No. 31, 2025, pp. 210 - 220

<https://orcid.org/0000-0002-4619-8185>

Recibido: 21/Agosto/2024

Aprobado: 2/Diciembre/2024

Publicado: 20/Enero/2025

CEIBAAS-Instituto de Ecología, A.C.
Antigua Carretera a Coatepec No. 351, Xalapa 91073, Veracruz,
México. itzel.arroyo@inecol.mx

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas clave para el análisis y visualización de datos geoespaciales, permitiendo capturar, almacenar, analizar y mostrar información geográficamente referenciada. Los SIG están compuestos por hardware, software, datos geoespaciales, metodologías y usuarios capacitados para su manejo. Estos sistemas permiten una amplia gama de aplicaciones que dependen de sus objetivos de uso como la navegación, el turismo, la construcción y el comercio. En el ámbito socioambiental, los SIG son cruciales para la planificación territorial, el análisis de riesgos y la gestión de los recursos naturales y la biodiversidad. Facilitan el análisis de fenómenos como el cambio climático, la contaminación y la distribución de enfermedades y además, permiten el análisis de la exposición a contaminantes y sus impactos en la salud pública, proporcionando una comprensión más profunda de la relación entre el entorno y las actividades humanas. Su capacidad para adaptar aplicaciones a diversos objetivos los convierte en una herramienta invaluable para la toma de decisiones informadas y en la implementación de intervenciones efectivas.

Palabras clave: información geoespacial, planificación territorial, gestión de los recursos, contaminación ambiental, salud poblacional

Abstract

Geographic Information Systems (GIS) are essential tools for analyzing and visualizing geospatial data, enabling the capture, storage, analysis, and display of geographically referenced information. GIS comprises hardware, software, geospatial data, methodologies, and skilled users. These systems support a wide range of applications depending on their intended use, such as navigation, tourism, construction, and commerce. In the socio-environmental field, GIS are crucial for territorial planning, risk analysis, and the management of natural resources and biodiversity. They facilitate the study of phenomena like climate change, pollution, and disease distribution. They also enable the assessment of exposure to pollutants and their impacts on public health, providing a deeper understanding of the relationship between the environment and human activities. Their ability to adapt to various objectives makes GIS an invaluable tool for informed decision-making and the implementation of effective interventions.

Keywords: geospatial information, land-use planning, resource management, environmental pollution, public health

¿Qué son los Sistemas de Información Geográfica?

Hoy en día, usando las tecnologías a la mano, cada vez que nos desplazamos, ya sea a pie, en coche o utilizando el transporte público, una red invisible de datos trabaja silenciosamente para guiarnos, optimizar nuestros trayectos y ayudarnos a encontrar lo que necesitamos en el camino. Esta red no solo nos indica en dónde estamos, sino también qué sucede a nuestro alrededor en tiempo real. Desde evitar un embotellamiento hasta descubrir nuevos lugares, estas acciones cotidianas están impulsadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG), herramientas que, aunque operan en segundo plano, desempeñan un papel crucial en nuestra vida diaria sin que apenas lo notemos. Pero los SIG no se limitan solo a la navegación; estas herramientas abarcan una amplia variedad de aplicaciones en diversos sectores como el turismo, el transporte, la construcción y el comercio, entre otros. Los SIG se han convertido en una herramienta esencial para analizar datos espaciales y tomar decisiones informadas en diversos campos.

En los últimos años, los SIG han demostrado ser una herramienta invaluable para la comprensión del territorio. Pero ¿qué son exactamente los SIG? Debido a la amplia variedad de ámbitos y disciplinas en las que se utilizan, es difícil encapsularlos en una definición única; sin embargo, una definición ampliamente aceptada es la de Burrough (1986), quien describe a los SIG como sistemas informáticos capaces de capturar, almacenar, analizar y mostrar información geográficamente referenciada mediante mapas.

Estos datos geoespaciales describen tanto la ubicación, como los atributos de las características espaciales; por ejemplo, al describir un río, se considera su ubicación junto con atributos como la longitud, el caudal, la calidad del agua y los puntos de afluencia. En este contexto, los SIG se enfocan en estudiar y entender las estructuras espaciales, en donde conocer la ubicación de los

elementos geográficos relacionados con fenómenos específicos es fundamental para su análisis y comprensión (Santos Preciado, 2020).

Componentes de los SIG

Los SIG son sistemas complejos en los que confluyen diferentes elementos para su funcionamiento. Los SIG están compuestos por componentes tecnológicos, como el hardware y el software; el componente humano, que son las personas usuarias; los procedimientos o metodología que guían su aplicación; y, lo más importante, los datos geoespaciales que alimentan y dan sentido a todo el sistema (Figura 1).



Figura 1. Componentes de los Sistemas de Información Geográfica.
Elaboración propia.

El hardware de un SIG abarca todo el componente físico que hace posible su funcionamiento. Esto incluye computadoras, discos duros y memoria RAM para el procesamiento, almacenamiento y manejo de datos; impresoras y plotters para generar mapas en formato físico; digitalizadores y escáneres para transformar mapas en formato físico a datos espaciales manejables; así como dispositivos GPS (Global Positioning System) y móviles, esenciales para el trabajo de campo (Chang, 2019).

El software de los SIG, considerado como el componente lógico de estos sistemas (Santos Preciado, 2020), abarca una gran variedad de programas y aplicaciones, tanto comerciales como de código abierto, diseñados para gestionar, analizar y visualizar datos geoespaciales, entre

otras funciones. Ejemplos de software comerciales o de paga incluyen ArcGIS, Surfer (Golden Software) y SuperGIS, que son ampliamente utilizados en este sector por sus potentes herramientas y capacidades avanzadas. Por otro lado, en el ámbito de los Software Libre y de Código Abierto (FOSS, por sus siglas en inglés), QGIS (Quantum GIS), destaca como una opción popular debido a su flexibilidad y comunidad activa de desarrollo, aunque existen otros como SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) y GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), por mencionar algunos. Estos programas suelen ser muy fáciles de usar, con menús desplegables, íconos y herramientas que facilitan el trabajo. Además, funcionan en diferentes sistemas operativos, como Windows, Linux, o incluso en plataformas web (Chang, 2019). Además, algunas aplicaciones especializadas permiten realizar tareas más avanzadas, como simular modelos geográficos o integrar datos en tiempo real.

El componente humano, es decir, los usuarios de los SIG desempeñan un papel crucial en la definición de los objetivos y propósitos del uso de estos sistemas. Aquellos con experiencia en el manejo de SIG son capaces de diseñar, mantener y analizar datos dentro del sistema para realizar diversas tareas (Reddy, 2018). Son responsables de interpretar los resultados obtenidos y presentarlos de manera clara y efectiva, asegurando que la información sea comprensible y útil para la toma de decisiones.

La metodología de los SIG incluye métodos y técnicas científicas rigurosas y procesos estandarizados que guían el uso y la integración de la información para la obtención de resultados. Las metodologías abarcan la planificación de estudios, la recolección y análisis de datos, y la validación de resultados. Los procesos incluyen la integración de datos geoespaciales, la aplicación de técnicas analíticas y la interpretación de los resultados para asegurar la precisión y la relevancia científica. Esta organización es fundamental para garantizar que los SIG se utilicen de manera efectiva en la investigación y el análisis espacial, man-

teniendo altos estándares de calidad y rigor científico.

Finalmente, los datos geoespaciales, por su naturaleza, implican la localización precisa de características espaciales en la superficie terrestre. Para representar estas ubicaciones, se emplean sistemas de coordenadas, que pueden ser geográficas o proyectadas (Chang, 2019). Un sistema de coordenadas geográficas se define por su datum, es decir, por el modelo utilizado para representar la forma de la tierra, por ello puede variar entre regiones. El datum más utilizado a nivel mundial es el WGS84 (World Geodetic System 84) y se expresa en coordenadas de latitud y longitud. Por otro lado, un sistema de coordenadas proyectadas traslada una parte de la superficie de la Tierra a un plano para minimizar las deformaciones y se expresa en coordenadas x, y. El sistema de coordenadas más utilizado es el UTM (Universal Transversal de Mercator), el cual se expresa en metros y se divide en zonas de 6 grados de longitud cada una. Hay un total de 60 zonas que cubren todo el globo, numeradas del 1 al 60. México, en este sistema de coordenadas proyectadas, abarca de la zona 11 a la 16.

Entonces, los datos geoespaciales están siempre asociados a un sistema de coordenadas. En cuanto a su representación, estos datos pueden ser categorizados en datos vectoriales y ráster (Figura 3). El modelo vectorial utiliza objetos geométricos como puntos, líneas y polígonos para representar características espaciales con ubicaciones y límites bien definidos. Mientras que, el modelo ráster utiliza una cuadrícula de celdas para representar características espaciales, asignando a cada celda un valor específico que corresponde a la característica presente en esa ubicación. Estas representaciones permiten analizar la extensión y distribución espacial de diversos fenómenos, como la cobertura vegetal o las áreas urbanas, y también realizar un seguimiento de variables continuas como la altitud, la temperatura y la precipitación.

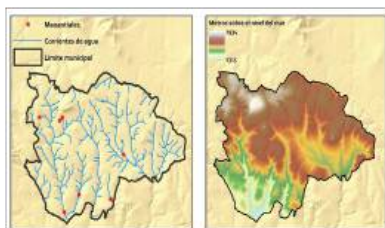


Figura 2. Tipos de datos SIG. A la izquierda, se muestra un modelo vectorial, representado por puntos (manantiales), líneas (corrientes de agua) y un polígono (límite municipal). A la derecha, se observa un modelo ráster de elevación del terreno, en el cual los colores presentan un valor en metros sobre el nivel del mar.

Elaboración propia.

Aplicaciones de los SIG en los estudios sociambientales

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas versátiles, que tienen un abanico de aplicaciones en el ámbito de los estudios socioambientales, estas aplicaciones van desde la planificación y el ordenamiento territorial, el análisis de los diversos riesgos y la gestión de recursos naturales, hasta la investigación sobre la salud poblacional y la contaminación ambiental. Esto es porque los SIG resultan fundamentales para analizar la distribución espacial y la extensión de fenómenos tan diversos como el cambio climático, la calidad del agua, del aire y del suelo; la deforestación, la epidemiología y la dinámica demográfica, incluyendo patrones de asentamiento humano y migración.

Cuando los SIG se integran con otras tecnologías geoespaciales, como la detección a través de imágenes satelitales y las fotografías georreferenciadas tomadas generalmente con drones, su potencial se amplía considerablemente. Además, al integrarse con herramientas modernas de tecnologías de la información como los sistemas de bases de datos de grandes volúmenes y las plataformas de análisis y visualización, los SIG se vuelven aún más poderosos, permitiendo manejar y entender grandes cantidades de datos geoespaciales de manera más efectiva (Reddy, 2018). Esta integración no solo hace que procesos como el mapeo, el monitoreo, la gestión y la toma de decisiones sean

más eficientes, sino que también ayuda a evaluar, modelar y predecir fenómenos complejos. Así, los SIG se convierten en herramientas clave para enfrentar problemas actuales, ofreciendo un análisis más detallado y una planificación más efectiva en muchas áreas.

En la planificación y ordenamiento territorial, los SIG proporcionan herramientas avanzadas para la gestión eficiente del espacio y los recursos. Estos sistemas auxilian a identificar los usos más adecuados para cada área, facilitando la determinación de zonas con potencial para el desarrollo urbano o industrial, así como áreas con vocación agrícola o forestal, y espacios destinados a conservación o restauración ecológica (Jalkanen et al., 2020; Masoudi et al., 2021). Además, los SIG contribuyen en el estudio para planificar el crecimiento y la mejora de la infraestructura urbana; evaluar la viabilidad de nuevas instalaciones, como las de energía solar o eólica; identificar zonas de riesgo geológico o ecológico, y optimizar la distribución de servicios públicos y las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos (Gómez Maturano, 2024; Gu et al., 2020).

En cuanto al análisis de riesgos, los SIG han facilitado la realización de estudios para la comprensión y prevención de desastres naturales como inundaciones, deslizamientos, peligros volcánicos, sismos, incendios forestales y sequías (Aceves-Quesada et al., 2006; Belal et al., 2014; Ogato et al., 2020; Yue et al., 2023). Con ello es posible determinar la probabilidad de ocurrencia de estos eventos, evaluar sus causas para la prevención, así como sus posibles consecuencias, e identificar áreas de peligro, susceptibilidad o vulnerabilidad.

La figura 3 muestra el Atlas de Riesgos de la República Mexicana, donde se presenta, mediante un código de colores, el nivel de vulnerabilidad ante el cambio climático a nivel municipal. Este atlas también permite identificar riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos, geológicos y químico-tecnológicos, así como indicadores de vulnerabilidad social.



Figura 3. Atlas de riesgos de México en donde se identifican indicadores de vulnerabilidad social, vulnerabilidad ante el cambio climático y riesgos hidrometeorológicos, geológicos y químico-tecnológicos a nivel municipal.

<http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/>

Asimismo, los SIG han posibilitado análisis de riesgos para la salud poblacional, evaluando la exposición a contaminantes e identificando poblaciones vulnerables, considerando factores como la pobreza, la edad, la falta de acceso a servicios básicos y a la atención médica (Alarcón-Herrera et al., 2020; Macharia et al., 2020). Además, se han utilizado para evaluar riesgos ambientales y ecológicos, como la pérdida de biodiversidad, la degradación del paisaje, la erosión del suelo, las fuentes de contaminación y la distribución de contaminantes en diferentes compartimentos ambientales (Allain & Jones, 2013; Xie et al., 2021).

En el ámbito de los recursos naturales, los SIG han transformado el mapeo y la creación de bases de datos espaciales, facilitando el seguimiento y la gestión a diversas escalas (Reddy, 2018). Esto ha permitido su aplicación en diversos campos, como el análisis del terreno, el mapeo de la geomorfología, el inventario de los recursos, la evaluación de cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal, el conocimiento de la hidrología, la gestión de la agricultura, y la restauración de ecosistemas (Hernández-Pérez et al., 2022; Peña et al., 2022). Además, los SIG ayudan a identificar áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad, destacando su importancia en la promoción de prácticas sostenibles en la gestión de los recursos naturales (Balram et al., 2004; Shrestha et al., 2021).

Por ejemplo, en la figura 4 podemos observar cómo ha cambiado el uso del suelo en un periodo de 20 años. Para lograr

esto, se comparan imágenes de satélite tomadas en diferentes momentos. Al poner estas imágenes una sobre otra en un SIG, es fácil visualizar cómo han crecido las ciudades, se ha disminuido la vegetación o se han transformado áreas de cultivo. Este proceso nos ayuda a entender de forma visual y sencilla cómo el entorno ha ido cambiando con el tiempo y qué consecuencias podría tener para el ambiente y las personas.

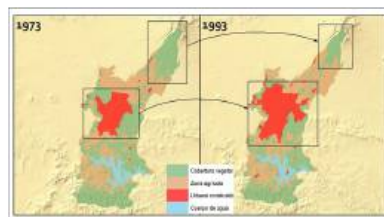


Figura 4. Ejemplo del cambio de uso de suelo en el periodo de 1973 a 1993, se observa en los recuadros, el aumento de la superficie urbana y una disminución de la cobertura vegetal.

Elaboración propia.

Además de su papel en la gestión de recursos naturales, los SIG también han demostrado ser invaluable en la búsqueda de soluciones para problemáticas de salud pública en diferentes zonas geográficas (Wang, 2020). Al integrar datos geoespaciales con información epidemiológica, es posible identificar patrones y tendencias en la propagación e incidencia de enfermedades, evaluar la influencia de factores como la calidad del aire, agua y suelo; identificar la disponibilidad de agua potable y examinar la proximidad de la población a zonas industriales, y con ello determinar las áreas más vulnerables.

La contaminación ambiental, en particular, se destaca como uno de los principales factores de riesgo para la salud pública (Iriti et al., 2020). En este sentido, los SIG permiten no solo mapear las fuentes de contaminación y la distribución de los diversos contaminantes; sino también permiten identificar las áreas más expuestas y evaluar el impacto en la población. Los SIG pueden identificar áreas urbanas con altas concentraciones de partículas en suspensión como lo son las PM_{2.5} y PM₁₀ y podrían identificar la relación de estas concentraciones de partículas con la incidencia de enferme-

dades respiratorias, como el asma y la bronquitis. Además, en zonas industriales los SIG pueden ayudar a mapear los cuerpos de agua afectados por residuos, facilitando la evaluación del impacto en la salud de las comunidades que dependen de estas fuentes para su consumo.

Los SIG también son esenciales en el análisis de la exposición a pesticidas en áreas agrícolas, permitiendo identificar regiones donde estos químicos se utilizan intensivamente y relacionar esta información con la incidencia de enfermedades como el aumento del cáncer en una población. Además, estos sistemas permiten mapear las vías de transporte más transitadas y evaluar su proximidad a escuelas y hospitales, lo que ayuda a determinar la exposición de estas poblaciones vulnerables a contaminantes presentes en el aire.

Por ejemplo, en la figura 5, se muestran las carreteras representadas por líneas azules, mientras que la prevalencia de enfermedades respiratorias está indicada con puntos blancos. A nivel visual, parece existir una relación entre la proximidad a las autopistas y los casos de enfermedades respiratorias. Sin embargo, es importante considerar que también podrían existir influencias por otros factores, como la ubicación de industrias cercanas u otras fuentes de contaminación ambiental. Al integrar capas de datos sobre vulnerabilidad social con mapas de contaminación, los SIG facilitan la identificación de comunidades en riesgo, permitiendo a las autoridades diseñar intervenciones más efectivas para proteger la salud pública.



Conclusiones

Mediante el uso de SIG, es posible realizar diversos análisis e investigaciones que permiten obtener una comprensión más profunda del territorio. Estos sistemas actúan como aliados clave al integrar y examinar múltiples capas de información geoespacial, facilitando la detección de patrones, la evaluación de riesgos y la identificación de oportunidades para una planificación y gestión más efectiva. Así, los SIG se convierten en herramientas necesarias para el desarrollo de estrategias informadas y para la implementación de intervenciones eficaces que aborden los desafíos socioambientales actuales, en un mundo cada vez más interconectado y complejo.

Declaración de no Conflicto de intereses

La autora de este manuscrito declara no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

Referencias

- Aceves-Quesada, F., López-Blanco, J., & Martin del Pozzo, A. L. (2006). Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(2), 113–124.
- Alarcón-Herrera, M. T., Martín-Alarcon, D. A., Gutiérrez, M., Reynoso-Cuevas, L., Martín-Domínguez, A., Olmos-Márquez, M. A., & Bundschuh, J. (2020). Co-occurrence, possible origin, and health-risk assessment of arsenic and fluoride in drinking water sources in Mexico: Geographical data visualization. *Science of The Total Environment*, 698, 134168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134168>
- Allain, M., & Jones, J. (2013). Nonpoint source pollution risk mapping for Alabama's Big Creek Lake. *Geographical Bulletin - Gamma Theta Upsilon*, 54(1), 1–23.
- Balram, S., Dragičević, S., & Meredith, T. (2004). A collaborative GIS method for integrating local and technical knowledge in establishing biodiversity conservation priorities. *Biodiversity and Conservation*, 13(6), 1195–1208. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000018152.11643.9c>
- Belal, A.-A., El-Ramady, H. R., Mohamed, E. S., & Saleh, A. M. (2014). Drought risk assessment using remote sensing and GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1), 35–53. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0707-2>
- Burrough, P., & McDonnell, R. (1986). *Principles of geographical information systems for land resource assessment*. Clarendon Press, Oxford.
- Chang, K. (2019). Geographic Information System. In *International Encyclopedia of Geography* (pp. 1–10). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0152.pub2>

Gómez Maturano, J. (2024). Redes logísticas de recuperación de residuos sólidos en México: un análisis macroscópico mediante sistemas de información geográfica. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 31. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052023000100226>

Gu, K., Fang, Y., Qian, Z., Sun, Z., & Wang, A. (2020). Spatial planning for urban ventilation corridors by urban climatology. *Ecosystem Health and Sustainability*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/20964129.2020.1747946>

Hernández-Pérez, E., García-Franco, J. G., Vázquez, G., & Cantellano de Rosas, E. (2022). Land-use change and landscape fragmentation in central Veracruz, Mexico (1989–2015). *Madera y Bosques*, 28(1), 1–22. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294>

Iriti, M., Piscitelli, P., Missoni, E., & Miani, A. (2020). Air pollution and health: The need for a medical reading of environmental monitoring data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph17072174>

Jalkanen, J., Toivonen, T., & Moilanen, A. (2020). Identification of ecological networks for land-use planning with spatial conservation prioritization. *Landscape Ecology*, 35(2), 353–371. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00950-4>

Macharia, P. M., Joseph, N. K., & Okiro, E. A. (2020). A vulnerability index for COVID-19: spatial analysis at the subnational level in Kenya. *BMJ Global Health*, 5(8), e003014. <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2020-003014>

Masoudi, M., Centeri, C., Jakab, G., Nel, L., & Mojtahedi, M. (2021). GIS-Based Multi-Criteria and Multi-Objective Evaluation for Sustainable Land-Use Planning (Case Study: Qaleh Ganj County, Iran) "Landuse Planning Using MCE and Mola." *International Journal of Environmental Research*, 15(3), 457–474. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00326-0>

Ogato, G. S., Bantider, A., Abebe, K., & Geneletti, D. (2020). Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.jhr>

Peña, L. C. B., Córdova, M. O. G., Cejudo, L. C. A., Olave, M. E. T., Murrieta, R. L. M., Aguilar, V. M. S., Villalobos, H. L. R., Gómez, V. M. R., Campos, M. I. U., & León, M. O. G. (2022). Degradation and deforestation in the Conchos river basin (Mexico): Predictive modeling through logistic regression (1985-2016). *Cuadernos Geograficos*, 61(1), 129–149. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v61i1.21629>

Reddy, G. P. O. (2018). *Geographic Information System: Principles and Applications* (pp. 45–62). https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4_3

Santos Preciado, J. M. (2020). *Sistemas de información geográfica* (2020th ed., Vol. 1). Universidad Nacional de Educacion a Distancia Madrid.

Shrestha, M., Piman, T., & Grünbühel, C. (2021). Prioritizing key biodiversity areas for conservation based on threats and ecosystem services using participatory and GIS-based modeling in Chindwin River Basin, Myanmar. *Ecosystem Services*, 48, 101244. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101244>

Wang, F. (2020). Why public health needs GIS: a methodological overview. *Annals of GIS*, 26(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1702099>

Xie, H., Wen, J., Chen, Q., & Wu, Q. (2021). Evaluating the landscape ecological risk based on GIS: A case-study in the Poyang Lake region of China. *Land Degradation & Development*, 32(9), 2762–2774. <https://doi.org/10.1002/ldr.3951>

Yue, W., Ren, C., Liang, Y., Liang, J., Lin, X., Yin, A., & Wei, Z. (2023). Assessment of Wildfire Susceptibility and Wildfire Threats to Ecological Environment and Urban Development Based on GIS and Multi-Source Data: A Case Study of Guilin, China. *Remote Sensing*, 15(10), 2659. <https://doi.org/10.3390/rs15102659>

MICROPRARTÍCULAS IMITADORAS DE CÉLULAS: COMO TRATAMIENTOS PARA ENFERMEDADES AUTOINMUNES

CELL-MIMICKING

Rubén Ortiz Aguilar
Angel I. Salmerón Sandoval
Marlen Serrano Hernández
Alberto Ramírez Mata
Claudia Mancilla Simbro

<https://orcid.org/0000-0002-8591-4420>
<https://orcid.org/0000-0002-6417-8559>
<https://orcid.org/0000-0002-0349-1824>
<https://orcid.org/0000-0002-2119-2254>
<https://orcid.org/0000-0003-3976-3550>

Año 11, No. 31

Recibido: 12/Febrero/2024

Aprobado: 2/Diciembre/2024

Publicado: 20/Enero/2025

1 Licenciatura en Biotecnología, Facultad de Ciencias Biológicas,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, CU. Puebla, Pue, C.P.
72570. ruben.ortizagu@alumno.buap.mx angel.salmerons@alumno.buap.mx serrano.hdez.marlen@gmail.com

2 Laboratorio de la Interacción bacteria-planta, Centro de
Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, Instituto de Ciencias,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edif. 103J, Av. San
Claudio S/N, Col. San Manuel, Puebla Pue. CP 72570, México. sandra.reyes@correo.buap.mx alberto.ramirez@correo.buap.mx
Fisiología y Biología Molecular de Células Excitables, Instituto
de Fisiología. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 14 Sur
6301, CU Col. San Manuel, C.P. 72570 claudia.mancilla@correo.buap.mx
mx

Resumen

La biología sintética es un campo relativamente nuevo, con diversas aplicaciones en diferentes áreas, desde sus inicios ha tenido un gran peso en el campo de la medicina, ya que con esta herramienta se ofrecen muchas oportunidades de interés relacionadas con las terapias génicas. Uno de los primeros logros de suma importancia fue la creación de la primera célula sintética, ya que llevo a la comprensión de la biología, además de brindar la oportunidad de programar y reprogramar a las células con el fin de obtener una alternativa en los tratamientos de enfermedades autoinmunes, en las que nuestro sistema inmunológico es incapaz o difícilmente de reconocer las células sanas de las enfermas, también podría aplicarse en un futuro no tan lejano de redirigir a las células a ser pluripotenciales para el tratamiento de personas con debilidad visual o ciegas para que su sistema de visión se reactive. Por lo cual, la biología sintética, nos permite replantear cuáles son las terapias más eficaces contra dichos padecimientos.

Palabras clave: Célula sintética; enfermedades autoinmunes; terapia génica.

Abstract

Synthetic biology is a relatively new field, with diverse applications across different areas. Since its inception, it has had significant implications in the field of medicine, particularly in offering numerous opportunities related to gene therapies. The first synthetic cell was one of its early achievements. This not only helped us learn more about biology, but it also gave us the power to program and reprogram cells. This achievement could lead to new ways of treating autoimmune diseases where the immune system has trouble telling the difference between healthy and diseased cells. Moreover, it could be applied in the not-so-distant future to redirect cells to a pluripotent state for treating individuals with visual impairment or blindness, thus reactivating their vision system. Synthetic biology thus allows us to reconsider what the most effective therapies are for these conditions.

Keywords: synthetic cell; autoimmune diseases; gene therapy.

A lo largo de los años ha ido en aumento la demanda de nuevos tratamientos para enfermedades autoinmunes, las cuales aún no cuentan con una cura, los medicamentos solo mejoran los síntomas y hacen tolerable la enfermedad. Ante todo esto la biología sintética nos ofrece un amplio panorama en el desarrollo de nuevas alternativas, las cuales pueden ser más eficaces y de bajos costos en comparación a los tratamientos ya existentes para estas afecciones.

La biología sintética es una disciplina donde aplicamos principios de ingeniería para diseñar y sintetizar sistemas biológicos predecibles, medibles, controlables y transformables, también busca reprogramar las células vivas para realizar funciones novedosas y mejoradas. (B. R. Lee et al., 2013; Xie et al., 2016) Para la fabricación de un sistema biológico sintético debemos tener en cuenta tres etapas a) la decodificación y análisis de los genomas de los diferentes sistemas biológicos, b) la síntesis de las partes que integran un genoma y el ensamble de cada una de ella, por último, c) el uso de herramientas de edición de genomas. (B. R. Lee et al., 2013)

La biología sintética engloba diversas técnicas de gran utilidad para lograr la manipulación de estos sistemas. Algunas técnicas se presentan en la Figura 1.

Uno de los sistemas biológicos más importantes desarrollado a partir de esta disciplina es la creación de la célula sintética o célula artificial, y a lo largo del desarrollo de la disciplina han adquirido un gran interés gracias a que pueden ser imitadoras de células biológicas integrales con estructuras similares y exhibir algunas características clave de las células vivas (Xu et al., 2016).



Figura 1. Esquema general de las herramientas utilizadas en la biología sintética para la construcción de nuevos sistemas (Lee B.R. et al., 2013).

Células sintéticas

¿Una célula sintética?, hasta hace muchos años el concepto de “Célula” no estaba del todo claro, pues estas pequeñas unidades formadoras de vida no se conocían ni eran descritas. Gracias a los avances de la biología celular se pudo diversificar la gran importancia que tiene la célula y las funciones que cumple dentro de un organismo. Ya que es la estructura principal para dar vida a un organismo completo, pues su continua división a partir de la mitosis da lugar a la formación de tejido y órganos. También es capaz de transferir información genética de célula a célula, y para poder comprender esto tendremos que dar paso a los componentes que la conforman y que cada uno de estos es requerido para algún proceso en especial.

Si la célula es tan compleja, ¿cómo daríamos paso a la creación de una célula artificial? La ciencia en camino a crear nuevas soluciones y respuestas a enfer-

medades y padecimientos, ha podido desarrollar nuevas tecnologías que nos permiten hacer diseños y experimentos en donde se lleven a cabo aquellas ideas que en un futuro serían de gran importancia para la humanidad; la biología sintética plantea “reprogramar las células utilizando circuitos genéticos, vías proteicas y otra maquinaria biomolecular creada en el laboratorio” con el fin de “poner a las células a trabajar como sensores y como fábricas en miniatura para producir fármacos, combustibles y sustancias químicas industriales” (Health, 2010a).

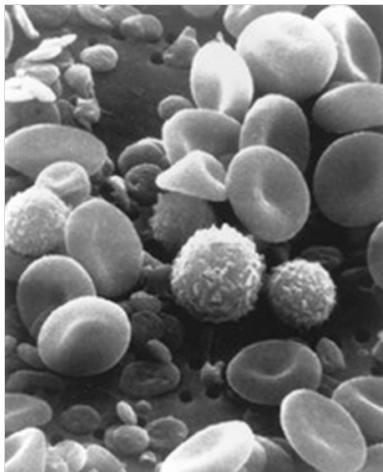


Figura 2. Imagen de células sanguíneas obtenidas por microscopía electrónica de barrido (Bruce Wetzel & Harry Schaefer, 1982).

Enfermedades autoinmunes

Una definición altamente aceptada para este grupo de enfermedades es que son una “condición patológica en la cual el sistema inmunitario se convierte en el agresor que ataca y destruye a los propios órganos y tejidos corporales sanos”. Dichas afecciones pueden atacar cualquier parte de nuestro organismo. Por separado suelen ser muy raras, pero en conjunto representan un gran problema a la salud pública, esto debido a que en los últimos años ha crecido la incidencia de padecer estas enfermedades a nivel mundial, además de

no disponer de una cura. Las personas con estos padecimientos tienen que enfrentarse a una baja calidad de vida y tratamientos costosos (Pearce & Merriman, 2006a).

Cada enfermedad autoinmune se caracteriza por tener una etiología compleja en las cuales se encuentran factores ambientales que resultan en la alteración de la regulación del sistema inmunitario (Pearce & Merriman, 2006b). Las enfermedades autoinmunes tienen su origen a nivel genético, varios estudios han identificado numerosas regiones cromosómicas que se asocian con dichas enfermedades, tal es la región 1p13 que está asociada con la predisposición genética a artritis reumatoide, lupus eritematoso sistémico, y la enfermedad de Crohn (Aun 2004).

Enfermedad Autoinmune	Sexo dominante	Patrón de enfermedad	Tejidos afectados	Autoantígeno (si se conoce)
Síndrome antifosfolípido	F	C	Coágulos de sangre en múltiples sitios	Glícoproteínas del complejo plaquetario de proteínas
Fiebre reumática aguda	F/M	C	Músculo cardíaco y válvulas, riñón, hígado, articulaciones	Proteína mioisina en el miocardio cardíaco
Espondilitis anquilosante	M	C	Tendones, huesos, ligamentos, articulaciones	Ag. derivados del tejido cartilágeno
Enfermedad de Crohn	M/F	C/R/R	Paredes del colon e intestino delgado	L ³
Síndrome de Guillain Barré	M/F	A	Nervios periféricos	Glucoproteínas neuronales y ganglios
La enfermedad de Graves	F	C/R/R	Glándula tiroides	Tiroides y otras proteínas de la glándula tiroides
Síndrome de Goodpasture	M	A	Riñón, pulmón	Colágeno en la membrana basal
Trombosis de Raynaud	F	C	Glándula tiroides	Tiroides y otras proteínas de la glándula tiroides
Púrpura trombocitopénica trombótica	M/F (infancia) F (adultos)	A (infancia) C (adultos)	Plaquetas	Glucoproteínas de la membrana plaquetaria
Neumonía grave	F (10-50 años) M (70-80 años)	C/R/R	Musculos	Receptores de acetilcolina

Figura 3. Ejemplos de enfermedades autoinmunes humanas. Se presentan algunas características de las enfermedades autoinmunes humanas. “Sexo dominante” indica si el sexo masculino (M) o femenino (F) son los más afectados. El “patrón de la enfermedad” describe si el curso de la enfermedad es agudo (A), crónico (C) o sigue un patrón de recaídas/remisiones (R/R). Algunas enfermedades autoinmunes se manifiestan en más de un patrón. “Tejidos afectados” especifica aquellos tejidos que característicamente vienen bajo ataque autoinmune. El “autoantígeno” es el objetivo molecular del ataque autoinmune, si se

conoce (Autoimmune Diseases, 2014).

La primera célula sintética en la historia

El camino para el desarrollo de la primera célula sintética consistió en seis experimentos, uno detrás de otro, que sirvieron como base para la creación de una célula

de origen no natural. Comenzó desde el año 1999, cuando J.C. Venter llevó a cabo la secuenciación de *Mycoplasma genitalium*, el cual fue un logro especial debido a que se trataba del genoma más pequeño de una bacteria hasta la fecha. Posteriormente, el experimento se centró en el proceso de la duplicación bacteriana, en donde se determinaron dos clases de genes diferentes implicados, los no esenciales, y los mínimos para que se lleve a cabo el proceso. Luego se consiguieron transferir los cromosomas de *Mycoplasma mycoides* a *Mycoplasma capricolum*. En el siguiente experimento, fue cuando se comenzó con la biología sintética, pero con cromosomas, pues se desarrolló uno artificial que fuera compatible con *Mycoplasma genitalium*, aunque una de las anotaciones más relevantes fue que el crecimiento de este microorganismo era lento.

Después se secuenció el genoma de *M. mycoides* ya que había captado el interés por la rapidez con la que contaba su tasa de crecimiento; el procedimiento para ello fue por clonación en una levadura y transferido a *M. capricolum*. Ya que se tenía toda esta información de *M. mycoides* fue que su genoma pudo ser diseñado, sintetizado y montado para realizar el trasplante al *M. capricolum*, el receptor (De La & Orozco, 2011). Fueron todos estos experimentos los que ayudaron a J.C. Venter a desarrollar la primera célula sintética, *Mycoplasma laboratorium*.

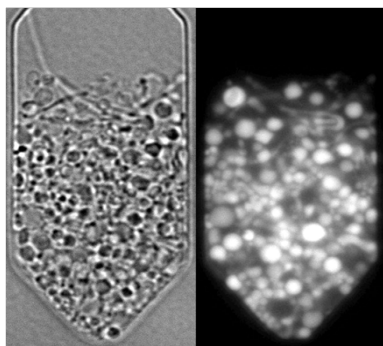


Figura 4. Primera célula bacteriana sintética mínima (JCVI-syn3.0). (Clyde A. Hutchison et al., 2016).

Terapias aplicadas con esta técnica

Desde sus inicios, la biología sintética ha prometido bastante en cuanto a soluciones y nuevas estrategias para terapias, principalmente con enfoque inmunológico, pues el desarrollo de inmunoterapias a partir de células diseñadas ha mostrado un gran avance en los últimos años, estas terapias contribuyen significativamente a la medicina moderna. Algunas de las inmunoterapias que se han desarrollado se presentan a continuación:

- Ingeniería de células T con receptores dirigidos a tumores.
- Células T del receptor de antígeno quimérico (CAR-T)

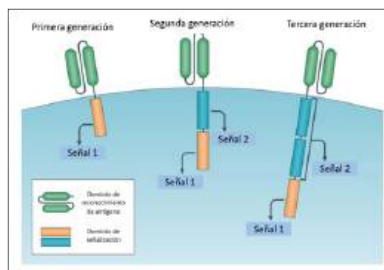


Figura 5. Células CAR-T: ingeniería de células inmunitarias para tratar el cáncer (National Cancer Institute, 2022).

Esta terapia fue desarrollada a partir de 1990, en donde se buscaba redirigir a las células T del sistema inmunológico con ayuda de CAR, que el receptor de antígeno quimérico, los cuales de acuerdo con Cuenca et al., CAR son aquellos “receptores diseñados que generan una especificidad definida a una célula efectora, aumentando su función y respuesta inmunitaria” (Cuenca et al., 2022), la cual implica una manipulación genética dentro de las células T y así puedan ayudar a combatir el Cáncer; incluso se ha descrito que las células CAR-T han tratado con éxito desde tumores sanguíneos como el linfoma de células B grandes y hasta intervenciones terapéuticas para tumores sólidos, donde combinando técnicas inmunológicas de ingeniería genética se podrían desarrollar nuevas células específicas

para tratar estos tumores sólidos.

Este tipo de inmunoterapias son importantes, de acuerdo con Caliendo et al., quienes indican que a partir de sus investigaciones sobre el uso de las células T, se puede “fomentar la reprogramación de los linfocitos T con una mayor supervivencia y actividad funcional en el microambiente tumoral deprimente, o para desafiar enfermedades como infecciones, trastornos inflamatorios crónicos y autoinmunes” (Caliendo et al., 2019), lo cual nos da un paso a saber si podrían emplearse para combatir muchas más enfermedades e incluso dar pie para proponer estrategias a nuevas terapias con enfermedades que aún no se logran encontrar.

Enfermedades autoinmunes y el gran problema que presenta

AFECCIONES PROVOCADAS POR ENFERMEDADES AUTOINMUNES

Las enfermedades autoinmunes (EA) tienen su origen a nivel genético, por ello existen estudios en los que lleva a cabo un rastreo de todo el genoma para poder identificar regiones cromosómicas concretas que estén asociadas con la enfermedad. También se incluyen los estudios de expresión génica, los cuales han revelado que patrones alterados de expresión génica son muy similares para diversas EA.

Estas enfermedades también son resultado de una combinación de la predisposición genética y los factores ambientales. Según Makin en un artículo publicado en la revista Nature, raramente las EA son monogénicas, usualmente son poligénicas. En la década de 1970, la región del antígeno leucocitario humano (HLA), que son genes de los complejos principales de histocompatibilidad que ayudan a codificar proteínas que diferencian entre propias y no propias. Desempeñan un papel muy importante en la enfermedad y la defensa inmunológica (Nordquist & Jamil, 2024).

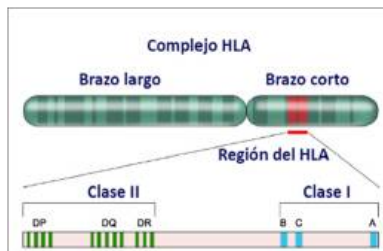


Figura 6. Estructura del complejo HLA (National Cancer Institute., 2024).

Una vez identificada la HLA se estudiaron más genes que poseían el mismo impacto, tal es el caso de PTNP22 que es un gen que codifica la fosfatasa linfóide de la tirosina, la cual es una proteína con la función potencial en la regulación de umbrales para activación de linfocitos B y T (Stanford & Bottini, 2014). Otro ejemplo de genes involucrados en las EA es TYK2 dicho gen codifica para las familias de las proteínas Janus quinasas que son miembro de la tirosina quinasa, la mutación en este gen está asociado con EA incluidas enfermedad de Crohn, lupus eritematoso sistémico y la psoriasis (Makin, 2021; Nemoto et al., 2018).

Se tomaron otras enfermedades para su estudio y así entender mejor las alteraciones, tal es el caso del Síndrome IPEX (inmunodesregulación, poliendocrinopatía, enteropatía ligada al cromosoma X), que es una afección monogénica y cuenta con múltiples problemas autoinmunes entre sus síntomas, este síndrome mostró que la proteína FOXP3 es de suma importancia para el desarrollo de y función de las células T reguladoras, que normalmente actúan como frenos en la respuesta inmunitaria.

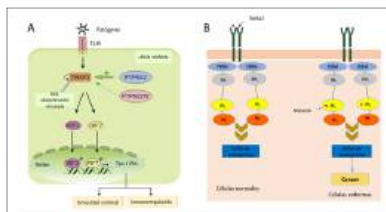


Figura 7. Regulación de la autoinmunidad. A) El gen asociado a la autoinmunidad PTPN22 potencia la inmunidad dependiente del interferón tipo 1 impulsada por un receptor tipo Toll (Y. Wang et al., 2013). B) Tirosina-cinasa 2 (Alsina et al., 2022).

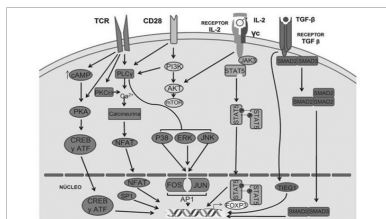


Figura 8. FOXP3: Controlador maestro de la generación y función de las células reguladoras naturales (González Parias et al., 2010).

La biología sintética y sus desarrollos muestran un gran optimismo para la solución de diversos problemas que atacan a la sociedad entera. Los avances de esta disciplina en los últimos años han mostrado un gran potencial para la revolución de tecnologías y aplicaciones principalmente en la medicina con edición terapéutica del genoma, bioterapéutica viva. El desarrollo de estas tecnologías no ha tenido un camino fácil, esto debido a que para ejecutarlas se necesita de personal experimentado y a un acceso limitado de recursos. Algunos otros factores que afectan el desarrollo son: estabilidad genética, economía y viabilidad (Brooks & Alper, 2021a).

COMPLICACIONES EN LAS INVESTIGACIONES Y TÉCNICAS A DESARROLLAR

La biología sintética y sus desarrollos muestran un gran optimismo para la solución de diversos problemas que atacan

a la sociedad entera. Los avances de esta disciplina en los últimos años han mostrado un gran potencial para la revolución de tecnologías y aplicaciones principalmente en la medicina con edición terapéutica del genoma, bioterapéutica viva. El desarrollo de estas tecnologías no ha tenido un camino fácil, esto debido a que para ejecutarlas se necesita de personal experimentado y a un acceso limitado de recursos. Algunos otros factores que afectan el desarrollo son: estabilidad genética, economía y viabilidad (Brooks & Alper, 2021a).

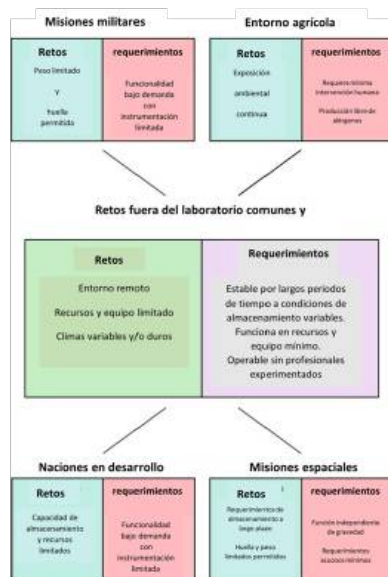


Figura 9. Descripción general de los principales desafíos y requisitos para implementar plataformas basadas en biología sintética en entornos fuera del laboratorio (Brooks & Alper, 2021b).

Otra situación que detiene el desarrollo en esta área es la preocupación que se ha manifestado en algunos científicos, ya que así como nos abre las puertas a un desarrollo prometedor, también se encuentra en un "dilema del uso dual" de las tecnologías, es decir que dicha tecnología puede ser utilizada para bien o mal para propósitos catastróficos (E. X. Wang et al., 2019).

Entre las principales perspectivas de riesgo se encuentra:

- **Bioseguridad:** Esto debido a que otra rama de la biología sintética es la "xenobiología" que es la ciencia de las formas de vida separadas. Más concretamente, se trata de una tecnociencia emergente que combina los avances de la ingeniería genética con el diseño de sistemas biológicos basados en bioquímicas inusuales proporcionadas por compuestos químicos de origen mayoritariamente antropogénico (Budisa et al., 2020). Como dichos componentes no existen en la naturaleza, podrían representar un riesgo para la humanidad, esto debido a que la bioseguridad engloba conceptos como principios de contención, diseño de instalaciones, prácticas y procedimientos a prevenir, incluso la liberación de organismos al medio ambiente.

Para evitar problemas de tipo bioético es importante tener educación y divulgación pública en una etapa temprana del desarrollo del campo. Aunque a veces es difícil persuadir a la sociedad y también a los científicos, todos estos esfuerzos deben alentar para evitar un conflicto que paralice un importante desarrollo de la biología sintética.

Ingeniería genética, ¿como podemos manipular nuestro sistema?

Después del descubrimiento de las propiedades del genoma, el siguiente paso claro para la humanidad era conseguir manipular estas características para conseguir objetivos de interés específico. Y la respuesta a este deseo vino con el inicio de la ingeniería genética. La ingeniería genética es conocida como un conjunto de técnicas para conseguir la transferencia de un gen de interés de un organismo a otro ("¿Qué es la ingeniería genética?", 2021). De esta forma proporcionando la expresión de proteínas que se llevaba a cabo originalmente, solo que ahora en un organismo distinto.

Es así como llegan a nosotros nuevos con-

ceptos como el ADN recombinante, las proteínas recombinantes y los organismos genéticamente modificados, transgénicos o recombinantes. Y en esencia, cuando se dice "recombinante", se refiere a la combinación de distintos organismos ("¿Qué es la ingeniería genética?", 2021). Esta rama de la biología incluye los procesos de síntesis, transferencia, replicación y expresión (Abel, 1995). La ingeniería genética parte de tecnologías como lo son la manipulación y empalme de genes, así como la clonación de genes usando vectores (Figura 10).

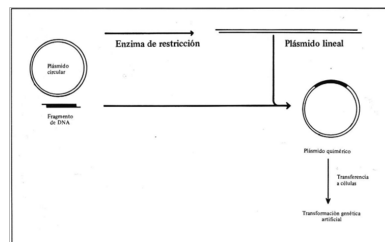


Figura 10. Clonación de un gen en un plásmido (Abel, 1995)

Este procedimiento no es algo que se lleve a cabo de forma natural, sino que sucede en el laboratorio, en dónde se han conseguido avances hasta el punto de clonar genomas completos de una célula y transferirlo a una diferente. Esta tecnología puede ser aplicada en bacterias, levaduras, plantas y animales.

Gracias al desarrollo de la ingeniería genética, surgió la llamada terapéutica génica humana, cuyo objetivo es curar defectos genéticos tomando acciones directamente en los genes (Abel, 1995). Puede ser llevada a cabo dentro o fuera del cuerpo. Generalmente, se usa un vector que es inyectado al paciente, el cual lleva consigo el gen que contrarresta a las células defectuosas.

Biología sintética para combatir actulales y futuras enfermedades del sistema inmune

La biología sintética es una disciplina definida de forma relativamente reciente, incluso sigue sin ser completamente establecida para muchos investigadores, que podrían tener definiciones con distintas variaciones entre cada una de ellas. No obstante, podemos hacer referencia a algunas conceptualizaciones hechas por una variedad de artículos escritos sobre este tema. Para empezar, el principal objetivo es el diseño y construcción de partes, mecanismos y sistemas biológicos, pudiendo también tomar sistemas ya existentes y rediseñarlos (Muñoz-Miranda, 2019). Hay también definiciones que incluyen un paso antes del diseño, que es la síntesis de componentes biológicos, mayormente relacionada al ADN sintético (BIOLOGÍA SINTÉTICA 10 Puntos Clave Para Delegados "Biomasaacre" Ilustración Por El Colectivo de Diseño La Colmena, 2012). Estos componentes diseñados pueden ser genes, proteínas, partes de células, células y hasta organismos completos (INCYTU 2018).

Las aplicaciones más importantes de la biología sintética son los medicamentos, biocombustibles, plásticos biodegradables y, de interés para este artículo, las terapias génicas y moleculares (Muñoz-Miranda, 2019). Se considera una herramienta en el campo de la medicina, aunque en algunos países siguen considerando que es una disciplina potencialmente peligrosa, pues la manipulación del genoma no parece poca cosa. No obstante, un gran grupo de países han estado haciendo avances con la regulación de esta tecnología con la intención de comenzar a aprovechar las oportunidades que trae consigo. A partir del 2007 varios gobiernos han publicado una variedad de documentos que expresan los riesgos de la biología sintética. En el año 2012, un aproximado de 113 organizaciones que incluyen tanto sindicatos y grupos científicos, ambientales, y agricultores, publicaron un documento "Principios de

la supervisión de la biología sintética" (BIOLOGÍA SINTÉTICA 10 Puntos Clave Para Delegados "Biomasaacre" Ilustración Por El Colectivo de Diseño La Colmena, 2012). Y, el interés por este tema no parece tener fin, pues no se han detenido los documentos y archivos que hablan sobre esta tecnología tan sorprendente, y no hay duda que en cuestión de poco tiempo se podrá aprovechar todo el potencial con el que cuenta.

Pero por lo pronto, uno de los éxitos conseguidos ha sido el desarrollo de células que se especializan en reconocer y destruir células cancerígenas. Esta terapia comprende una célula que, en un paciente que padece cáncer, identifica de forma específica y efectiva tumores para eliminarlos antes de que se propague el cáncer (INCYTU 2018).

En el campo de la solución de las enfermedades autoinmunes, se puede mencionar el trabajo de Douglas Melton, cuya investigación derivó en la programación de células madre que, en diabetes tipo 1, tomen el papel de aquellas células que reconocen la presencia de glucosa y que producen insulina (células beta del páncreas). Dichas células ya no se encuentran debido a que son atacadas por el mismo sistema inmune (Susan Young, 2013).

Por otro lado, tenemos el trabajo de Bryan CM, Rocklin GJ, Bick MJ, Ford A, Majri-Morrison S, Kroll AV, et al., quienes diseñaron una proteína pequeña la cual tiene la capacidad de inhibir la activación de las células T. Dicha proteína tiene afinidad por PD-1. Este logro tiene un alto potencial de aplicación en enfermedades autoinmunes e inflamatorias.

Nuevas invetigaciones BIOCOMBUSTIBLES

La contaminación presenta un gran desafío para la comunidad científica en la actualidad, pues muchos de los materiales que se utilizan con frecuencia tienen un grado de contaminación con respecto al medio ambiente, tal es el caso de los llamados "combustibles fósiles", por ello se han propuesto nuevas técnicas que permitirían la creación de combustibles

a partir de fuentes biológicas las cuales prometen ser seguras y sin ningún tipo de contaminación, “los científicos están modificando células para que secreten productos intermedios de los combustibles (tales como lípidos y ácidos grasos) que pueden ser refinados y convertidos

en combustibles” (Health, 2010a).



Figura 11. Creación de combustibles a partir de algas y cianobacterias (Health, 2010b).

BIORREMEDIACIÓN

Desencadenado del uso de combustibles fósiles durante muchos años, los suelos presentan una contaminación importante y esto representa un daño enorme para el medio ambiente; la biorremediación por su lado ha buscado alternativas y soluciones ante este problema persistente en la actualidad, por ello es muy relevante la implementación de nuevas técnicas a partir de microorganismos que puedan proporcionar una limpieza eficaz, y esto puede ser conseguido por medio de la manipulación de estos microorganismos de interés.

La utilización de microbios modificados para degradar las sustancias químicas más recalcitrantes, tales como las dioxinas, plaguicidas o incluso compuestos radiactivos, podría representar un ahorro de millones de dólares que de lo contrario se gastan en la excavación y el transporte por carretera de los suelos contaminados a vertederos de desechos peligrosos, según señala Gary Sayler, director del Centro de Biotecnología Ambiental de la Universidad de Tennessee en Knoxville. Sin embargo, muchos estudios e investigaciones en este campo aún no han sido aprobadas, esto tiene que ver más con un problema “ético” y político, pues muchas personas no están de acuerdo con

la liberación de organismos modificados al medio ambiente, esto ha llevado a la posposición de muchos proyectos relacionados con la biorremediación.

Células sintéticas en la corrección de la ceguera

Los ojos poseen funciones y estructuras complejas, un elemento de suma importancia es la retina en la cual se encuentran los fotorreceptores que son aquellas células encargadas de la percepción de la luz, el punto donde se encuentran en mayor proporción es en la mácula (Figura 12), dichos fotorreceptores están conectados a fibras nerviosas, todo este conjunto forma el nervio óptico (James Garrity, 2022).

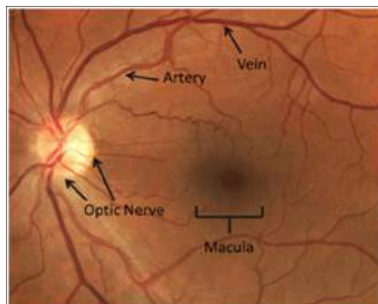


Figura 12. Identificación de la posición de la mácula en el ojo humano (PRECISION FAMILY EYE CARE, 2022).

Existen dos tipos de fotorreceptores: conos y bastones.

- Los conos son los gestores de la agudeza visual, la visión central fina y la visión en color (James Garrity, 2022).
- Los bastones tienen como función la visión nocturna y la visión periférica, se encuentran en mayor cantidad con respecto a los conos y poseen una sensibilidad superior a la luz, dichas células se concentran en las áreas periféricas de la retina (Figura 13) (James Garrity, 2022).

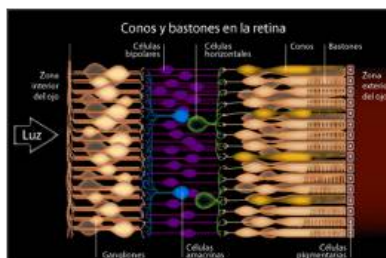
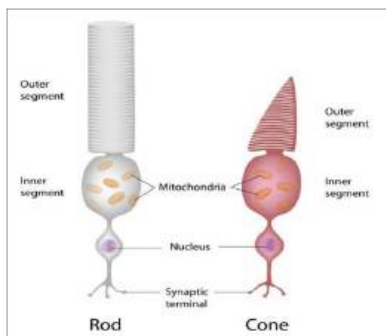


Figura 13. Localización de los fotorreceptores en el ojo humano (Asociación Mácúla Retina, 2018).

Existen distrofias que se presentan cuando dichas células (Figura 14) están dañadas o algún otro tipo de afección, tales como: retinitis pigmentosa también llamada síndrome de Usher (conos y bastones), en esta condición las células se van deteriorando poco a poco, empezando por los bastones para posteriormente seguir con los conos, algunos síntomas son la pérdida de visión lateral y la visión nocturna, es afección genética más común, donde se presenta pérdida auditiva y visual y en algunas ocasiones desequilibrio espacial. También podemos encontrar otras enfermedades como la fotoqueratitis, provocada por la exposición a rayos UV, como consecuencia se tiene la pérdida de la función visual (Eye Patient, 2024).



Todo ello, nos lleva a enfocarnos a una gran problemática que es la ceguera. El término ceguera es utilizado para referirse a aquellas personas que poseen una falta total de la percepción de la luz, dentro de este término se engloban las personas que poseen una baja visión,

a los individuos con dicha condición la vista no es corregible en su totalidad con lentes o algún tipo de cirugía; también se incluyen las personas con ceguera legal (Lee S.Y. & Mesfin, 2024).

Como una propuesta para la corrección de la ceguera se propone la utilización de células sintéticas, es decir, realizar un modelo idéntico a las células que puedan sustituir a las dañadas, sean reconocidas por el cuerpo humano y tengan la capacidad de imitar las funciones de los conos y bastones, para así regenerar el sentido de la vista, tal como se muestra en la siguiente imagen (Figura 15).

La implementación de genes que ayuden a tener una agudeza visual pueden ser un gran tratamiento ante estas complicaciones y distrofias, puesto que muchas terapias utilizadas para la corrección de estas suelen ser muy invasivas y podrían causar daños permanentes en la retina del ojo humano y por ende en las células fotorreceptoras, por ello la implementación de vectores virales promete ser una buena terapia.

La implementación de un vector viral podría, en primera instancia, causar un gran asombro, pero debido a su tamaño y a que ha sido ampliamente utilizado en la biología molecular para transportar genes, tiene un gran estudio que respalda su uso seguro en el laboratorio; el ojo humano está comprendido por diversas capas, estas capas son extremadamente sensibles y para poder llegar a las células fotorreceptoras se necesita de un mecanismo que no sea invasivo y que tenga un tamaño muy pequeño. El adenovirus cumple con estas funciones, y puede llegar hasta estas células a través de las cavidades de las capas del ojo humano.

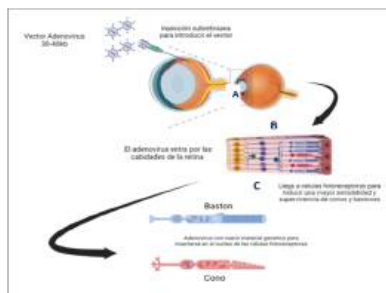


Figura 15. Modelo para corrección de ceguera mediante células sintéticas. A) Los retrovirus modificados genéticamente son inyectados a través de la retina del ojo para ayudar a que estos puedan ser transportados hasta las células fotorreceptoras. B) Los retrovirus pasan a través de los conductos oculares, debido a su tamaño son fáciles de transportar y de llegar a su destino. C) Los retrovirus llegan hasta las células fotorreceptoras (conos y bastones), hasta el interior del núcleo en donde podrán finalmente depositar su material genético haciendo que estas células sean más sensibles a la luz y al mismo tiempo puedan tener una mayor supervivencia. Realizado con el programa Biorender por Rubén Ortiz Aguilar y Claudia Mancilla Simbro.

La eficacia de una edición de las células fotorreceptoras con el objetivo de recuperar la agudeza visual puede ser respaldada por otras investigaciones cuyos resultados parecen prometedores. Neuralink Corporation, empresa de Elon Musk especializada en los enlaces cerebro-computadora, ha trabajado en el desarrollo de un implante cerebral que consiste en una serie de hilos finos que se deben ubicar en la zona del cerebro que se encarga de la intención del movimiento. Este dispositivo cuenta con una tecnología centrada en fluctuaciones eléctricas impulsadas por 1,024 electrodos, a diferencia de la tecnología centrada en ingeniería genética propuesta en este artículo, sin embargo, el concepto de una inducción de señales en búsqueda de una solución a una limitación física es aplicada en ambas técnicas. Ya que el implante de Neuralink Corporation, a pesar de que promete controlar dispositivos electrónicos como teléfonos o computadoras a través del cerebro, está destinado primeramente para aquellas personas que han perdido extremidades, buscando permitirles controlar el movimiento de sus prótesis inteligentes con las señales del cerebro.

Una de las dificultades más grandes en el desarrollo de las células sintéticas es la aprobación para realizar las investigaciones referentes, pero una noticia positiva es que Neuralink Corporation ha conseguido la aprobación requerida por la FDA en mayo de 2023, y su CEO, Elon Musk, informó resultados positivos en las primeras pruebas en humanos (Parra S. 2024). También se proponen terapias en jardines sensoriales, los cuales apoyan a las personas ciegas y de baja visión a disminuir el estrés, la ansiedad, el miedo, dan seguridad a su vida (Mancilla SC, et al (2024)). Por lo cual, es vital generar más espacios como los jardines sensoriales para el bienestar social en general.

Conclusiones

El anuncio de la construcción de la primera célula artificial ha causado tanto emoción como consternación. Muchos investigadores están convencidos que ésta es una nueva forma para construir, de manera fácil y económicamente medicamentos novedosos o biocombustibles; también existen otros que piensan que estas innovadoras tecnologías hacen factible producir organismos que sirvan de biosensores para vigilar el medio ambiente o mejor aún, para estudiar las bases de la vida misma. Pero también hay muchos científicos que temen que esta tecnología recién nacida constituya el camino para crear inauditas y más potentes armas biológicas, sin embargo, concluimos que es una herramienta muy útil que podría desencadenar en la búsqueda de nuevas aplicaciones más certeras y creativas, sobre todo para su implementación en la industria farmacéutica y en la medicina moderna, como bien se registró en este trabajo, su camino en las enfermedades autoinmunes es prometedor y podría ser la mejor alternativa contra estas afectaciones humanas.

Declaración de no Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno

Declaración de privacidad

Los datos personales facilitados por los autores a RD-ICUAP se usarán exclusivamente para los fines declarados por la misma, no estando disponibles para ningún otro propósito ni proporcionados a terceros.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo que nos han brindado durante nuestra formación académica. A la D.C. Claudia Mancilla Simbro por su dedicación y pasión por la enseñanza. sus conocimientos y guía han sido fundamentales para nuestra formación como biotecnólogos.

Referencias

Abel, F. (1995). Ingeniería genética y Bioética. NATURA MEDICATRIX. n.42. Invierno 1995-1996. 18-24.

Budisa, N., Kubyskin, V., & Schmidt, M. (2020). Xenobiology: A Journey towards Parallel Life Forms. ChemBioChem, 21(16), 2228–2231. <https://doi.org/10.1002/cbic.202000141>

Brooks, S. M., & Alper, H. S. (2021). Applications, challenges, and needs for employing synthetic biology beyond the lab. Nature Communications, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21740-0>

ArgenBio. (2021). ¿Qué es la ingeniería genética?. PQBio POR QUÉ BIOTECNOLOGÍA. El Cuaderno N. 4, edición 2021.

Autoimmune Diseases. (2014). Primer to the Immune Response, 517–552. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385245-8.00019-4>

Rose N.R. (2017). Autoimmune Diseases. International Encyclopedia of Public Health, 192–195 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803678-5.00029-1>

Bonfá, G., Blazquez-Roman, J., Tarnai, R., & Siciliano, V. (2020). Precision tools in immuno-oncology: Synthetic gene circuits for cancer immunotherapy. In Vaccines (Vol. 8, Issue 4, pp. 1–17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/vaccines8040732>

Bryan CM, Rocklin GJ, Bick MJ, Ford A, Majri-Morrison S, Kroll AV. (Mayo 2021). Computational design of a synthetic PD-1 agonist. PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES

Vol. 118 | No. 29 <https://doi.org/10.1073/pnas.2102164118>.

Caliendo, F., Dukhinova, M., & Siciliano, V. (2019). Engineered Cell-Based Therapeutics: Synthetic Biology Meets Immunology.

Chen, G., Levin, R., Landau, S., Kaduri, M., Adir, O., Ianovici, I., Krinsky, N., Doppelt-Flikshtain, O., Shklover, J., Shainsky-Roitman, J., Levenberg, S., & Schroeder, A. (2022). Implanted synthetic cells trigger tissue angiogenesis through de novo production of recombinant growth factors. <https://doi.org/10.1073/pnas>

Choe, D., Kim, S. C., Palsson, B. O., & Cho, B. K. (2019). Construction of minimal genomes and synthetic cells. In *Minimal Cells: Design, Construction, Biotechnological Applications* (pp. 45–67). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31897-0_2

Cuenca, J. A., Schettino, M. G., Vera, K. E., & Tamariz, L. E. (2022). Terapia de células T con receptores de antígenos quiméricos: revisión de la literatura. *Gaceta Mexicana de Oncología*, 21(1). <https://doi.org/10.24875/j.gamo.21000181>

Clyde A. Hutchison III, Ray-Yuan Chuang, Vladimir N. Noskov, Nacyra Assad-Garcia, Thomas J. Deerinck, Mark H. Ellisman, John Gill, Krishna Kannan, Bogumil J. Karas, Li Ma, James F. Pelletier, Zhi-Qing Qi, R. Alexander Richter, Elizabeth A. Strychalski, Lijie Sun, Yo Suzuki, Billyana Tsvetanova, Kim S. Wise, Hamilton O. Smith, John I. Glass, Chuck Merryman, Daniel G. Gibson, and J. Craig Venter (2016). Design and synthesis of a minimal bacterial genome. *Science* 351, aad6253(2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6253>

de la Paz, A. (2011). La célula sintética. ¿Un paso hacia la vida artificial?. *REB* 30(3): 116-121.

Rueda B., Orozco G., Sánchez E., Oliver J. y Martín J. (2008). Factores genéticos comunes en autoinmunidad. *Reumatología Clínica*. Supl 1:S1-4 <https://www.reumatologiaclinica.org/es-pdf-S1699258X0876131X>

Frischmon, C., Sorenson, C., Winikoff, M., & Adamala, K. P. (2021). Build-a-cell: Engineering a synthetic cell community. *Life*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/life11111176>.