

elementos

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA • No. 137 • Volumen 32 • enero - marzo 2025 • \$40.00

CONAHICYT
Incluida en el Índice de Revistas
Mexicanas de Divulgación Científica
y Tecnológica del CONAHICYT



00137

EXHIBIR HASTA EL 31-MARZO-2025

Enlaces entre disciplinas académicas: multi, inter y transdisciplinariedad | Francis Bacon y la nueva función del saber | El más grande mapa del universo en 3D | ¿Qué son los cubits transmon? | El streaming de música y su impacto ambiental | Redes farmacológicas: innovación en la búsqueda de terapias naturales | Simbiosis entre las hormigas Attini, hongos y bacterias: una perspectiva metagenómica | La movilidad humana y los insectos | Control inteligente de plagas | Balas mágicas contra el cáncer | Bioinformática y medicina tradicional | Hipomineralización en dientes deciduos y permanentes | No puedo comer... Los trastornos temporomandibulares | Bancos de semillas: tesoros genéticos de los humedales | Estrategias para el estudio de las comunidades microbianas del suelo | La importancia de los suelos agrícolas saludables | Ensayos de germinación: tres ejemplos | ¿Podemos producir lo mismo con menos? | Vida campesina, tianguis y territorios | Crónicas visuales: la fotografía callejera de Enrique Soto



S U M A R I O



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
rectora, Ma. Lilia Cedillo Ramírez
secretario general, José Manuel Alonso Orozco
vicerector de investigación y estudios de posgrado, Ygnacio Martínez Laguna

ELEMENTOS

www.elementos.buap.mx

revista trimestral de ciencia y cultura
número 137, volumen 32, enero-marzo de 2025

director, Enrique Soto Eguibar

subdirector, José Emilio Salceda

diseño y producción gráfica, Mirna Guevara

corrección de estilo, Emilio Salceda y Leopoldo Noyola

sitio web y laboratorio multimedia, Leopoldo Noyola

redes sociales, Mirna Guevara

administración y logística, Lorena Rivera e Ileana Gómez

redacción, 14 Sur 6301, Ciudad Universitaria

Apartado Postal 406, Puebla, Pue., C.P. 72570

email: esoto24@gmail.com

consejo editorial, Itziar Aretxaga (INAOE),

Beatriz Eugenia Baca (ICUAP, BUAP),

María Emilia Beyer Ruiz (DGDC, UNAM),

María de la Paz Elizalde, (ICUAP, BUAP),

Ana Lidya Flores Marín (IBERO Puebla),

Marcelo Gauchat (FUNDACIÓN FORMA, A. C.),

Sergio Segundo González Muñoz (COLPOS Montecillo),

Federico Méndez Lavielle (Facultad de Ingeniería, UNAM),

Jesús Mendoza Álvarez (Instituto Politécnico Nacional),

Ricardo Moreno Botello (Ediciones de Educación y Cultura),

Francisco Pellicer Graham (Instituto Nacional de Psiquiatría),

Adriana Pliego Carrillo (Facultad de Medicina, UAEM),

Leticia Quintero Cortés (ICUAP, BUAP),

José Emilio Salceda (Instituto de Fisiología, BUAP),

Gerardo Torres del Castillo (Facultad de Ciencias Físico

Matemáticas, BUAP), Catalina Valdés Baizabal (Laboratorio de

Neurobiología Celular, Universidad de La Laguna),

Enrique Vergara (ICUAP, BUAP)

obra gráfica, © Enrique Soto

Portada, © *Pajareando*. Antigua Guatemala, 2004

2° de forros, © *La creación*. 2009

Contraportada, © *Violinista*. 2012

CINTILLO LEGAL

ELEMENTOS, Año 40, No. 137, enero a marzo de 2025, es una publicación trimestral editada por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con domicilio en 4 Sur número 104, Col. Centro, C. P. 72000, Puebla, Pue., y distribuida a través de Revista Elementos, con domicilio en Av. 14 Sur No. 6301, Col. San Manuel, Puebla, Pue. C. P. 72570. Tel. 222 229 55 00 ext. 7316. Editor responsable Dr. Enrique Soto Eguibar, esoto24@gmail.com. Reserva de derechos al uso exclusivo 04-2018-101113435900-102. ISSN 0187-9073, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Cultura. Este número se terminó de imprimir en diciembre de 2024. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



Enlaces entre disciplinas académicas: multi, inter y transdisciplinariedad	3
José Luis Díaz Gómez	
Francis Bacon y la nueva función del saber	11
Arturo Santos Raga	
El más grande mapa del universo en 3D	21
Dante Virgilio Gomez Navarro	
¿Qué son los cubits transmon?	27
Giselle N. Morales Rosales, Manuel Ávila Aoki	
Crónicas visuales: la fotografía callejera de Enrique Soto	33
Irene Sepúlveda	
El streaming de música y su impacto ambiental	37
Darío Sebastián Pavón Díaz	
Redes farmacológicas: innovación en la búsqueda de terapias naturales	41
Fernando Martínez Esquivias, Juan Manuel Guzmán Flores	
Simbiosis entre las hormigas Attini, hongos y bacterias: una perspectiva metagenómica	45
Esmeralda Escobar Muciño	
La movilidad humana y los insectos	51
Alfredo Castillo-Vera, Enrique Coraza de los Santos	
Control inteligente de plagas	59
Daniela Ordaz-Pérez, David Alavez-Rosas	
Balas mágicas contra el cáncer	65
Nohemí Salinas Jazmín, Sofía Álvarez Lorenzo	
Bioinformática y medicina tradicional	71
Itzel Gutiérrez-Aztatzi, Thomas Scior	
Hipomineralización en dientes deciduos y permanentes	77
Erika Vianney Rosales Hinojosa, Julieta Sarai Becerra Ruiz	
No puedo comer... Los trastornos temporomandibulares	83
Irene Aurora Espinosa de Santillana, Elena Aurora Popoca Hernández	
Bancos de semillas: tesoros genéticos de los humedales	91
Carmen Zepeda Gómez, Javier Manjarrez	
Estrategias para el estudio de las comunidades microbianas del suelo	99
Gobinath Chandrakasan	
La importancia de los suelos agrícolas saludables	105
Natalia Solís Pérez, Juan Fernando García Trejo	
Ensayos de germinación: tres ejemplos	111
Roberto Villagrán Torres	
¿Podemos producir lo mismo con menos?	117
Jesús Antonio Angole Tierrablanca, Ramón Gerardo Guevara González	
Vida campesina, tianguis y territorios	123
María Cristina Chávez Mejía, Noemí Guadarrama Martínez	



© Enrique Soto. *La pesca del día*. San Agustínillo, Oaxaca, 2013.

Enlaces entre disciplinas académicas: multi, inter y transdisciplinariedad

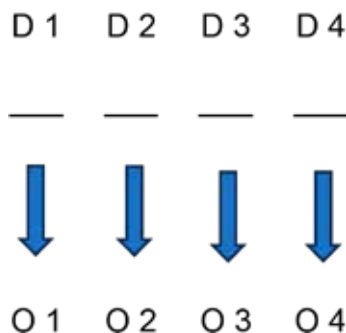
José Luis **Díaz Gómez**

La especialización creciente de múltiples áreas del conocimiento ha sido la tónica de la investigación científica en buena parte del siglo XX. Esta disposición metodológica y estratégica involucró el desarrollo y el ejercicio de diferentes disciplinas académicas de manera relativamente autónoma, con programas de investigación propios e independientes dedicados a objetivos cada vez más puntuales, que algún historiador calificó, algo injustamente, como “saber cada vez más y más de menos y menos”.

En el medio académico, una disciplina se concibe como una rama del conocimiento y de la investigación reconocible por un abordaje diferenciado y específico en referencia a técnicas, datos, hechos, conceptos y teorías; por las preguntas que plantea enfocadas a un fragmento del mundo y por la ontología de la realidad que profesa o asume, todo lo cual conforma un campo de estudio definido y delimitado, aunque en constante devenir. Este tipo de aproximación disciplinar especializada y experta ha sido un fundamento ostensible de la cultura moderna occidentalizada, de tal forma que cuestionarla, repensarla o redefinirla podría considerarse contrario a la naturaleza misma de la ciencia y la tecnología. Sin embargo, los paradigmas supradisciplinarios que han ido surgiendo requieren de disciplinas bien conformadas y robustas para que se logren las tres formas usuales de interacción, cortejo y enlace entre ellas: las plataformas multi, inter y transdisciplinarias.

Tales fórmulas fueron planteadas desde 1972 por Jean Piaget, pionero del desarrollo cognitivo, de la epistemología genética y filósofo de la ciencia de amplio espectro (Piaget, 1972; Ramos, 2019).

El enfoque disciplinario puede figurarse en el siguiente esquema:



donde D representa una disciplina definida y O un objeto particular de estudio, de tal forma que cada disciplina aborda y discierne (flechas) ese sector del mundo de forma específica, con un enfoque característico y desde una plataforma independiente (—).

Las críticas y cuestionamientos culturales generalizados en las décadas de 1960 y 1970 abrieron espacios para reconsiderar las formas y los paradigmas tradicionales de investigación científica y tecnológica. En este marco, Michel Foucault (1976) opinó que la separación entre disciplinas no solo era una forma de categorizar y producir conocimiento, sino también de regular la conducta y las relaciones sociales al legitimar y favorecer a quienes adquieren entrenamiento especializado y disciplinario. Es indudable que la investigación disciplinar produce datos que constituyen ladrillos o piezas elementales de conocimiento que se integran en modelos científicos y satisfacen en buena medida los intereses y los criterios de quienes financian proyectos y protocolos de investigación desde los sectores público, académico o privado.

El éxito del enfoque disciplinar prohió con frecuencia una actitud reduccionista en las ciencias que confiaba la comprensión de un objeto, fenómeno o proceso al análisis de sus partes. Sin embargo,

varias disciplinas nacidas en el siglo XIX, como la fisiología de Claude Bernard o la sociología de Émile Durkheim, habían surgido con un paradigma sistémico y un enfoque integrativo. Hace décadas empezó a fortalecerse la idea de que la especialización creciente de las disciplinas contrasta con la naturaleza compleja de diversas realidades a estudiar, la cual demanda enfoques dilatados y multifacéticos para ser convenientemente abordada. De esta forma, prosperó una orientación llamada sistémica u holista, aparentemente contraria a la reduccionista, que afirmaba el estudio de estructuras y fenómenos considerados como un todo constituido por partes en interacción. En su libro de 1960 sobre el estructuralismo, el propio Jean Piaget (1999) definió este enfoque por su concepción de totalidades definidas más por sus propiedades y por sus transformaciones automoduladas por un equilibrio dinámico, una metodología que fuera adoptada por diversas ciencias y disciplinas. Con el tiempo, se fue aceptando la idea de que los enfoques reduccionista y holista no son incompatibles, pues ambos tienen un ámbito de interés, legitimidad y explicación que no solo resulta compatible sino complementario en referencia a las relaciones causales entre niveles micro y macro de una realidad considerada.

Es verdad que las ofertas supradisciplinarias han asumido que, por su naturaleza encauzada y parcial, el enfoque disciplinar no puede abordar o responder a realidades sistémicas complejas. Los esfuerzos iniciales de interacción entre diversas disciplinas mostraron, además, que las formas concertadas de investigación no solo consideran los niveles elevados de organización, sino las dinámicas que se establecen entre los diversos niveles y que dan origen a fenómenos denominados emergentes y complejos (García, 1994, Bunge, 2017). El conceptualizar diversos fenómenos y sistemas como estratos organizados en una jerarquía vertical, que abarca desde elementos fundamentales hasta capas superiores de organización, es un esquema que aparece desde la Antigüedad clásica, se repite en el Renacimiento con la relación entre micro y macrocosmos, y se expresó de manera formal desde mediados del siglo pasado con la teoría general de los sistemas.

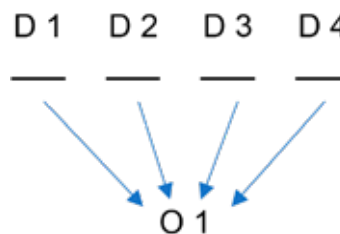
Por ejemplo, en la biología es común considerar al organismo vivo como un sistema integrado por niveles superpuestos y engarzados de moléculas-células-tejidos-órganos-aparatos-sistemas-individuos, entramado donde se realiza una profusa y finamente autorregulada red de mecanismos causales que operan tanto “de abajo hacia arriba” (*bottom-up*) como de “arriba hacia abajo” (*top-down*). La idea es sencilla de comprender y muy útil cuando se trata de abordar conceptos como reducción, complejidad y emergencia, o de ubicar e interrelacionar los campos de estudio de la física, la química, la biología, la psicología, la sociología, con intentos para agregar a la ecología en los estratos superiores. Independientemente de los criterios adoptados para definir y separar los niveles, se asume que cada peldaño “hacia arriba” en esta escala representa un incremento en la complejidad de organización, y este principio constituye una justificación para abordar o estudiar los niveles de mayor jerarquía e integración mediante enfoques supradisciplinarios (Morin, 1990). Ahora bien, es importante admitir que los intentos de investigación supradisciplinar y sus diversos maridajes enfrentan incertidumbres, retos y dificultades de orden conceptual, práctico y burocrático (Klein, 1996; Repko, 2008). Para elaborar sobre estos retos es importante examinar las estrategias referidas y que suelen mezclarse o confundirse.

LOS PREFIJOS MULTI, INTER Y TRANS

A diferencia del enfoque disciplinar, la tónica de investigación denominada *multidisciplinaria* se basa en la yuxtaposición de aproximaciones, modelos y técnicas de disciplinas diferentes que abordan de manera puntual una cuestión, problema, fenómeno o proceso. Desde esta perspectiva, cada especialista constituye un experto que funciona por separado sin mayor sinergia con el resto y dentro de límites marcados por el devenir, los procedimientos, los axiomas y las normas aceptadas de su disciplina. De esta forma, los especialistas acrecientan su saber y lo dan a conocer en congresos y publicaciones de su materia. Ciertamente, los diversos especialistas comparten premisas generales de

la investigación científica de su entorno y de su tiempo, aunque se detectan diferencias epistémicas y metodológicas, a veces profundas y enconadas, entre las así llamadas ciencias básicas, ciencias biomédicas, ciencias sociales y las humanidades.

El enfoque multidisciplinario puede representarse de la siguiente manera, siguiendo los lineamientos y símbolos del anterior esquema disciplinar:



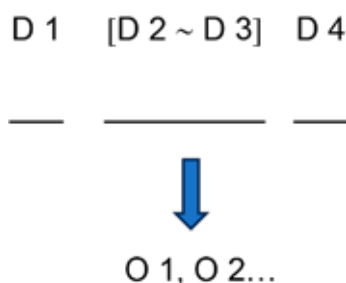
Ahora bien, la investigación multidisciplinaria ha promovido formas de intercambio y acuerdo de tal manera que la colaboración entre especialistas se ha ido extendiendo y afinando. Es así como existen modelos de trabajo en equipo que funcionan de maneras cada vez más eficientes en diversas ramas del conocimiento y de la práctica. Por ejemplo, en la medicina institucional avanzada, la función concreta de un equipo multidisciplinario es congregar especialistas de los campos médico, de enfermería, trabajo social, nutrición y otros, con el objeto de decidir en conjunto el plan terapéutico de una persona enferma. El equipo estudia las condiciones de vida, trabajo, seguridad y recreación para evaluar la calidad de vida de alguien en particular en términos de su enfermedad y del proceso de su tratamiento y curación. Por esta razón, además de los mencionados, recientemente se convoca a expertos en salud pública, psicología, bioética, recursos humanos o ejercicio. La focalización de la función del grupo en la salud de una persona en términos de calidad de vida tiende a sentar las bases para que se integren programas de acción balanceados y realistas (Haynes *et al.*, 2019). Es aparente que el trabajo en equipo excede el enfoque independiente al mismo objeto de estudio, y su

estrategia se aproxima a las demandas de la inter y la transdisciplina, como veremos a continuación.

A diferencia del trabajo disciplinar y multidisciplinario, una *interdisciplina* se conforma por el traslape, la intersección y la integración entre dos materias maduras que se enlazan y acoplan para generar un acceso inédito al objeto de estudio desde el punto de vista teórico y metodológico. El objeto mismo sufre una redefinición o una reorientación que expande sus contornos no solo epistémicos, sino muchas veces ontológicos.

Ahora bien, una interdisciplina exitosa no implica la desaparición de las dos troncales en una fusión que las haga obsoletas; por el contrario: constituye una aportación y una ampliación que favorece y extiende su esfera conceptual y técnica. Es así como la fisicoquímica no anuló a la física y a la química, sino las conecta y fertiliza; de igual forma, la etnobotánica integró y enriqueció a la etnología y a la botánica. Se podrían agregar múltiples ejemplos de interdisciplinas que han acrecentado el ámbito y las premisas de sus progenitoras.

El enfoque interdisciplinario puede representarse de la siguiente forma:



Hace décadas, el concepto de interdisciplina pasó de ser algo impreciso a una realidad factual en la estructura y la política de la ciencia. Una organización tan poderosa como la National Science Foundation en los Estados Unidos entiende a la interdisciplina como una forma de investigación que integra información, datos, técnicas, herramientas, perspectivas, conceptos y teorías de dos o más disciplinas para avanzar en el entendimiento de

problemas cuyas soluciones rebasan los límites de una disciplina singular de investigación.

Según Tripp y Shortlidge (2019), el requisito necesario para establecer una integración interdisciplinaria no es solo de orden metodológico, sino cognitivo y afectivo: se trata de cultivar la “humildad disciplinar”, una actitud epistémica imbuida de modestia, acomodo y respeto por otras disciplinas. Este proceder solo puede germinar a partir de una sólida y robusta base disciplinar y de una flexibilidad necesaria para mezclar y conectar conceptos y perspectivas. Es un objetivo difícil de conseguir, pues requiere penetrar, admitir y desenvolverse con suficiente fluidez en los lenguajes, los conocimientos y la subcultura de círculos académicos y epistémicos ajenos al propio. Implica rebasar no solo los límites de la propia disciplina, sino lidiar con la frustración de no comprender o no ser comprendido por integrantes de otros ámbitos disciplinares. En la práctica es indispensable la identificación de lo que es común y lo que es diferentes en los campos en interacción. En ocasiones suele ser necesario redefinir el objetivo del trabajo y sus medios de operación para rebasar las discrepancias y diferencias.

Es interesante notar que, como efecto de su desarrollo y consolidación independiente, una interdisciplina evoluciona hacia una disciplina tal y como la definimos arriba. Por ejemplo, la bioquímica, interdisciplina surgida en la primera mitad del siglo XX como una posible integración entre la química orgánica y la biología, se reforzó hacia mediados del siglo como una potente disciplina al elucidar procesos metabólicos de azúcares, grasas, proteínas y macromoléculas en los organismos vivos, lo cual abrió camino para una biología molecular que dilucidó el código de la herencia en una interacción transdisciplinaria con la genética, la cristalografía y la biología evolutiva, entre otras. Un ejemplo más reciente es la sociobiología, interdisciplina que propuso el entomólogo Edmund Wilson en 1973 con la provocadora premisa de que la conducta social tiene un origen evolutivo y genético. Pasada la inevitable polémica inicial, la interdisciplina se fue consolidando como una actividad científica que integra teorías, métodos y técnicas de las ciencias

de la vida y de las ciencias sociales. La interdisciplina actual es de amplio espectro, pues aborda la ecología, etología, morfología, genética, fisiología y reproducción de las especies sociales; se interesa en las funciones y adaptaciones evolutivas de conductas como el altruismo, la cooperación, la selección sexual, la competencia, las interacciones predador-presa o la genética del comportamiento social. Podría plantearse si esta integración interdisciplinaria entre ciencias biológicas y sociales ha adquirido la categoría de una genuina transdisciplina. Vayamos entonces a este concepto, el más polémico de la relación entre disciplinas.

Una plataforma o postura *transdisciplinaria* constituye una investigación conducida por especialistas de diferentes disciplinas que laboran conjuntamente para crear una aproximación novedosa de orden teórico, metodológico y oportuno que integre sus distintas capacidades y prácticas para abordar tópicos y problemas que requieren de tal integración. Piaget propuso el concepto en 1972 y calificó a la empresa como una etapa avanzada en el desarrollo del pensamiento, puesto que, al lograr una asimilación recíproca entre diversas disciplinas, se encamina hacia una ciencia general:

Finalmente, podemos aspirar a ver un estadio más elevado que suceda a las relaciones interdisciplinarias. Este sería transdisciplinar y no cubriría solo las interacciones y reciprocidades entre proyectos especializados de investigación, sino que pondría estas relaciones dentro de un sistema completo sin fronteras firmes entre las disciplinas.

Una investigación transdisciplinaria no se restringe a una colaboración útil entre especialistas, como acontece con los equipos multidisciplinarios, sino que pretende una modificación y un ajuste del enfoque y el acceso a una realidad o a un problema particularmente complejo que se pretende estudiar y comprender (Appel y Kim-Appel, 2018). Desde la década de 1990 se empezó a aplicar esta perspectiva en diferentes instituciones y simposios internacionales, como lo expuso, entre otros,

el filósofo y sociólogo francés Edgar Morin (1990; Morin St. Onge, 2017).

El enfoque transdisciplinario puede representarse de la siguiente forma, donde la sumatoria interactiva de diversas disciplinas genera una aproximación conjunta (DT) a posibles objetos de estudio:

$$\begin{array}{c}
 D1 + D2 + D3 + D4 \\
 \\
 = DT \\
 \hline
 \downarrow \\
 O1, O2...
 \end{array}$$

Dada esta definición y este esquema, puede plantearse si la transdisciplina constituye sencillamente una interdisciplina ampliada entre más de dos disciplinas. El principio de interacción y fertilización mutua opera también en este caso, pero se debe agregar que la intersección de los campos no solo provee al conjunto resultante de una zona de traslape, sino de varias, como ocurre al superponer tres o más conjuntos en un diagrama de Venn, típicamente representado por tres círculos que se superponen. En este caso, tres disciplinas en intersección e interacción mutua no solo definen tres zonas de bisección, sino que engendran una común de superposición múltiple. Aún más: esta área comunal no solo implica la inclusión de elementos –conceptos, instrumentos, técnicas o prácticas–, sino nuevas propiedades por la interacción entre ellos que no llega a representar un diagrama de Venn tradicional. Una figuración formal de esta interacción entre sujetos y disciplinas utilizando redes sociales de límites variables ha sido propuesta por Prell *et al.*, (2021). El análisis de redes sociales permite estudiar las conexiones que se establecen entre sujetos o entidades sociales mediante la identificación de los tipos y la distribución dinámica de las conexiones que se

dan entre ellos, un formato que se ha aplicado para modelar investigaciones transdisciplinarias de tipo sustentable (Steelman *et al.*, 2021).

Dependiendo de la cercanía de las disciplinas convocadas, es posible plantear varios tipos de interacción situados entre polos putativos de conocimiento. Una transdisciplina contigua ocurriría entre materias similares o aledañas desde el punto de vista de sus presupuestos, enfoques y métodos. Una transdisciplina transvasada pretendería incluir participantes y habilidades lejanos o aun ajenos a la ciencia o a la academia. Por ejemplo, en su libro sobre investigación transdisciplinaria, Fam, Palmer y Mitchell (2017) abren el espectro para incluir en la plataforma la colaboración de usuarios actuales o potenciales del conocimiento implicado. Se trata usualmente de una colaboración con vistas a la resolución de problemas de sustentabilidad, pero se puede plantear para disciplinas observacionales, experimentales, normativas o artesanales. De forma quizás demasiado optimista, James Morin St. Onge (2017) proclama que, al superar la segmentación del saber en departamentos, y al promover el desarrollo y la integración del conocimiento, la transdisciplinariedad implica un cambio de paradigma científico y cultural en la producción de conocimientos transformativos, además de promover el desarrollo de la conciencia y la autoconciencia de sus practicantes.

TRES EJEMPLOS DE TRANSDISCIPLINAS

A continuación, referiré brevemente a tres casos de transdisciplinas que por edad y dispersión académica tuve la oportunidad de conocer y practicar: se trata de la etnofarmacología de plantas rituales, la ciencia cognitiva y la neurociencia.

Desde el siglo XIX, las plantas de uso ritual y adivinatorio han sido fuente de investigación y reflexión para científicos y humanistas. Las han abordado de manera independiente disciplinas tan disímiles como la botánica, la etnología, la química, la farmacología, la fisiología, la psicología, la psiquiatría,

la literatura y la teología. A finales del siglo XIX, lo hacía cada pericia por su lado en una aproximación multidisciplinaria. La interacción creciente y en fases sucesivas de disciplinas tradicionales como la botánica, la etnología, la química y la farmacología, así como de interdisciplinas, como la etnobotánica, la fitoquímica o la psicofarmacología, fue forjando un enfoque transdisciplinario. El notable libro *Les Champignonnes Hallucinogènes du Mexique* de Wasson y Heim (1958) constituyó un tratado pionero de etnofarmacología porque demostró la continuidad del uso ritual de hongos alucinógenos desde los antiguos nahuas hasta los modernos mazatecos, identificó a la psilocibina como el principio químico responsable del efecto y estableció sus acciones perceptuales, afectivas y cognitivas, subrayando los estados ampliados de conciencia que son la base de sus usos rituales en culturas tradicionales y de sus posibles aplicaciones terapéuticas.

Pasemos al segundo ejemplo. Durante la revolución científica de mediados del siglo pasado, protagonizada por la máquina y la prueba de Turing, las teorías de los sistemas generales de Bertalanffy, de la información de Shannon y Weaver y de cibernética de Wiener y Rosenblueth, la mente empieza a ser concebida como una capacidad de los organismos vivos para la captación, el manejo y la expresión de información. Esta fue una noción central de la naciente ciencia cognitiva, investigación sobre la mente, la inteligencia y el cerebro que utilizó como modelo inicial a la teoría computacional de la mente, una analogía funcionalista entre los procesos mentales y la implementación de algoritmos y programas de computadora. La ciencia cognitiva inicial prohijó diversas interdisciplinas, como la filosofía cognitiva, la neurociencia cognitiva, la etología cognitiva, la psicología o la antropología cognitivas. Su desarrollo e impacto en las ciencias del cerebro y del comportamiento, sus implicaciones filosóficas y la discusión de sus problemas y obstáculos constituyeron una amplia plataforma transdisciplinaria situada entre ciencias del cómputo, ciencias del sistema nervioso, ciencias de la mente, ciencias del lenguaje, ciencias de la conducta, ciencias sociales y filosofía de la mente.

Pasemos ahora al tercer ejemplo, relacionado con el anterior. El concepto de neurociencia surgió a principios de los años setenta para designar un proyecto de coordinación y consolidación de las ciencias que estudian al sistema nervioso desde varios de sus enfoques especializados. A finales de la década de 1950, la IBRO (International Brain Research Organization) definió ocho disciplinas de estudio del cerebro con un perfil robusto y bien demarcado por un conjunto de modelos, técnicas, métodos y descubrimientos particulares: (1) neuroanatomía, (2) neurofisiología, (3) neuroquímica, (4) neurofarmacología, (5) neuroendocrinología, (6) ciencias de la conducta, (7) biofísica y (8) neuropatología. Constituían especialidades teóricas, metodológicas y laborales que tenían el objeto de analizar y comprender al sistema nervioso en general y al cerebro en particular. Por esa misma época se habían generado varias interdisciplinas, la de mayor alcance se planteó entre las disciplinas mencionadas y la psicología bajo el rubro general de psicobiología. Así se conformaron la psicofisiología, auspiciada por la aplicación de técnicas electrofisiológicas, la psicofarmacología y una aproximación biológica de la psiquiatría. Posteriormente surgieron interdisciplinas entre las ciencias de la conducta y las ciencias del cerebro, como la fisiología de la conducta, la neuroetología o la neurociencia social. Con el objeto de atraer a las diversas especialidades y de coordinar enfoques y proyectos interdisciplinarios, en 1962 se fundó el Neurosciences Research Program bajo los auspicios de la AAAS (American Association for the Advancement of Science) y el MIT (Massachusetts Institute of Technology). La novedad consistió en enfocar los problemas de análisis en temas cuya naturaleza exigía de una aproximación conjunta de diversas disciplinas: una plataforma transdisciplinaria.

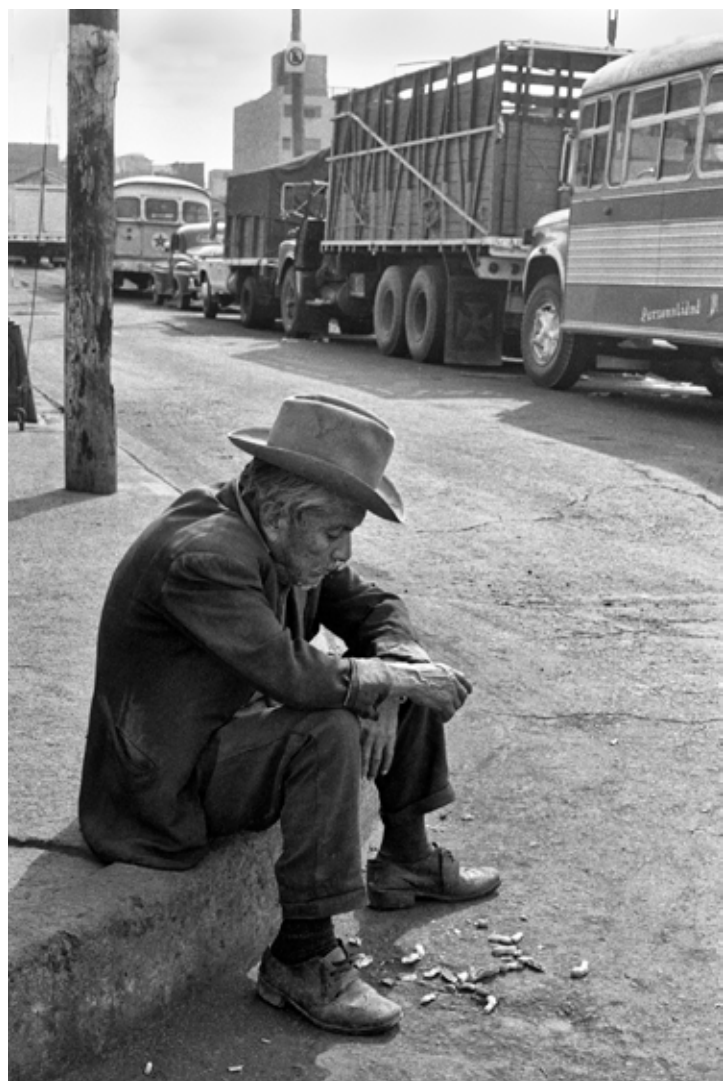
La neurociencia contemporánea reafirma que el cerebro es necesario para la vida mental y ha esclarecido varios fundamentos neurobiológicos de actividades cognitivas, afectivas y volitivas, pero subsiste desafiante un enigma central: ¿cómo es que el cerebro genera, alberga y manifiesta la conciencia? Desde finales de siglo, la aproximación a este problema se ha caracterizado por modelos, hipótesis y enfoques que acerquen y acoplen la fenomenología

de la conciencia, la neurofisiología del cerebro y la expresión conductual y verbal, pero aún no aclara cómo ocurre la experiencia subjetiva. Para remontar esta dificultad, llamada “problema duro de la conciencia,” se ha planteado a la “neurofenomenología” como una transdisciplina de espectro más amplio y desafiante entre la neurociencia cognitiva, la fenomenología heredera de Husserl, la narratología y la técnica introspectiva de la tradición budista..

REFERENCIAS

Appel J and Kim-Appel D (2018). Towards a Transdisciplinary View: Innovations in Higher Education. *Proceedings of Teaching*

© Enrique Soto. *Un cigarrillo*. Veracruz, ca. 1975.





© Enrique Soto. *La siesta*. Granada, Nicaragua, 2012.

and Education Conferences 8308774, International Institute of Social and Economic Sciences.

Bunge M (2017). *Emergencia y convergencia. Novedad cualitativa y unidad del conocimiento*. Gedisa.

Fam E, Palmer J and Mitchell C (2107). *Transdisciplinary Research and Practice for Sustainability Outcomes*. Londres, Routledge.

Foucault M (1976). *La arqueología del saber*. Buenos Aires: Siglo XXI.

García R (1994). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. En *Ciencias Sociales y Formación Ambiental* (Enrique Leff, comp.) Barcelona, España: Gedisa y UNAM.

Haynes NJ, Vandenberg RJ, DeJoy DM, Wilson MG, Padilla HM, Zuercher HS and Robertson MM (2019). The workplace health group: A case study of 20 years of multidisciplinary research. *American Psychology* (3):380-393.

Klein JT (1996). *Crossing boundaries: Knowledge, disciplinaries, and interdisciplinaries*. Charlottesville: University of Virginia Press.

Morin E (1990). *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona, Gedisa, 1990.

Morin St. Onge J (2017). Transición a una ciencia y cultura transdisciplinarias. *Revista de la Academia* 24:111-142.

Piaget J (1972). The epistemology of interdisciplinary relationships. En: *Interdisciplinarity. Problems of Teaching in Universities* (L. Apostel, G. Berger, A. Briggs, y G. Michaud, Eds.). Organization for Economic Co-operation and Development. Center for Educational Research and

Innovation, pp. 127-139. Traducido en 1979 y editado por la Biblioteca de la Educación Superior, ANUIES, pp. 153-171.

Piaget J (1999) *El estructuralismo*. México: Publicaciones Cruz.

Prell C, Hesed CDM, Johnson K, Paolisso M, Teodoro JD and Van Dolah E (2021). Transdisciplinarity and Shifting Network Boundaries: The Challenges of Studying an Evolving Stakeholder Network in Participatory Settings. *Field Methods* 33(4):405-416. <https://doi.org/10.1177/1525822X20983984>.

Ramos R (2019). Sobre las relaciones entre las disciplinas en la epistemología genética de Jean Piaget. *Intersecciones en Comunicación* 13 (1):51-72.

Repko AF (2008). *Interdisciplinary research: Process and theory*. Thousand Oaks, CA: Sage.

Steelman T, Bogdan A, Mantyka-Pringle C et al. (2021). Evaluating transdisciplinary research practices: insights from social network analysis. *Sustain Sci* 16:631-645.

Tripp B and Shortlidge EE (2019). A Framework to Guide Undergraduate Education in Interdisciplinary Science. *CBE Life Sci Educ*. 18(2):es3. <https://doi.org/10.1187/cbe.18-11-0226>.

José Luis Díaz Gómez
Departamento de Historia y Filosofía de la Medicina
Facultad de Medicina
Universidad Nacional Autónoma de México
Academia Mexicana de la Lengua
jldiaz43@gmail.com
www.joseluisdiaz.org

Francis Bacon y la nueva función del saber

Arturo **Santos Raga**

En las páginas de la historia de la ciencia, Francis Bacon –nacido el 22 de enero de 1561– ocupa un lugar destacado no solo porque fue uno de los primeros pensadores en tomar conciencia del significado histórico de la ciencia y de la función que podía desempeñar en la vida humana, sino también porque impulsó y canalizó el nuevo movimiento científico, comprendiendo, apreciando y defendiendo el método científico e indicando de qué modo habría de aplicarse. Su doctrina y su actitud a favor del progreso científico y técnico al servicio del hombre le distingue decididamente de la tradición filosófica por su desconfianza en la especulación, aunque mantuvo una línea de continuidad con la filosofía tradicional, pero, al mismo tiempo, su rechazo de la filosofía tradicional fue claro e indiscutible.

Bacon lanza su tesis: el valor y la justificación del saber consiste sobre todo en su aplicación y utilidad práctica para mejorar y transformar las condiciones de la vida humana; a través de la ciencia hay que extender el poder del hombre sobre la naturaleza. Bacon se sentía muy impresionado por los efectos prácticos de la invención de la imprenta, la pólvora y la brújula, invenciones que ponía como ejemplo del saber superior del hombre moderno respecto a los antiguos griegos. Pero estos tres inventos se basan en el trato directo con la naturaleza misma. Bacon insistía en que el hombre acudiera directamente a la naturaleza tratando de penetrar con su inteligencia en el secreto de su modo de actuar.



© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

Bacon era partidario del método inductivo, decía que el conocimiento científico de la naturaleza le abriría a la raza humana el camino del dominio sobre la misma. Así pues, advirtió de un modo notable la nueva era de conquistas científicas que se acercaba, que él confiaba en que habría de servir al reino del hombre y a la cultura humana. El final de su vida se produce el 9 de abril de 1626, en el primer cuarto del siglo XVII, siglo a cuyo esplendor espiritual prestó un aporte inestimable.

En este trabajo nos proponemos hurgar en la historia de la ciencia y ampliar sus registros mostrando el modo en que su pisada fue capaz de dejar huella al deambular por esa senda. Si a ello añadimos el hecho de que su época se sitúa entre el Renacimiento y los primeros años del siglo en que empieza la llamada Revolución Científica, el caso de Bacon es realmente digno de investigación y análisis, a fin de darnos cuenta del modo en que opera la ciencia actual.

A raíz de las observaciones efectuadas hasta ahora, se descubre una idea preminente y peculiar de Bacon:

La historia de Francis Bacon [...] es la historia de una vida dedicada por completo a una gran idea. Esta idea se apoderó de él cuando no era

más que un muchacho, se encarnó a través de las diversas experiencias de su vida y estuvo presente hasta en su lecho de muerte. En la actualidad dicha idea parece obvia, en parte se ha convertido en realidad, en parte ha perdido su esplendor y a menudo ha quedado desnaturalizada. Sin embargo, en tiempos de Bacon constituía una novedad. Consistía simplemente en creer que el saber debía llevar sus resultados a la práctica, la ciencia debía ser aplicable a la industria, los hombres tenían el deber sagrado de organizarse para mejorar y para transformar sus condiciones de vida. Esta idea, que en sí misma es muy grande, recibió gracias al pensamiento de Bacon un desarrollo tan notable que la llevó a iluminar todo el curso de la historia humana. Partiendo de esta nueva idea, Bacon sometió a revisión la cultura humana en su integridad, para descubrir cómo era que había producido tan escasos resultados prácticos y de qué manera podía perfeccionarse. (Farrington, 1991)

Esta es la gran idea con la que Bacon soñaba y el objeto de su existencia, una ciencia operativa, entendido esto como productiva, útil. En realidad, Francis sostenía tesis que hoy forman parte del sentido común. Dichas tesis son:

La ciencia puede y debe transformar las condiciones de vida humana; no es una realidad indiferente a los valores de la ética, sino un instrumento construido por el hombre en vista de la realización de los valores de la fraternidad y el progreso; a través de la ciencia –donde está vigente la colaboración mutua, la humildad ante la naturaleza, la voluntad de claridad– hay que potenciar y fortalecer estos valores; la ampliación del poder del hombre sobre la naturaleza no es nunca obra de un investigador individual, que mantenga en secreto sus resultados, sino que es necesariamente fruto de una colectividad organizada de científicos; el saber siempre posee una función concreta en el seno del mundo histórico, y toda reforma de la cultura es también –siempre– una reforma de las instituciones



© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

culturales, de las universidades, de las instituciones y, por supuesto, de la mentalidad de los intelectuales. (Rossi, 1990)

Y es que el pensamiento de este filósofo inglés ha condicionado nuestra actitud general hacia el saber, el conocimiento y la naturaleza, y marcado profundamente nuestra mentalidad: la de que el avance científico y tecnológico es la condición necesaria y suficiente para alcanzar el bienestar individual y social.

Como podemos ir viendo ya, el pensamiento de Bacon se articula en los conceptos de Conocimiento, Poder, Ciencia, Cultura, Progreso y Naturaleza. Su intención consiste principalmente en una reforma de la cultura y del concepto mismo del saber, que otorgará gran protagonismo al mundo natural y a la técnica. Dicho en pocas palabras, los “descubrimientos naturales”, ese es el camino que toma el pensamiento de Bacon a la luz de la observación empírica de la naturaleza. El intento de Bacon es, por lo tanto, el de reformar la cultura y el sistema científico o conducir a una nueva visión del conocimiento y la ciencia.

De este modo, el pensamiento de nuestro autor debe ser entendido como un canto a la naturaleza, la que podemos observar directamente, ya que ese es verdaderamente el instrumento del que debe ayudarse el filósofo para su investigación: la observación, y a la que debe atenerse tan estrictamente



© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

como sea posible. Solo obrando así será posible alcanzar la precisión necesaria en el conocimiento de la naturaleza con el objeto de controlar sus componentes esenciales y, a partir de ahí, realizar nuevos hallazgos que repercutan en el progreso de la humanidad.

Lo cierto es que con Bacon da comienzo una nueva forma de pensar: la filosofía experimental. Se puede concebir el mundo natural como la piedra angular de su propuesta filosófica. La clave estriba, entonces, en un pensamiento que abandona la contemplación para orientarse a la acción, de renunciar a la contemplación para centrarse en el mundo empírico. En tales circunstancias, se vuelve fácilmente comprensible el ataque de Bacon a la tradición filosófica del pasado, intenta substituir la “filosofía de las palabras” que ha excluido por completo el estudio de la naturaleza, por la “filosofía experimental” basada en la observación detenida de los hechos del mundo.

Además, a ojos de Bacon, los filósofos de la Antigüedad y de la Edad Media y el Renacimiento pecaron de arrogancia, de soberbia intelectual, porque son expresiones de una actitud moralmente culpable al acatamiento de la realidad, se han encerrado en las formas lógicas que ellos mismos han construido. La implicación más grave de aquel pecado de soberbia intelectual es la esterilidad subyacente de la filosofía, al



© **Enrique Soto**. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

haber disociado teoría y producción, verdad científica y utilidad práctica. Y es ese el meollo de la cuestión, pues debe advertirse que el saber posee una función diferente de aquella que le ha atribuido la tradición.

Esta es la de una progresiva inmersión en las profundidades de la naturaleza, en sus territorios inexplorados. Por todo ello, el saber debe entenderse como una búsqueda, como una aventura: se trata de penetrar en territorios ignotos y de superar, finalmente, las Columnas de Hércules, pues solo así es posible adquirir unos conocimientos que permitan el dominio del mundo y el incremento del nivel de progreso y bienestar de los hombres.

En la carta a Baranzani, escrita en 1622, Bacon expone:

En resumen, lo que quiero decir es lo siguiente: si los hombres desean someterse a las cosas, se avanzará; si no, los ingenios darán vueltas sobre sí mismos.

La idea básica y fundamental que rige a todo el discurso de Bacon es la de que la única investigación teórica que permite acrecentar notablemente el conocimiento es aquella dirigida por una voluntad práctica.

No obstante, esta indicación, la de “someterse a las cosas”, es insuficiente para descubrir los principios fecundos, de útil aplicación, puesto que

[...] se necesita un método [...], hay que obtener los axiomas de forma continua y por grados, para llegar solo al final de los componentes más generales;

estos serán, entonces,

[...] principios adecuadamente determinados, reconocidos por la naturaleza misma como los más conocidos en sí mismos, e intrínsecos a las cosas mismas

Bacon insiste en la importancia del método para no correr el riesgo de apoyar una interpretación de la naturaleza arbitraria o parcial.



© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

Por ende, se puede afirmar con certeza que la “filosofía experimental” de Bacon es una filosofía fundada en una cierta forma de observar los hechos de la naturaleza. Una filosofía que adopta un método claro y definido, mediante el cual analiza los acontecimientos naturales y alcanza la universalidad que Bacon exige a lo que debe ser la filosofía. Todos sabemos que solo el empleo de un método riguroso y probado puede conducirnos a tesis ciertas y universales. Bacon avanza hacia una filosofía del saber técnico-científico, distanciándose de la imagen de la filosofía anclada al saber retórico-literario.

El hecho es que la mente del hombre tiene necesidad de tales ayudas, porque el secreto de la naturaleza que queremos desvelar, que deseamos iluminar con el poder del conocimiento, supera la mente del hombre. Hay que señalar el camino que pueda conducir la mente del hombre a la verdad de las cosas, sin extraviarse ni confundirse. Frente al laberinto de la naturaleza, el intelecto humano nos conducirá a sus secretos únicamente si está provisto de método. Filosofía experimental significa, sobre

todo, seguir un método inductivo, es decir, llegar a proposiciones generales y a leyes universales solo a partir de la observación de las cosas particulares. La lógica de Bacon tiene que entenderse como una lógica del descubrimiento y de la invención, y no del discurso y la demostración: su función no es la de establecer las reglas para la discusión, sino la de ofrecer “designaciones e indicaciones para la acción”.

Ya hemos hablado de cómo nuestro filósofo inglés condena confiar demasiado en la capacidad de la mente humana. Pero, ¿cuáles son los motivos por los que debemos desconfiar, o al menos ser cautelosos, ante las capacidades del ser humano? El origen de estas ideas radica en que la mente del hombre, y por lo tanto su capacidad de conocimiento, se encuentra influida por prejuicios que fuerzan nuestra perspectiva de las cosas y falsean nuestros juicios.

Es preciso, pues, prestar atención a los “ídolos y falsas nociones” que amenazan a la mente humana y hacen difícil el logro de la ciencia, a menos que se eliminen ellos, lo que debería facilitar la recuperación de la conexión entre el hombre y la naturaleza. Una síntesis de lo que Bacon denomina ídolos es la imagen del entendimiento como un “espejo encantado, lleno de supersticiones y de espectros” que es preciso pulir, dejándolo brillante, para que refleje la totalidad del universo. Son, en otras palabras,

© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.



las fantasmagorías que infectan nuestras mentes, incapaces de desvelar los enigmas de la naturaleza. Estos ídolos no son otra cosa que los prejuicios, lentes que deforman el conocimiento de las cosas.

De ahí la famosa teoría baconiana de los ídolos, que son de cuatro tipos: los ídolos de la tribu, los ídolos de la caverna, los ídolos del foro y los ídolos del teatro. Nos centraremos a continuación en desarrollar un poco más esos ídolos a los que Bacon alude.

Los ídolos de la tribu son inherentes a la naturaleza humana y se deben sobre todo a la debilidad de los sentidos y de la propia mente humana, que es propensa a confiar en aquellas ideas comúnmente aceptadas. O, como escribe Bacon:

He ahí los ídolos que nosotros llamamos de la tribu, que tienen su origen o en la regularidad inherente a la esencia del humano espíritu, en sus prejuicios, en su limitado alcance, en su continua inestabilidad, en su comercio con las pasiones, en la imbecilidad de los sentidos, o en el modo de impresión que recibimos de las cosas. (Bacon, 1984)

Los ídolos de la caverna tienen su fundamento en la constitución, hábitos y circunstancias de cada hombre individual –afirma Bacon– a causa de su temperamento, contexto familiar, lecturas, amistades e influencias especiales que han pesado sobre él como individuo. Cada uno de esos factores, sin darse cuenta, le influye para decidir sobre una hipótesis o una idea por encima de otra según el punto de vista de su propia madriguera o caverna,

[...] porque cada uno tiene (además de las aberraciones de la naturaleza humana en general) una cierta cueva o caverna propia, que rompe y falsea la luz de la naturaleza.

Es cierto, como dijo Heráclito, que “los hombres van a buscar las ciencias en sus pequeños mundos, no en el mundo más grande, idéntico para todos”.

El tercer tipo de ídolos son los del foro o del mercado, que provienen del lenguaje,

[...] ya que los hombres se imaginan que la razón ejerce dominio sobre las palabras, pero sucede a veces que las palabras devuelven y reflejan también su fuerza sobre el entendimiento.

Bacon advierte que el hombre ha asumido que el lenguaje es un mero instrumento que le permite expresar de manera neutra sus propias ideas. Y no es así: el lenguaje puede obstaculizar la expresión de un análisis adecuado. A veces muchas de las discusiones serias de los hombres se reducen con frecuencia a meras disputas de palabras, sin que haya cosas que le correspondan, o sin un concepto claro de lo que denotan. En opinión de Bacon, estos ídolos son “los más peligrosos de todos”.

Llegamos finalmente al cuarto tipo de ídolos, los “ídolos del teatro”. Estos son las diversas teorías y sistemas filosóficos que no pasan de ser “otras tantas comedias compuestas y representadas que contienen mundos ficticios y teatrales”.

Los ídolos de la filosofía falsa pueden reducirse a tres “clases de pensamiento”: la sofística, que tiene como representante más notable a Aristóteles, que corrompió con sus categorías como el acto, la potencia y otras, a la filosofía de la naturaleza; la empírica, basada en unos pocos experimentos que resaltan su estrechez y oscuridad, cuyo principal representante sería Paracelso; y la supersticiosa, caracterizada por la mezcla de filosofía y teología, cuyos máximos exponentes son Platón y Pitágoras.

Una vez realizada la tarea de purificación de la mente, Bacon puede ceñirse a la *pars construens* (las partes de la argumentación) del método que debe seguir el hombre para acceder al enigma de la naturaleza. Tal es el objetivo de Bacon y en el que ha puesto su mejor esperanza.

La tarea de “hacer surgir de la experiencia las leyes generales” se desarrolla en tres etapas, complementarias y necesarias. Una primera, que denomina historia natural y experimental, consistente en la selección de todos los fenómenos naturales o, al menos, una cantidad tan grande como para que la historia sea “suficiente y exacta”. La segunda etapa del método, expuesta en su célebre teoría de las tres tablas –tabla de los hechos positivos, tabla de



© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

ausencias y tabla de grados– que tiene la función de ordenar estos fenómenos naturales y encadenamientos de hechos para que el intelecto “pueda operar sobre ellas”. Ese es el proceso del verdadero método de la experiencia, que

[...] primero enciende la luz y luego, por medio de la luz, señala el camino empezando por una experiencia ordenada y madura y no desordenada y al azar, y deduciendo de ella los axiomas, y de los axiomas así establecidos otra vez nuevos experimentos.

La tercera etapa constituye el momento culminante del método y del conocimiento humano mismo, y es la de “descubrir la forma o la verdadera diferencia específica o la naturaleza naturante o la fuente de emanación”, términos todos ellos que emplea Bacon para designar la realidad última de las cosas, la esencia profunda de lo que tenemos delante. Bacon hace equivalente esta “esencia” al concepto de forma, de manera que la forma encierra “la esencia” de las cosas: descubrir la forma es descubrir la naturaleza de aquello sobre lo que se estaba investigando. En un lenguaje moderno podemos interpretar esta forma como la ley de la realidad material:

[...] conocer las formas es haber comprendido la unidad de la naturaleza en medio de las materias más desemejantes; del descubrimiento de las formas resulta una teoría verdadera y una amplia práctica.

Así, la forma determina y constituye intrínsecamente las propiedades de las que se componen los cuerpos. Casi podría llegarse a decir que, con estas especulaciones, Bacon ha vislumbrado la aventura de los físicos atómicos contemporáneos.

Por lo que hemos visto hasta ahora, podemos decir que, a criterio de Bacon, la nueva inducción que propone y que ha de ser útil para el descubrimiento de la ciencia y de la técnica procede de la manera siguiente: una vez escogido un determinado aspecto de la realidad como objeto de estudio, se señalan todas las variaciones que aparezcan en diferentes tablas, se comparan entre sí y se excluyen todas aquellas cualidades irrelevantes para el objeto examinado, hasta llegar a las cualidades esenciales, que permiten definir su “esencia”.

Gracias al ideal del saber público, controlado, que procede con cautela a partir de la experiencia,



© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

la visión de la ciencia en Bacon puede definirse ya, a todas luces, como moderna.

Algunos de los rasgos principales de la ciencia moderna se resumirían en los siguientes puntos: su función es la transformación del mundo en beneficio de todos los hombres, está estrechamente relacionada con la técnica, es progresiva e intersubjetiva, y debe estar expuesta y debe escribirse en términos claros. En vista de cada uno de estos aspectos, Bacon se aparta nítidamente del saber mágico–alquímico.

Valdrá la pena que ahora nos detengamos a estudiar más a fondo los rasgos primordiales de la ciencia moderna concebida por Bacon. Por lo que hemos visto hasta ahora, podemos decir que para Bacon la ciencia es “técnica” porque permite transformar el mundo natural a través de un conocimiento práctico. La ciencia puede considerarse también “progresiva” porque se halla siempre en expansión. La verdad es que la ciencia de la

naturaleza evoluciona y se desarrolla a través de descubrimientos antes impensables, que alcanzan territorios de la naturaleza que antes se consideraban inaccesibles.

La ciencia se construye a partir de la colaboración entre individuos. Es intersubjetiva en tanto que el científico trabaja de manera cooperativa.

La ciencia es el resultado de una cooperación entre investigadores. El verdadero conocimiento científico, por ende, proviene de la investigación compartida y de la cooperación de los resultados obtenidos por generaciones de científicos. En este aspecto, el conocimiento científico es democrático.

Para Bacon, el verdadero y más importante objetivo del saber científico es el de mejorar las condiciones de la vida humana y de la ampliación de sus posibilidades. El saber científico debe contribuir al progreso y debe favorecer y mejorar el bienestar de la humanidad. El conocimiento científico está al servicio del bien común de la gran sociedad humana.

El filósofo inglés concibe el saber científico como algo esencialmente público. No se puede



© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

concebir la investigación científica en un horizonte privado. La ciencia debe permanecer siempre en un ámbito público y debe ser de libre acceso. Además, la ciencia debe seguir un método riguroso que guíe de manera firme al científico en su búsqueda de la verdad. Por todo ello, Bacon, junto a Galileo y Descartes, pasan por ser los iniciadores del pensamiento moderno.

Todo lo anterior nos conduce al lema “el saber es poder”, que describe muy bien la peculiar concepción del conocimiento de Bacon. El objetivo último de la ciencia es la extensión y ampliación del dominio del hombre sobre la naturaleza; pero eso solamente puede lograrse mediante la comprensión de sus leyes, de sus secretos. En este sentido, la ciencia puede conducir al bien de la sociedad y la humanidad entera, que los hombres pueden procurar con sus propios medios, gracias al conocimiento. “La ciencia es poder”.

En 1624, Bacon terminó el texto *Nueva Atlántida*, que se convierte en un emblemático resumen de su pensamiento, donde:

[...] sueña con una constitución en la que el favor más ilimitado y el interés más pródigo, que se concedan a los nuevos métodos de la investigación científica y de la experimentación aplicada a todas las ramas de lo cognoscible, permitan un estado tan elevado de florecimiento y de bienestar, que no carezca ya ningún dolor de su remedio adecuado, ni haya deseo humano que no se vea satisfecho de la forma oportuna. (Reale y Antiseri, 1983)

Precisamente,

[...] las páginas de la Nueva Atlántida que describen las funciones científicas, los institutos de investigación, la actividad laboriosa y la fraterna cooperación entre los sabios, se nos aparecen [...] como la manifestación –proyectada en el plano de la utopía– de las esperanzas más elevadas de Francis Bacon. (Rossi, 1990)



© Enrique Soto. Serie *Correfox*, Campello, 2023.

Bastará con este pequeño relato sobre Bacon para darnos cuenta de hasta qué punto su pensamiento puede considerarse una verdadera novedad en su tiempo y en la historia de la ciencia, ya que su trabajo es la expresión del profundo deseo de una reforma de la cultura que configurará los nuevos derroteros del saber. No hay que olvidar que su concepción de la ciencia está profundamente arraigada en la mentalidad moderna.

Sin lugar a duda, cada uno de nosotros es, a propósito, o no, baconiano; también hay que destacar que su concepción de la ciencia inspiró directamente a la creación de la Real Sociedad de Londres para el Avance de las Ciencias Naturales, fundada en 1660, y no fue la única sociedad científica. Estas y otras muchas cosas contribuyeron a que nos acercáramos hoy a las ideas de Francis Bacon, y seguro, en un futuro no muy lejano, tendremos aún más motivos para recordarlo, toda vez que su presencia nos interpela y nos desafía

a repensar la ciencia y a poner en tela de juicio nuestras convicciones.

REFERENCIAS

- Bacon F (1988). *El avance del saber*. Madrid: Alianza.
- (1999). *Nueva Atlántida*. Girona: Abraxas
- (2022). *De la sabiduría egoísta*. Barcelona: Taurus.
- (1985). *Descripción y sumario de la segunda parte de la Instauratione Refutación*. Madrid: CSIC.
- (2011). *La gran restauración, Novum organum*. Madrid: Editorial Tecnos.
- (1984). *Novum Organum*. Barcelona: Orbis.
- Farrington B (1991). *Francis Bacon, filósofo de la revolución industrial*. Madrid: Ediciones Endymon.
- Reale G y Antseri D (1983). *Il pensiero occidentale dalle origini ad oggi*. Brescia: Editrice La Scuola.
- Rossi P (1990). *Francis Bacon. De la magia a la ciencia*. Madrid: Alianza.

Arturo Santos Raga
Universidad Veracruzana
Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos
del Estado de Veracruz
arsantos@uv.mx

El más grande mapa del universo en 3D

Dante Virgilio **Gomez Navarro**

Por siglos, los marineros han usado a las estrellas para ubicarse durante un viaje oceánico. Basados en sus observaciones y con el uso de diferentes aparatos, los marineros pudieron construir mapas que les permitían saber dónde estaban, de dónde venían y a dónde iban. Los mapas galácticos continúan con esta tradición a gran escala, permitiendo la ubicación de la Tierra dentro del universo. Además, funcionan como una máquina de tiempo, ya que permiten trasladarnos hasta la época en que el universo era tan solo un niño. Actualmente, el universo se está expandiendo, separando la distancia entre las galaxias. Esta separación ocurre cada vez más rápido. Sabemos que esto pasa, pero no sabemos por qué. Los científicos usan el término energía oscura para explicar la expansión acelerada.

La energía oscura es un gran misterio, constituye el 68 por ciento del cosmos, y para resolver este enigma, los científicos observan el cielo y capturan la luz de las galaxias. La cartografía cósmica nos revela más información sobre la cantidad oscura y nos cuenta la historia y futuro del universo.

DESI, el proyecto Instrumento Espectroscópico de Energía Oscura, se encuentra en la cima de una montaña en Tucson, Arizona. Medirá la luz de más de 30 millones de galaxias y 4 millones de cuásares durante cinco años a través de sus 5,000 ojos (pequeños robots giratorios). Las galaxias están compuestas de estrellas, polvo cósmico y planetas, mientras que los cuásares se refieren a galaxias

recién nacidas o bien a la radiación emitida por el agujero negro supermasivo localizado en el centro de tales galaxias.

La luz de las galaxias, técnicamente conocida como espectro electromagnético, nos proporciona información sobre qué tan distantes se encuentran los objetos astrofísicos. Los colores del arcoíris representan solo una franja estrecha del espectro electromagnético. Actualmente, los ojos de DESI colectan miles de espectros de colores en tan solo una noche. Esto convierte a DESI en la encuesta de galaxias que construirá el mapa del universo más grande y preciso de la historia.

LOS OJOS DE DESI

Los ojos de DESI pueden vislumbrar 5,000 galaxias cada 20 minutos, el equivalente a observar 100,000 huellas digitales de galaxias durante una noche. La rapidez de estos robots giratorios hace posible esta misión, algo nunca visto con los telescopios previos. Sin embargo, el cielo puede arruinar las observaciones. Las noches de observación rondan entre 8 a 10 horas, dependiendo de las estaciones del año. Cada noche son observadas miles de galaxias y cuásares. Por ejemplo, el día que inició la encuesta principal se recolectaron 60,000 espectros. Aquella noche, cerca de 100 científicos se unieron a la operación para ser testigos del inicio de DESI.

Antes de iniciar la observación principal, la colaboración DESI tuvo que hacer pruebas de observación, un proceso que es llamado “validación de la encuesta”. Esta inició a finales de 2020 y permitió verificar los planes del proyecto con objetivos más tenues y que se extienden sobre regiones más amplias que las que se han observado anteriormente.

DESI tomará diez veces más espectros de luz que los instrumentos anteriores. Por ejemplo, la última encuesta espectroscópica de galaxias, eBOSS, por sus siglas en inglés, comprende un poco más de 2 millones de galaxias y cuásares. La creación de mapas del universo es uno de los intereses científicos que más drásticamente ha cambiado en las últimas

décadas. Para darse una idea, hace 50 años se capturaba la luz de dos mil galaxias; hoy, los mapas que existen tienen millones de galaxias.

MÁQUINA DEL TIEMPO

El mapa del universo contiene millones de galaxias que pueden ser representadas como puntos en el mapa. Cada punto tiene millones y hasta trillones de estrellas. Las galaxias se pueden unir en grupos grandes llamados supercúmulos de galaxias, que son los puntos más grandes. Las galaxias también pueden acomodarse en forma de grandes hilos, los conocidos filamentos cósmicos. La unión de los filamentos con los supercúmulos forma grandes regiones vacías. Estos últimos son conocidos como vacíos cósmicos. Este mapa es conocido como la red cósmica, ya que se asemeja a las telarañas que vemos en los jardines de nuestra casa (Figura 1).

Aunque DESI tiene 5,000 ojos para detectar los espectros simultáneamente, la red cósmica es muy grande para ser observada durante los cinco años de investigación. Así que los científicos llevan a cabo una selección de objetos. El instrumento observará galaxias brillantes que se encuentran relativamente cerca. El telescopio también examinará las galaxias denominadas galaxias luminosas rojas (LRG, por sus siglas en inglés), que se caracterizan por ser masivas y luminosas, lo cual permite verlas hasta 4 mil millones de años luz. Un año luz es la distancia que recorre la luz en un año. Andrómeda, la galaxia espiral más cercana a la Vía Láctea, se encuentra a 2.5 millones de años luz. Es decir, las LRG pueden ser encontradas a distancias 1,600 veces la distancia a Andrómeda.

Además, la colaboración observará galaxias distantes y tenues conocidas como galaxias con línea de emisión (ELG, por sus siglas en inglés), localizadas hasta 8 mil millones de años luz y caracterizadas por tener estrellas jóvenes.

Finalmente, el instrumento observará los cuásares que se encuentran a una distancia mayor y que se caracterizan por tener agujeros negros activos en el centro de la galaxia. Estos objetos tan brillantes son observados hasta los 11 mil millones de años luz.

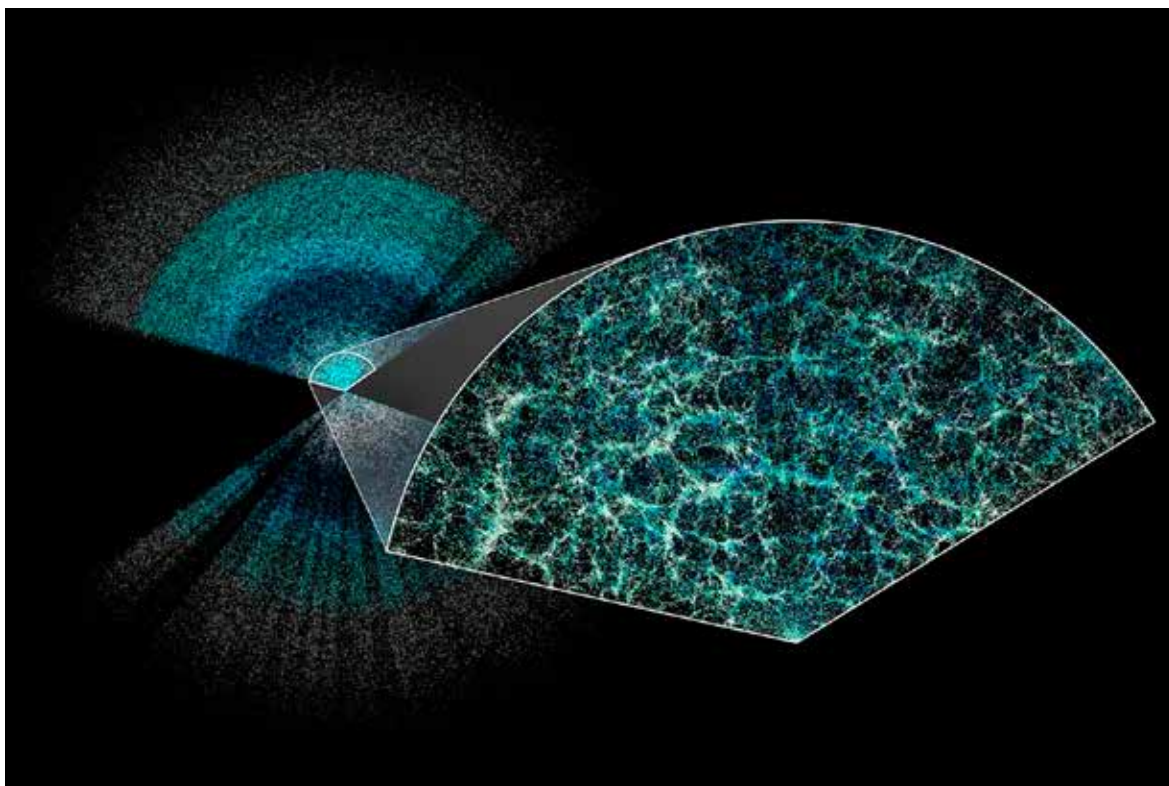


Figura 1. Mapa del universo. La Tierra está en el centro de la estructura con forma de reloj de arena. Del lado derecho, hay una ampliación de la red cósmica. Créditos: Claire Lamman / colaboración DESI.

La observación de distintos objetos cósmicos permite colocarnos en una línea de tiempo que llega tan lejos como 11 mil millones de años luz. Si pensamos al cosmos como una persona de 80 años, con DESI podremos ver cómo era cuando era un joven de 15 años o incluso menor. Por eso decimos que observar galaxias cercanas y distantes es viajar en el tiempo. No es casualidad que el reloj de arena tenga la forma del mapa del universo (Figura 1).

Con la información recolectada por DESI es posible tomar diferentes fotos del universo en diferentes tiempos: de hoy, de ayer, de hace mil millones de años, etcétera. Con esto podemos investigar el contenido de la energía en esas épocas y conocer cómo evoluciona la energía oscura.

¿CÓMO SABEMOS DE QUÉ ESTÁN HECHAS LAS GALAXIAS?

La luz de una galaxia contiene una gran cantidad de información. La medición del espectro de colores de una galaxia proporciona información, tanto de la expansión del universo como del movimiento de las

galaxias, debido a la interacción gravitacional mutua. Las galaxias no se encuentran en el espacio “sin hacer nada”, sino que sienten la influencia de galaxias cercanas. Si una galaxia cercana tiene mucha masa comparada con la galaxia de prueba, entonces la galaxia más grande atraerá a la galaxia menos pesada. A ese movimiento se hace referencia como velocidad peculiar de la galaxia.

Al igual que escuchamos la sirena de la ambulancia con mayor intensidad cuando se acerca, o más débil cuando se aleja, la expansión del universo y las velocidades peculiares de las galaxias provocan que los espectros electromagnéticos de las galaxias se vean más rojizas o más azules.

Este fenómeno es conocido como corrimiento al rojo o al azul. Por ejemplo, la galaxia Andrómeda tiene un corrimiento al azul, ya que se está acercando a nosotros. Las galaxias más distantes se ven rojizas debido a que se alejan. El corrimiento al azul es raro y se da solo en ciertas galaxias cercanas, mientras que

la mayoría de las galaxias muestran un corrimiento al rojo debido a la expansión del universo.

El instrumento con el que podemos extraer la información de las galaxias se conoce como espectroscopio. El espectroscopio descompone la luz blanca en colores, revelando la “huella digital” del objeto observado. DESI cuenta con espectroscopios de alta tecnología capaces de obtener distancias galácticas muy precisas y que, por tanto, disminuyen tres veces la incertidumbre en comparación con encuestas previas de galaxias, como eBOSS. Se podría decir que el rango de colores de los objetos astrofísicos nos da la tercera dimensión y posibilita la construcción del mapa 3D más grande hasta la fecha.

EL TELESCOPIO DE DESI

La luz de las galaxias golpea al espejo primario y después rebota en una serie de lentes antes de llegar a los 5,000 robots de DESI que se mueven automáticamente. Estos robots son los ojos de DESI. La luz recolectada por ellos se envía a través de fibras ópticas al espectroscopio.

Las fibras ópticas son delgados cables, del grosor de un cabello humano, en los que pasa la luz de tal forma que se pierda la menor cantidad de información y se consiga una mayor velocidad de transferencia de la que tienen los cables eléctricos del hogar.

Por otra parte, el espectroscopio separa la luz en un rango de colores, proporcionando información de la distancia y la velocidad con la que se alejan o se acercan de nuestra galaxia.

Debajo del domo se encuentra una estructura masiva que sostiene un espejo muy pesado de 15 toneladas. Además, hay cámaras CCD en el disco

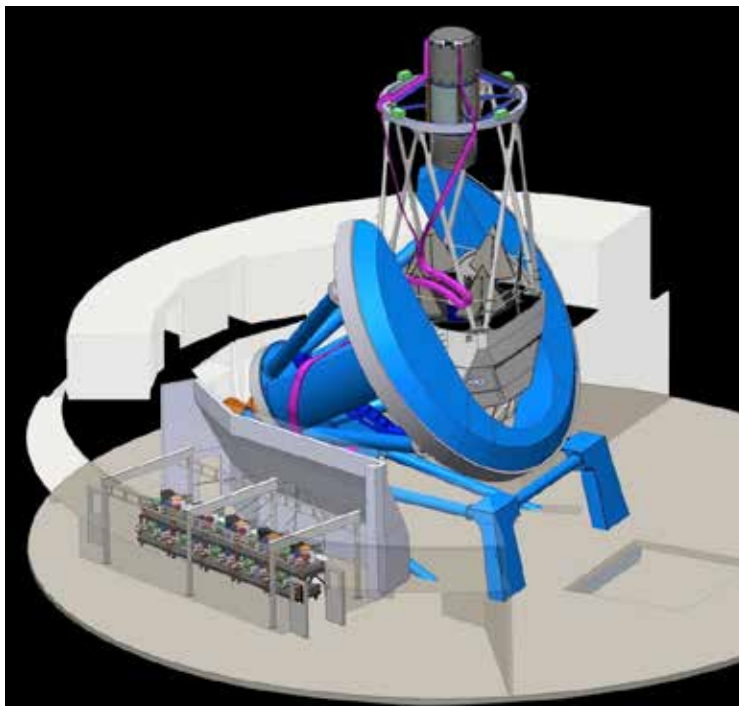


Figura 2. El telescopio Mayall y el instrumento DESI. Obtenida de Miller, TN *et al.* (2018).

con sus 5,000 ojos de casi un metro de diámetro (consta de 10 rebanadas de pastel, cada una con 500 ojos), y una habitación separada llena de 10 espectroscopios (Figura 2).

DESI cuenta con 10 espectroscopios con los que observará millones de espectros de luz. ¡Todo un desafío tecnológico! Este logro se atribuye al movimiento automatizado de las fibras ópticas, a los espectroscopios y al sistema criogénico que protege a las cámaras CCD.

Para lograr la operación automatizada de las fibras se realizaron distintas pruebas con el objetivo de mantener una alineación adecuada con las galaxias y la estabilidad del sistema.

El sistema criogénico sirve para enfriar a los sensores CCD a una temperatura cercana de 0 °C, ya que los tiempos de observación son largos. Otro reto tecnológico es analizar, calibrar y procesar millones de datos con el fin de obtener cantidades relacionadas con la energía oscura. Para llevar a cabo esta tarea, se requiere de una supercomputadora localizada en el Centro de Cómputo del Departamento de Energía de Estados Unidos (NERSC, por sus siglas en inglés).

¿CÓMO SELECCIONAR LAS GALAXIAS DE DESI?

El mapa más grande del universo no inicia con la medición del espectro de las galaxias; antes de ello se preseleccionan los objetos astrofísicos. En el vasto espacio hay una inmensa cantidad de galaxias, así que para seleccionar los objetivos se tiene que tomar fotos de las galaxias con diferentes filtros. El proceso de tomar fotos de galaxias se conoce como encuesta fotométrica. El catálogo de galaxias es determinado usando diferentes bandas ópticas: en la región de azul-verde, en el rojo, y cuatro bandas en el infrarrojo. Es decir, los telescopios que se usaron para construir el catálogo son capaces de captar la radiación de calor de objetos astrofísicos distantes como luz visible que vemos con nuestros ojos. Las bandas ópticas y del infrarrojo son similares a los filtros que se usan en los celulares para tomar *selfies*. DESI tan solo seleccionará 35 millones de galaxias y 2.4 millones de cuásares entre los miles de millones que hay en el mapa 2D. Para lograr el catálogo de galaxias más grande jamás construido, DESI se apoya de otros dos telescopios: el telescopio Bok, localizado en Arizona, Estados Unidos, y el telescopio Blanco, localizado en Chile. Además, los datos son complementados por el satélite WISE (telescopio satelital), un proyecto de la NASA, el cual observa empleando otros filtros.

La construcción de este mapa bidimensional fue un esfuerzo de más de seis años que cubrió la mitad del cielo. Para darnos una idea sobre el tamaño del mapa de galaxias, es como tomar más de 800 mil fotos de alta resolución con celulares. El equivalente a colocar un mosaico de teléfonos inteligentes en 11 canchas del estadio Azteca.

REVELANDO EL LADO OSCURO Y OTRAS COSAS MÁS CON DESI

Los datos recolectados por el telescopio permitirán medir, por ejemplo, cuánto se está expandiendo el universo actualmente, o explorar la cantidad de energía oscura que hay en el cosmos, que es la responsable de que hoy en día la distancia entre pares de galaxias se esté expandiendo cada vez más rápido, algo contrario a nuestra intuición, ya que la atracción

entre galaxias debería disminuir la tasa de expansión, pero ocurre justo lo contrario: el universo se está expandiendo más rápido debido a la energía oscura.

Se conoce que hace 6,000 millones de años el universo empezó a expandirse aceleradamente y que continúa cada vez más rápido desde entonces. Investigar si esto continuará por siempre es uno de los objetivos de DESI. Con base en otros experimentos astronómicos, hay pistas de que la densidad de energía oscura quizá puede variar en el tiempo, y DESI tiene el reto científico de acotar las propiedades de esta con una mayor precisión y un orden de magnitud más de galaxias observadas. DESI medirá la expansión del universo en siete épocas distintas, cada una con una precisión del 1 al 3 % (DESI Collaboration a, 2024; DESI Collaboration b, 2024).

Para lograr este reto científico, los investigadores proponen y contrastan modelos, discuten los resultados en seminarios y reuniones de la colaboración y llevan a cabo pruebas científicas, un proceso que es conocido como “validación de blindaje”, que consiste en probar códigos y programas tanto con datos no reales y datos de DESI para evitar el sesgo o asegurar que los resultados no sean influenciados por lo que se espera. El proyecto DESI es un paso para comprender qué causa la aceleración cósmica. Este entendimiento revolucionará el modelo estándar de la física de partículas, ya sea por la postulación de una nueva forma de energía más allá del modelo estándar de partículas o por una nueva teoría de la gravedad diferente a la relatividad general.

Otro objetivo es averiguar si las galaxias más pequeñas tienen un agujero negro, como ocurre con las galaxias grandes. Una forma de detectar los agujeros negros es a través del polvo, gas y otros materiales, sin embargo, en galaxias pequeñas es difícil detectar estos objetos astronómicos, algo que con los espectros de DESI será posible. Finalmente, DESI observará las estrellas en nuestra galaxia y ayudará a revelar información sobre la materia oscura, otro componente del cosmos que no sabemos qué es, pero que está ahí presente (Dark Energy Spectroscopic Survey [DESI], 2018).

LA COOPERACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

La historia de DESI se basa en la cooperación y colaboración internacional. Cuenta con más de 500 miembros de más de 15 países, incluyendo países latinoamericanos como Colombia, Brasil y México. Mientras que Chile, Argentina, y nuevamente Brasil, que forman parte del Observatorio Internacional Gemini, participaron en un trabajo previo a DESI que consistió en crear el mapa bidimensional más grande jamás construido, en el que DESI solo seleccionó decenas de millones de galaxias, entre los miles de millones de ellas, para luego observar sus espectros. Los más de 500 miembros lo conforman estudiantes de posgrado, posdoctorantes e investigadores.

La colaboración de México consiste en alrededor de 40 científicos, científicas y estudiantes de posgrado de distintas instituciones del país. También hay científicos mexicanos procedentes de instituciones internacionales. El grupo mexicano está a cargo del análisis estadístico de las galaxias, así como del estudio de modelos de gravedad y de energía oscura, entre otras áreas de investigación (Canal CONAHCyT México, 2024).

LOS LÍMITES DE DESI

Si bien el mapa de DESI contendrá 10 veces más galaxias observadas que la encuesta anterior, aún falta mejorar la precisión de la densidad de energía oscura en la época donde el modelo estándar de la cosmología predice que la densidad de energía oscura oscila entre el 5 % y el 10 % de la densidad de energía del universo. El sondeo realizado por DESI terminará el próximo año y servirá para futuras encuestas, como las del observatorio Vera C. Rubin LSST o el telescopio espacial Nancy Grace Roman (su lanzamiento está planeado en 2027), y preparará el camino para una segunda parte del proyecto, DESI-II, que comprende el periodo de 2025 a 2031.

El objetivo científico de DESI-II es adentrarse en la época del universo cuando dominaba la materia, cuando la expansión estaba desacelerada.

Finalmente, DESI-II es un paso anterior a las encuestas espectroscópicas de generación 5, que iniciarán en 2030 y tienen una mejora entre 3 y 4 veces en acotar las propiedades de la energía oscura (Asai, Shoji, et al., 2024).

Los mapas de galaxias futuros prometen incluir en su estudio otras áreas de la astrofísica, como la inflación cósmica, los neutrinos con masa y la materia oscura con una mayor precisión. La siguiente década se pondrán en marcha estas nuevas encuestas que profundizarán en esa época del universo, al mismo tiempo que permitirán mejoras de un orden de magnitud en la comprensión de la física inflacionaria y de las partículas ligeras creadas en el universo temprano.

La aventura de construir el mapa más grande del universo permite extraer conclusiones acerca de la rapidez de expansión hoy en día, así como sobre la cantidad de energía que hay en el espacio. Dicho de otro modo, para ver el efecto de la energía oscura tenemos que ver el pasado, y para eso se observan las galaxias cercanas y distantes. Y aunque no hay una máquina del tiempo, el viaje existe. Y solo es el comienzo.

REFERENCIAS

- DESI collaboration a (2024). DESI 2024 III: Baryon Acoustic Oscillations from Galaxies and Quasars. arXiv preprint arXiv 2404.03000.
- DESI collaboration b (2024). DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurement of Baryon Acoustic Oscillations. arXiv preprint arXiv 2404.03002.
- Asai S et al. (2024). Exploring the Quantum Universe: Pathways to Innovation and Discovery in Particle Physics. *Report of the 2023 Particle Physics Project Prioritization Panel (P5)*. arXiv preprint arXiv:2407.19176.
- Miller TN et al. (2018). Fabrication of the DESI corrector lenses. In *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*, Vol. 10706, pp. 256-264). SPIE.
- Canal CONAHCyT México (2024). Observaciones DESI 2024: energía oscura y el futuro del universo. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=jlkMF4Q1Xsk>.
- Dark Energy Spectroscopic Survey (2018). El sondeo DESI. Recuperado de: <https://www.desi.lbl.gov/es/the-desi-survey-spanish/>.

Dante Virgilio Gomez Navarro
Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería
Campus Palenque
Instituto Politécnico Nacional
dgomez@ipn.mx

¿Qué son los cubits transmon?

Giselle N. Morales Rosales
Manuel Ávila Aoki

La computación cuántica es una revolución para la computación porque provee una forma diferente de procesar la información utilizando los principios de la mecánica cuántica. A pesar de ser una tecnología relativamente nueva, avanza rápidamente (Reck y Basak, 2022). Las computadoras cuánticas ofrecen la posibilidad de realizar ciertas tareas computacionales de manera exponencialmente más rápida que las computadoras clásicas (Wang *et al.*, 2022).

Las computadoras clásicas funcionan mediante electricidad y su unidad básica de información es el bit, que puede tomar dos valores: 0 o 1 (Arriola, 2004). Los transistores actúan como interruptores controlados electrónicamente que pueden encenderse o apagarse. Cuando un transistor está encendido, deja pasar el flujo de corriente eléctrica, representando el valor lógico 1. Por otro lado, cuando el transistor está apagado, bloquea el flujo de corriente y eso representa el valor lógico 0.

Los videos, las imágenes y todo lo que se ve en una pantalla de una computadora está generado por estos bits, que no son más que combinaciones de unos y ceros. Sin embargo, se está llegando a un límite (Reck y Basak, 2022) tanto en el *hardware*, debido a las restricciones físicas de la miniaturización de los transistores, como en el *software*, en términos de procesamiento y velocidad de la información. Además, existen problemas difíciles de resolver para una computadora clásica, como la



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.

factorización de grandes números enteros en sus factores primos (que es la base de la mayoría de los sistemas criptográficos actuales), la resolución de sistemas de ecuaciones lineales, la búsqueda en bases de datos desordenadas, entre otras aplicaciones (Ezraty, 2023). La computación cuántica ofrece una posible solución a estos problemas.

Pero, ¿cómo funciona una computadora cuántica? Esta utiliza bits cuánticos, también llamados qubits, que a diferencia de los bits clásicos pueden estar en un estado cuántico de superposición. Es decir, un qubit puede estar en los estados base $|0\rangle$ o $|1\rangle$ o en una combinación de estos estados de forma simultánea, con diferentes pesos estadísticos. La cantidad de estados base dependerá del número de qubits (n) que conformen el sistema cuántico; para determinarlos, se utiliza 2^n . Por ejemplo, para el caso de 2 qubits, es $2^2 = 4$, por lo que sus estados base son $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ y $|11\rangle$.

Para entender mejor la diferencia entre un bit y un qubit, se puede hacer una analogía: imagine que está con los ojos vendados y tiene una moneda en la mano. La moneda puede estar en uno de dos estados: cara (1) o cruz (0). En este caso, la moneda actúa como un bit clásico.

Ahora, imagine que tiene una moneda especial, una moneda cuántica. Esta moneda tiene una característica única: mientras la sostiene en la mano,

puede estar en un estado de cara ($|1\rangle$) y de cruz ($|0\rangle$) al mismo tiempo, es decir, puede estar en superposición. ¿Cómo es esto posible? Imagine que la moneda gira sobre su propio eje y en cualquier momento no solo puede tomar el valor de cara o cruz, sino que también puede tener un pequeño porcentaje de cara y el resto de porcentaje de cruz, o al revés, o ambos estados pueden estar en 50 % y 50 %. Así, se tienen infinitos estados posibles. El estado de superposición para un qubit se representa por:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (1)$$

donde los coeficientes α y β son números complejos.

Únicamente si se retira la venda de los ojos y se observa la moneda cuántica, esta colapsará de esa combinación de estados a uno de los dos estados posibles, al igual que cuando se mide un qubit en un sistema cuántico, para lo cual se tendrá una probabilidad de $|\alpha|^2$ de que se encuentre en el estado $|0\rangle$ y una probabilidad $|\beta|^2$ de que este en el estado $|1\rangle$. De manera que, de acuerdo con la conservación de la probabilidad:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \quad (2)$$

Esto significa que la suma de las probabilidades de todos los posibles resultados siempre debe de ser uno, para garantizar que la probabilidad total esté correctamente distribuida.

La capacidad de superposición es lo que hace que los qubits sean poderosos en la computación cuántica, ya que permite realizar múltiples cálculos al mismo tiempo.

Los algoritmos cuánticos, que son un conjunto de instrucciones diseñado para realizar los cálculos en una computadora cuántica, se construyen a partir de una combinación específica y ordenada de compuertas cuánticas.

Una compuerta cuántica es un bloque fundamental de construcción utilizado para manipular la información almacenada en los qubits. Sin embargo, los qubits cuentan con fuentes naturales de ruido y disipación que pueden ocasionar errores en las compuertas (Martinis, 2022).

Además, cuando un cubit interactúa con su entorno se produce el llamado ruido cuántico, y esta fluctuación en la cantidad de energía puede modificar el estado cuántico del cubit. Esto es muy importante, porque la lectura rápida y precisa del estado del cubit es fundamental para la comunicación y la computación cuántica (Chen *et al.*, 2023).

CUBITS CON UNIONES JOSEPHSON

Para representar los estados de los cubits se necesita una implementación física. En la analogía de la moneda, la moneda cuántica sería el objeto físico que representa los estados de un cubit.

Una opción es usar sistemas cuánticos, como los átomos o iones individuales. No obstante, estos sistemas microscópicos tienen parámetros predefinidos por la naturaleza y pueden ser difíciles de controlar (Arriola, 2004). Además, en la naturaleza solo se encuentran unos pocos sistemas con dos niveles, como los sistemas de espín $-1/2$, que describen partículas con un momento angular intrínseco que puede tomar dos valores (Houck *et al.*, 2009). Los sistemas con dos niveles son cruciales en la computación cuántica debido a que el espín de cada nivel codifica un $|0\rangle$ y un $|1\rangle$ respectivamente, que son el pilar fundamental de la computación cuántica. Dichos estados se escriben en forma matemática de acuerdo con la ecuación 1. Por esta razón, algunos equipos de investigación optaron por circuitos que pueden ser fabricados en un chip. Además de ser relativamente fáciles de fabricar, estos circuitos eléctricos permiten diseñar los parámetros de los cubits y, en ocasiones, también ajustarlos directamente durante el experimento (Bader, 2013) lo cual es una gran ventaja. A estos circuitos a veces se les llama átomos artificiales, y sus dimensiones suelen estar en el rango de 300 a 500 micrómetros (Wang *et al.*, 2022). Otro aspecto importante es que utilizan la coherencia cuántica (capacidad de un sistema cuántico para mantener su comportamiento ondulatorio y su superposición de estados) del estado superconductor para minimizar la disipación (pérdida) de energía no deseada en el sistema (Houck *et al.*, 2009). Sin embargo, tienen el inconveniente



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.

de que su tiempo de coherencia es relativamente corto (Wang *et al.*, 2022).

El estado de superposición de un cubit es delicado y puede ser afectado por las pérdidas. Al fabricar los circuitos con material superconductor y operarlos a temperaturas por debajo de la temperatura crítica, se evita la disipación de energía en forma de calor. Sin embargo, para que el circuito superconductor pueda desempeñar su función como cubit, también es necesario un elemento no lineal (Bader, 2013).

La unión Josephson es el elemento que provee la no linealidad requerida para convertir un circuito superconductor en un cubit (Kockum y Nori, 2019). Los circuitos superconductores representan una de las principales vías para lograr una computadora cuántica que pueda tolerar fallos (Chen *et al.*, 2023).

Una unión Josephson puede ser integrada en los circuitos de diversas formas para crear un cubit. Por lo general, los cubits de unión Josephson tienen frecuencias de transición que van desde 1 hasta 10 gigahercios y operan a temperaturas del orden de los 10 milikelvin (Martinis, 2022).

Los circuitos superconductores que se abordarán a continuación, tienen tres elementos: capacitores, inductores y uniones Josephson.

Existen tres tipos básicos de cubits de unión Josephson: cubits de carga, cubits de flujo y cubits



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.

de fase. De manera general, el cubit de carga, también conocido como la caja de pares de Cooper, es una caja para carga controlada por un voltaje externo; el cubit de flujo, llamado también cubit de corriente persistente, es un bucle controlado por un flujo magnético externo; y el cubit de fase es una unión Josephson polarizada por una corriente (Kockum y Nori, 2019).

Los átomos artificiales (cubits de unión Josephson) se han empleado para explorar nuevos regímenes de óptica cuántica y física atómica que resultaban difíciles de alcanzar utilizando átomos naturales.

Para permitir la implementación a gran escala de estos cubits, es esencial que se conserve la coherencia cuántica durante el mayor tiempo posible (Bader, 2013).

Con el paso de los años, se han propuesto y probado muchas mejoras de los tres diseños básicos de los circuitos mencionados. Por lo tanto, se explicará el funcionamiento de un diseño actualmente popular, el cubit transmon.

CUBIT TRANSMON

El cubit transmon (abreviatura de *transmission-line shunted plasma oscillation qubit*) fue creado por Rob Schoelkopf (Ezratty, 2023). En palabras sencillas, es una versión modificada del cubit de carga.

Tiene una sensibilidad mínima al ruido $1/f$ (Houck *et al.*, 2009), también llamado ruido de baja frecuencia; es decir, tiene una sensibilidad mínima a disturbios. Se forma añadiendo otra capacitancia C_B , en paralelo con la unión Josephson, al circuito del cubit de carga (Bader, 2013). Esto aumenta la relación entre la energía de Josephson E_J y la energía de carga E_C (Hassler *et al.*, 2011) haciendo que el cubit sea menos sensible al ruido de carga.

Empleando el diseño y las fabricaciones del cubit transmon de última generación, se ha logrado obtener una vida útil de hasta 100 microsegundos (Kockum y Nori, 2019). Sin embargo, se requiere que la computación cuántica sea mucho más rápida, por lo que se esperan tiempos mucho menores de procesamiento, tales como 10^{-17} segundos. A pesar de este avance, aún no se ha logrado cumplir con

los requisitos de un sistema práctico de computación cuántica superconductor, particularmente para el umbral de errores corregibles (Wang *et al.*, 2022), es decir, el nivel máximo de error permitido en los cubits que puede ser corregido eficazmente mediante algoritmos en la computación cuántica.

Los cubits transmon presentan también algunas limitaciones, como los altos costos de implementación y su vulnerabilidad a ruidos ambientales (Hassler *et al.*, 2011) como el ruido electromagnético, las fluctuaciones térmicas o las vibraciones que provienen del entorno.

Además, se requiere que los cubits estén físicamente cerca para interactuar correctamente (Bader, 2013), ya que a medida que se aumenta el número de cubits, es difícil controlar todas las interacciones con precisión, lo que afecta al rendimiento del sistema. A pesar de estas limitaciones, se han empleado con éxito en un creciente número de experimentos y se ha demostrado una excelente correspondencia con la teoría (Houck *et al.*, 2009).

También hay desarrollos de diseño que se basan en el cubit transmon con el objetivo de expandirse a circuitos que tengan muchos cubits acoplados (Kockum y Nori, 2019). Un diseño de este tipo es el cubit xmon.

Los cubits transmon y xmon son ampliamente empleados en la computación cuántica superconductor debido a sus ventajas de buena coherencia, acoplamiento fácil y lectura, entre otros aspectos (Wang *et al.*, 2022).

La motivación más importante para mejorar el diseño del cubit ha sido extender el tiempo de coherencia del cubit, es decir, el tiempo durante el cual la coherencia cuántica del cubit se mantiene antes de perderse debido al ruido del entorno (Kockum y Nori, 2019).

CONCLUSIÓN

Los avances en la tecnología de cubits, especialmente los superconductores como los de unión Josephson, están abriendo nuevas posibilidades en el campo de la computación cuántica. Empresas como IBM y Google cuentan con grandes equipos



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.

de investigadores con el objetivo de lograr que un número significativo de cubits de unión Josephson funcionen bien juntos.

Un cubit que destaca es el cubit transmon, que ofrece un control rápido y preciso, así como una mayor resistencia al ruido de baja frecuencia. Su diseño está optimizado para reducir el impacto de las variaciones en la frecuencia de funcionamiento, lo que lo hace más estable y lo convierte en un elemento clave para el desarrollo de sistemas cuánticos.

Sin embargo, estos cubits aún enfrentan desafíos, ya que esta tecnología está en su fase inicial y requiere el perfeccionamiento de tecnologías auxiliares, como las relacionadas con la física y los semiconductores.



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.

REFERENCIAS

Arriola V (2004). *Computación cuántica*. Facultad de Ciencias, UNAM.

Bader S (2013). *The transmon qubit*. Massachusetts Institute of Technology.

Chen L, Li HX, Lu Y et al. (2023). Transmon qubit readout fidelity at the threshold for quantum error correction without a quantum-limited amplifier. *npj Quantum Information* 9(1):26.

Ezratty O (2023). Perspective on superconducting qubit quantum computing. *The European Physical Journal A* 59(5):94.

Hassler F, Akhmerov A and Beenakker C (2011). The top-transmon: a hybrid superconducting qubit for parity-protected quantum computation. *New Journal of Physics* 13(9):095004.

Houck A, Koch J, Devoret M, Girvin S and Schoelkopf R (2009). Life after charge noise: recent results with transmon qubits. *Quantum Information Processing* 8:105-115.

Kockum A and Nori F (2019). Quantum Bits with Josephson Junctions. In: Tafuri, F. (Ed.), *Fundamentals and Frontiers of the Josephson Effect* (pp. 703-741). Cham: Springer International Publishing.

Martinis J (2022). Surface loss calculations and design of a superconducting transmon qubit with tapered wiring. *npj Quantum Information* 8(1):26.

Reck E and Basak S (2022). Quantum Computer Music: Foundations and Initial Experiments. In: Miranda, E.R. (Ed.), *Quantum Computer Music* (pp. 43-67). Springer.

Wang C, Li X, Xu H et al. (2022). Towards practical quantum computers: Transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds. *npj Quantum Information* 8(1):3.

Giselle N. Morales Rosales

giselle.mora17@gmail.com

Manuel Ávila Aoki

Centro Universitario UAEM Valle de Chalco

Universidad Autónoma del Estado de México

Crónicas visuales: la fotografía callejera de Enrique Soto

Irene **Sepúlveda**



© Enrique Soto. Autorretrato, ca. 1972.

Enrique Soto, fotógrafo originario de Puebla, México, ha construido una trayectoria en la que explora las diversas facetas de la vida cotidiana y la riqueza cultural no solo de su entorno cercano, sino también de geografías distantes.

A través de su lente, Soto ha sabido captar la sustancia de los paisajes y personajes que encuentra en sus caminos de andarín irredento, logrando un estilo distintivo que mezcla la sensibilidad por la luz natural y la composición con una profunda conexión con sus sujetos.

Su trabajo, además de ser visualmente impactante, transmite la identidad humana de manera auténtica, mostrando desde la arquitectura y los mercados locales hasta el trabajo, la espiritualidad, las tradiciones y el arte popular de sus habitantes.

Las fotografías de Enrique Soto invitan a quienes las observan a sumergirse en una esencia llena de significados profundamente humanos.



La fotografía callejera documental tiene sus raíces en el auge de la fotografía portátil a principios del siglo XX, cuando cámaras relativamente ligeras permitieron a los fotógrafos capturar momentos espontáneos en las calles sin interferir en la vida cotidiana de sus sujetos. Henri Cartier-Bresson, considerado uno de los pioneros del género, desarrolló la noción de “momento decisivo”, concepto que se refiere ese instante fugaz en el que todos los elementos visuales de una escena –composición, luz, expresión y movimiento– convergen de manera perfecta para crear una imagen con un máximo significado expresivo. Fotógrafos como Walker Evans y Dorothea Lange consolidaron la fotografía callejera como un vehículo para la crítica y la reflexión social. En México, Manuel Álvarez Bravo, Nacho López y Héctor García llevaron esta práctica a nuevas dimensiones, capturando con gran sensibilidad escenas de la vida cotidiana en el México de mediados del siglo XX. Álvarez Bravo, con un enfoque poético y simbólico, destacó la belleza en lo ordinario y añadió una profundidad surrealista que revelaba tanto la identidad cultural como las tensiones y contrastes de la sociedad mexicana. Los tres lograron consolidar la fotografía documental como un recurso para explorar la identidad cultural y la realidad social de México, porque este estilo de fotografía no solo muestra el entorno físico, sino que también revela las interacciones humanas, la relación de las personas con el espacio público y las dinámicas socioculturales propias de la realidad circundante.





El streaming de música y su impacto ambiental

Darío Sebastián **Pavón Díaz**

En la actualidad, tenemos cada vez más presente el daño que nuestras actividades cotidianas generan a la naturaleza. Cuando compramos comida con empaques de plástico sabemos que estos terminarán siendo desechados y contribuirán a la contaminación de los suelos; o cuando dejamos una llave del agua abierta, lamentamos desperdiciar ese valioso recurso. Sin embargo, los diversos daños que provocamos no siempre son tan evidentes.

Si eres una de las personas que aún compra discos en tiendas, tal vez no te sea tan difícil imaginar que para producir el disco y su empaque se necesitan recursos como el plástico; que la maquinaria que los produce necesita energía eléctrica; que su transporte de la fábrica a la tienda requiere de combustibles; que, como el disco que compraste, hay millones esperando a ser comprados y que cuando estos ya no sean útiles, serán desechados. Tener un objeto físico como un CD, nos permite imaginar estos procesos y el ciclo de vida que tendrá el producto, pero, ¿qué pasa cuando no tenemos un objeto físico como un disco?

EL STREAMING DE MÚSICA

El *streaming* de música es un servicio digital relativamente nuevo que se hizo popular hace apenas una década, pero su adopción fue tan rápida que, actualmente, es la manera más común de escuchar música.

Estoy hablando de los servicios de plataformas como Spotify o Apple Music. El *streaming* hace el consumo de música más fácil para todos: es accesible, pues es posible escuchar música gratis con anuncios; nos da opciones que parecen infinitas, las canciones que amamos y millones más que no conocemos, pero que están listas para ser escuchadas en cualquier momento sin tener que pagar por cada una de ellas; son fáciles de usar, solo necesitamos los dispositivos que usamos día a día como el teléfono celular, la computadora o la televisión. Estas razones dejan claro por qué el *streaming* se convirtió tan rápidamente en la principal forma de escuchar música (Wikström, 2020).

El *streaming* no solo es extraordinario para nosotros como consumidores, sino también para la industria de la música. Las ganancias del mercado de la música grabada, antes de que el *streaming* alcanzara popularidad, se encontraban disminuyendo año con año por casi dos décadas (Richter, 2023); debido a la digitalización de los medios, descargar música de manera ilegal era sencillo y, en consecuencia, pocas personas decidían gastar en música. Las ganancias de la industria eran menores cada año debido a la piratería, pero eso no significaba que el consumo de música hubiera disminuido. El *streaming* mostró ser la solución perfecta para que la industria se adaptara y la piratería disminuyera de manera substancial. El *streaming* representó el 80 % de las ganancias de la industria en 2022; esto significó que la industria de la música tuvo sus mayores ganancias desde el año 2000 (International Federation of the Phonographic Industry, 2024).

¿CÓMO FUNCIONA EL STREAMING DE MÚSICA?

Al escuchar música en *streaming* no tenemos un disco que tenga las canciones, pero estas deben de estar físicamente en algún lugar para que las podamos escuchar. Las canciones se encuentran almacenadas en servidores, y al ser millones y millones en diferentes calidades y formatos, son muchos servidores los que se necesitan para almacenarlas.

A esos conjuntos de servidores se les llama centros de datos (Sampedro *et al.*, 2021).

Los centros de datos se utilizan para muchísimas cosas, no solo para el *streaming*. Si lo puedes encontrar en Internet, se encuentra almacenado en un centro de datos: desde algo muy personal, como los archivos que guardamos en Google Drive o nuestros mensajes de WhatsApp, hasta los estados de cuenta de los usuarios de un banco. El internet en su conjunto está a nuestro alcance a cualquier hora del día, todos los días; no obstante, para que esto sea posible, los centros de datos necesitan estar operando continuamente.

Hacer que los centros de datos operen sin parar no es una tarea fácil; además de la gran cantidad de energía que esto requiere, también se debe asegurar que ningún error pause sus operaciones. Cuando una computadora se utiliza por largos periodos, se calienta y empieza a operar de manera más lenta. Lo mismo sucede con los centros de datos. Los servicios digitales no pueden permitir que sus sitios no estén en línea, por lo tanto, los centros de datos tienen un sistema de enfriamiento activo para mantener los servidores a una temperatura ideal que reduzca al mínimo las posibilidades de un mal funcionamiento. (Valancius *et al.*, 2009).

Existen centros de datos de diferentes tipos; algunos son construidos por la misma empresa u organización que hará uso del centro de datos. Otras empresas, en lugar de invertir en su centro de datos propio, contratan el servicio de espacio en centros de datos de terceros. Por ejemplo, la plataforma líder en *streaming* de música, Spotify, solía tener su propio centro de datos; sin embargo, como el catálogo de canciones y el número de usuarios de la plataforma aumentaba constantemente, dejaron de utilizar su propio centro de datos y contrataron a Google Cloud para que se hiciera cargo de ello. Esto resultó más eficiente para Spotify, ya que ellos no son expertos en infraestructura tecnológica; así evitan usar sus recursos en solucionar problemas que pudieran surgir en el centro de datos. Google Cloud es una red de centros de datos de gran escala que, gracias a su enorme magnitud, puede prestar sus servicios a otras empresas; se le llama centro de datos en la nube, ya

que la compañía contratante no tiene el control del centro de datos. La gran mayoría de los servicios de *streaming* operan con centros de datos en la nube o centros de datos de gran escala (Zhang, 2022).

La explicación anterior aclara dónde se encuentran las canciones que escuchamos al utilizar las plataformas de *streaming*, pero también hay que explicar cómo acceder a ellas. Esto es posible gracias a redes que nos permiten contactar con los servidores, pidiendo una canción y que, a su vez, los servidores nos manden de regreso lo solicitado. A estas redes se les conoce como redes de transmisión de datos.

EL STREAMING Y EL AMBIENTE

Puede que para muchos no tenga sentido la idea de que el *streaming* dañe la naturaleza, ya que para su uso no se producen discos y empaques, ni hay nada que deba distribuirse en las tiendas de música, ni los consumidores deben transportarse a las tiendas para comprarlos, y obviamente no habrá ningún disco desechado cuando ya no sea útil. Entonces ¿cómo es que el escuchar música en *streaming* daña al ambiente?

Los centros de datos en su totalidad son responsables del 1 % de uso de electricidad a nivel mundial, y se estima que, debido al gran aumento del tráfico en Internet, para 2030 el consumo aumentará al 6 %, pero una buena noticia es que algunos de los centros de datos utilizados para el *streaming* tienen bajas emisiones de carbono y muchos otros están empezando a utilizar energías limpias para su uso (Dinesh *et al.*, 2017).

En el caso de las redes de transmisión, su impacto en el ambiente depende de cuántos datos sean transmitidos: se estima que un gigabyte de consumo de datos equivale en promedio a 3 kilogramos de dióxido de carbono emitidos al ambiente (Psyched, 2020). Las redes de transmisión de datos tienen mayor impacto ambiental que los centros de datos; esto se debe a que es más difícil operar las redes de transmisión con energías limpias. Además, el gran aumento de tráfico en Internet, aunado al número creciente de los usuarios digitales, tiene un mayor impacto en las redes de transmisión (Kamiya, 2020).

Un efecto de la digitalización de servicios del que casi no se habla, cuando se hace un análisis de impacto ambiental, es el llamado efecto de rebote. En el caso del *streaming* de música, el efecto rebote quiere decir que, a pesar de que la desmaterialización de música (en el paso del formato físico al formato digital) implique un menor impacto ambiental, el aumento en la demanda del producto debido a su accesibilidad puede contrarrestar la disminución inicial del impacto ambiental e incluso aumentarlo (Shove, 2018).

Es importante tener en cuenta que existen otros factores que influyen en el impacto ambiental de las plataformas de *streaming*, como son los dispositivos de reproducción necesarios para escuchar la música digital (teléfonos inteligentes, tabletas, computadoras, televisiones, etcétera); además de otros dispositivos que no son estrictamente necesarios para la reproducción de música digital, pero que complementan la experiencia: audífonos, bocinas, barras de sonido, etcétera.

CONCLUSIÓN

Como usuarios de un bien o de un servicio, es muy importante indagar las consecuencias de su consumo, y en un contexto de crisis ambiental, poner especial atención en cómo nuestro consumo afecta al ambiente. El impacto ambiental de la música, y en especial el de la música digital, no es universalmente conocido. Esto es un problema debido a la gran cantidad de nuevos usuarios de las plataformas de *streaming* de música: en 2022 se registraron 589 millones de usuarios de paga a nivel mundial. El *streaming* es el principal modo de consumo de música, pero en Latinoamérica representa alrededor del 85 % de las ganancias de la industria de la música grabada, en comparación con las ganancias de la misma industria a nivel mundial, donde 67 % proviene del *streaming* (International Federation of the Phonographic Industry, 2024).

Las plataformas de *streaming* siguen creciendo y no se espera que su uso disminuya en el futuro cercano. Entonces, ¿qué podemos hacer para disminuir su



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2012.



© Enrique Soto. *Angelitos*, Guatemala, 2005.

impacto ambiental? No es esperable que una vez que las personas tomen conciencia de los efectos que las plataformas de *streaming* de música tienen en el medio ambiente las dejen de utilizar, además de que regresar a consumir música en formato físico resultaría en un impacto ambiental mucho mayor. Una solución podría ser disminuir la energía que requiere el uso del *streaming* descargando las canciones en nuestros dispositivos, lo que permite escuchar música en cualquier momento sin necesidad de estar conectado a los centros de datos ni a las redes de transmisión de Internet una vez que la canción ha sido descargada. Usar las plataformas de *streaming* es de suma importancia para los amantes de la música, pero escuchar música no debería implicar una afectación al medio ambiente, por lo que siempre hay que tener en cuenta los efectos de su uso.

REFERENCIAS

Dinesh V, Setz B, Rao G, Gangadharan G and Aiello M (2017). Metrics for Sustainable Data Centers. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2(3):290-303).

International Federation of the Phonographic Industry (2024). Global Music Report 2024. Recuperado de <https://www.ifpi.org/resources>.

Kamiya G (2020). The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines. International Energy Agency. Recuperado de: <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines>.

Pscheid J (2020). Does Irresponsible Web Development Contribute to Global Warming? Recuperado de <https://www.emergeagency.com/insights/detail/does-irresponsible-web-development-contribute-to-global-warming>.

Richter F (2023). *Charted: The impact of streaming on the music industry*. Recuperado de <https://www.weforum.org/agenda/2023/03/charted-the-impact-of-streaming-on-the-music-industry>.

Sampedro C, Machuca S, Palma D y Villalta B (2021). Impacto ambiental por consumo de energía eléctrica en los Data Centers. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores* 8(número especial): artículo 34.

Shove E (2018). What is wrong with energy efficiency? *Building Research & Information* 48(7):779-789).

Valancius V, Laoutaris N, Massoulié L, Diot C and Rodriguez P (2009). Greening the Internet with Nano Data Centers. *CoNEXT'09 Proceedings of the 2009 ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*: 37-48.

Wikström P (2020). *The Music Industry: Music in the Cloud*. John Wiley & Sons.

Zhang Y and Zhang M (2022). The effect of quality of service experience on consumers' loyalty to music streaming services: Time pressure as a moderator. *Frontiers in Psychology* 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1014199>.

Darío Sebastián Pavón Díaz
Universidad Veracruzana
Maestría en Economía Ambiental y Ecológica
dariospavon@outlook.com

Redes farmacológicas: innovación en la búsqueda de terapias naturales

Fernando Martínez Esquivias
Juan Manuel Guzmán Flores

En la actualidad, la búsqueda de terapias efectivas y seguras sigue siendo una prioridad en el tratamiento de las enfermedades. Las plantas medicinales han sido desde la Antigüedad una fuente inagotable de compuestos con propiedades terapéuticas. La investigación científica ha confirmado el valor terapéutico de numerosas plantas y se ha logrado identificar una gran cantidad de compuestos bioactivos presentes en hojas, flores, raíces y frutos. Compuestos como alcaloides, flavonoides, terpenoides y fenoles, son algunos de los componentes naturales más estudiados por sus propiedades medicinales; estos compuestos tienen la capacidad de modular objetivos celulares implicados en las enfermedades (Noor *et al.*, 2022).

La búsqueda de objetivos terapéuticos a partir de compuestos bioactivos naturales se ha convertido en un tema trascendental dentro de la investigación biomédica para la generación de terapias innovadoras. Las redes farmacológicas son una disciplina en crecimiento que se ha convertido en un enfoque integrador basado en el análisis *in-silico* que nos ayuda a comprender mejor los mecanismos subyacentes a las enfermedades y los efectos que los compuestos naturales podrían lograr en el organismo (Li *et al.*, 2023). En este artículo, abordaremos los siguientes cuestionamientos: ¿Qué es una red farmacológica y cómo se construye? ¿Cuáles son sus aplicaciones en la

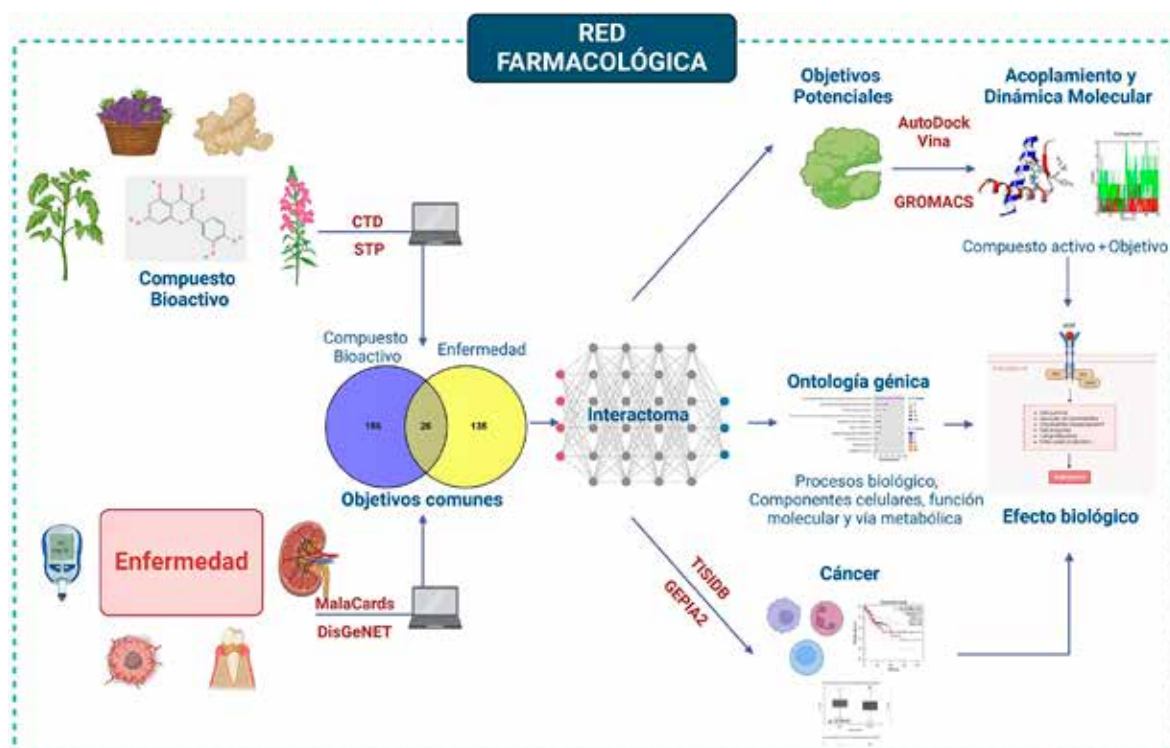


Figura 1. Construcción de redes farmacológicas. En primera instancia se realiza la selección de objetivos terapéuticos y compuestos bioactivos. Posteriormente, se realiza un cribado de objetivos comunes y se construye la red de interacción proteína-proteína (interactoma). Los datos se analizan en bases informáticas para conocer los procesos biológicos, componentes celulares, función molecular y vías metabólicas (ontología génica) en los que puede estar involucrado el compuesto bioactivo estudiado. Por último, se predice el grado de interacción y la estabilidad de los compuestos con las dianas terapéuticas.

investigación biomédica? ¿Cuáles son los desafíos y el futuro de las redes farmacológicas?

¿QUÉ ES UNA RED FARMACOLÓGICA?

Una red farmacológica es una representación basada en estudios computacionales de las interacciones de componentes bioactivos con sus objetivos biológicos (proteínas, genes o metabolitos), así como de los efectos de estas interacciones en los procesos biológicos y fisiológicos del organismo. Las interacciones previstas pueden ser directas, como la unión de un componente natural a una diana terapéutica, o indirectas, como la modulación de vías de señalización celular, metabólicas o de expresión génica (Li *et al.*, 2023).

El primer paso para la generación de una red farmacológica que nos ayude a establecer el efecto de un componente natural sobre una enfermedad

específica, consiste en la búsqueda de información acerca de los objetivos involucrados en una enfermedad de interés; esta información es obtenida a través de bases de datos públicas como MalaCards y DisGeNET. Del mismo modo, obtenemos los objetivos potenciales del compuesto estudiado usando las bases de datos Swiss Target Prediction (STP) y Comparative Toxicogenomics Databases (CTD), por mencionar algunas. Una vez obtenida la información, realizamos un cribado para encontrar los objetivos comunes entre la enfermedad y el compuesto natural (Guzmán-Flores *et al.*, 2023; Martínez-Esquivias *et al.*, 2023).

Posteriormente, los objetivos comunes son ingresados en bases de datos como STRING, para generar una red de interacción proteína-proteína. Esta red nos permitirá obtener los objetivos más importantes que serán analizados en bases de datos como DAVID o ShinyGO.

La información obtenida de estas bases de datos nos ayudará a vincular el efecto que podría tener

el compuesto sobre los componentes celulares, procesos biológicos, funciones moleculares o vías metabólicas, y relacionar esta información con el beneficio que podría tener sobre la salud.

Además, cuando estudiamos enfermedades como el cáncer, podemos predecir el impacto que tienen los objetivos sobre la infiltración de células inmunitarias, expresión génica y curvas de sobrevivencia en las bases de datos TISIDB y Gene Expression Profiling Interactive Analysis (GEPIA2).

Finalmente, los objetivos comunes son estudiados por acoplamiento y dinámica molecular usando los programas computacionales AutoDock Vina y Gromacs, para conocer el grado de interacción y la estabilidad que tienen los compuestos naturales sobre los objetivos encontrados, y con los hallazgos, proponer el posible efecto terapéutico (Martínez-Esquivias *et al.*, 2023).

La Figura 1 muestra la metodología general para la construcción de redes farmacológicas.

APLICACIONES EN LA INVESTIGACIÓN BIOMÉDICA

Las redes farmacológicas han transformado el descubrimiento de componentes con propiedades medicinales. Permiten analizar grandes volúmenes de datos biológicos para identificar dianas terapéuticas, predecir interacciones y evaluar su eficacia terapéutica. Nos ayudan también a reducir costos al optimizar procesos y a prevenir eventos tóxicos. Esto puede facilitar los avances en medicina personalizada y mejorar los estudios de farmacocinética y farmacodinamia (Vora *et al.*, 2023).

Además, las redes farmacológicas no solo facilitan a los investigadores la búsqueda de compuestos naturales con potenciales efectos terapéuticos, sino también desempeñan un papel crucial en la optimización de fármacos existentes, ya que nos permiten entender mejor las complejas interacciones entre los medicamentos y los sistemas biológicos.

Por otro lado, permiten el reposicionamiento de fármacos, ayudando a descubrir nuevas aplicaciones terapéuticas para medicamentos aprobados (Zhang *et al.*, 2024).



© Enrique Soto. *Los colgados*, Puebla, 2007.

DESAFÍOS Y FUTURO DE LAS REDES FARMACOLÓGICAS

Si bien las redes farmacológicas tienen muchas ventajas, también enfrentan varios desafíos. Los análisis dependen en gran medida de modelos *in-silico*, lo que conlleva el riesgo de sobreinterpretar los datos computacionales si no se llega a una validación experimental. Además, la integración de datos de diferentes bases informáticas presenta desafíos en la estandarización y reproducibilidad que complican en gran medida la interpretación del resultado y la presentación de las interacciones farmacológicas (Zhang *et al.*, 2024).

Finalmente, la dependencia de herramientas computacionales podría reducir la participación crítica de los investigadores en la interpretación de los resultados, lo que puede llevar a decisiones terapéuticas apresuradas sin tener una comprensión profunda del contexto clínico (Ivanisevic y Sewduth, 2023).

Sin embargo, a medida que avance la investigación en este campo, se espera que las redes farmacológicas sean cada vez más útiles en el desarrollo de nuevos tratamientos. Con el desarrollo de nuevas técnicas computacionales y la integración de datos **ómicos** (del conocimiento del genoma [genes], proteínoma [proteínas] y metaboloma [metabolitos]),



© Enrique Soto. *Vendedor de Barbys*, Tabasco, 2014.

las redes farmacológicas están ayudando a mejorar la comprensión del efecto terapéutico que ejercen los compuestos naturales y cómo pueden usarse para mejorar la salud humana (Ivanisevic y Sewduth, 2023).

A medida que avancemos en la investigación biomédica, las redes farmacológicas desempeñarán también un papel cada vez más importante en el descubrimiento de nuevos agentes terapéuticos.

REFERENCIAS

- Guzmán-Flores JM, Pérez-Vázquez V, Martínez-Esquivias F, Isirdia-Espinoza MA and Viveros-Paredes JM (2023). Molecular Docking Integrated with Network Pharmacology Explores the Therapeutic Mechanism of Cannabis sativa against Type 2 Diabetes. *Current Issues in Molecular Biology* 45(9): Article 9. <https://doi.org/10.3390/cimb45090457>.
- Ivanisevic T and Sewduth RN (2023). Multi-Omics Integration for the Design of Novel Therapies and the Identification of Novel Biomarkers. *Proteomes* 11(4): Article 4. <https://doi.org/10.3390/proteomes11040034>.
- Li L, Yang L, Yang L, He C, He Y, Chen L, Dong Q, Zhang H, Chen S and Li P (2023). Network pharmacology: A bright guiding light on the way to

explore the personalized precise medication of traditional Chinese medicine. *Chinese Medicine* 18(1):146. <https://doi.org/10.1186/s13020-023-00853-2>.

Martínez-Esquivias F, Guzmán-Flores JM, Chávez-Díaz IF, Iñiguez-Muñoz LE and Reyes-Chaparro A (2023). Pharmacological network study on the effect of 6-gingerol on cervical cancer using computerized databases. *Journal of Biomolecular Structure & Dynamics* 1-12. <https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2264943>.

Noor F, Tahir UI Qamar M, Ashfaq UA, Albutti A, Alwashmi ASS and Aljasir MA (2022). Network Pharmacology Approach for Medicinal Plants: Review and Assessment. *Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)* 15(5):572. <https://doi.org/10.3390/ph15050572>.

Vora LK, Gholap AD, Jetha K, Thakur RRS, Solanki HK and Chavda VP (2023). Artificial Intelligence in Pharmaceutical Technology and Drug Delivery Design. *Pharmaceutics* 15(7):1916. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15071916>.

Zhang P, Zhang D, Zhou W, Wang L, Wang B, Zhang T and Li S (2024). Network pharmacology: Towards the artificial intelligence-based precision traditional Chinese medicine. *Briefings in Bioinformatics* 25(1): bbad518. <https://doi.org/10.1093/bib/bbad518>.

Fernando Martínez Esquivias
Juan Manuel Guzmán Flores
Centro Universitario de Los Altos
Universidad de Guadalajara
fernando.mesquivias@academicos.udg.mx

Simbiosis entre las hormigas Attini, hongos y bacterias: una perspectiva metagenómica

Esmeralda **Escobar Muciño**

La tribu de hormigas Attini incluye 12 géneros y más de 230 especies de hormigas herbívoras que cultivan hongos mutualistas como fuente de alimento (Barke *et al.*, 2010). Las especies de hormigas productoras de hongos se dividen en cinco sistemas agrícolas: cultivadora de hongos coralinos, cultivadora de hongos de levadura, cultivadora de hongos superiores, cultivadora de hongos inferiores y las que gustan de forrajear hojas. Estas últimas hormigas tienen un impacto significativo en la renovación del suelo, el reciclaje del carbono y la disponibilidad de recursos (Suen *et al.*, 2011).

Existen diferentes sistemas de castas de hormigas que forrajean hojas y cultivan hongos (*Leucoagaricus gongylophorus*). Estas castas de hormigas incluyen a las reinas reproductoras, machos reproductores alados, obreras y larvas. Mientras la reina y los machos aseguran la perpetuación de la colonia, las crías son consideradas como la “casta digestiva” de la colonia de hormigas porque poseen enzimas que degradan las hojas que sirven como sustrato del hongo.

El papel de las hormigas obreras es muy variado. Se encargan de buscar alimento, incorporar sustrato, mantener el nido, del cuidado de las crías, de la plantación de hifas fúngicas, de la limpieza de la colonia y de la producción de defensas químicas que dependen de las secreciones glandulares y las bacterias mutualistas (Aylward *et al.*, 2012; Goes *et al.*, 2020).

La principal actividad de las hormigas Attini consiste en recolectar hojas para alimentar a ciertas especies de hongos. Estos hongos actúan como un “sistema digestivo auxiliar”, encargándose de degradar polímeros que sirven de alimento a las hormigas, lo que a su vez aumenta la durabilidad del nido (Aylward *et al.*, 2012). Básicamente, los hongos convierten el material vegetal que se considera difícil de descomponer o “recalcitrante” en nutrientes ricos y disponibles para las hormigas (Barcoto *et al.*, 2020). Los linajes de hormigas que cultivan hongos y que han evolucionado de manera independiente pertenecen a los grupos *Hymenoptera*, *Formicidae* y *Myrmicinae* (Barcoto *et al.*, 2020).

Un aspecto fascinante de la interacción entre microorganismos es la relación que establecen las bacterias y los hongos en el entorno de las hormigas. Estas hormigas crean una estructura especial conocida como “jardín de hongos”, donde cultivan hongos que son esenciales para la supervivencia. En este ecosistema, las bacterias desempeñan un papel crucial al ayudar a descomponer la lignocelulosa, fijar nitrógeno y producir aminoácidos y vitaminas que benefician a las hormigas. Tal colaboración forma un “mutualismo tripartito” donde las hormigas, los hongos y las bacterias se ayudan mutuamente, lo que no solo proporciona alimento a las hormigas, sino que también produce metabolitos que actúan como defensa para la colonia (Barke *et al.*, 2010).

HERRAMIENTAS EN EL ESTUDIO DE LOS MICROORGANISMOS HALLADOS EN LAS HORMIGAS

La metagenómica, en palabras sencillas, es obtener el ácido desoxirribonucleico (ADN) de un insecto, una bacteria o un hongo sin necesidad de aislar los microorganismos en el laboratorio. El ADN de hongos y bacterias se encuentra en el cuerpo de las hormigas y puede ser obtenido a partir de un muestreo de colonias de hormigas recolectadas en campo o criadas en laboratorios. Posteriormente, se secuencian el ADN y los resultados de la secuenciación se analizan por medio de métodos bioinformáticos

para el armado o ensamble del metagenoma con el objetivo de interpretarlo. Todo, con la finalidad de dilucidar las familias de genes y proteínas funcionales que conforman el genoma de la hormiga y sus microorganismos (Figura 1A) (Barcoto *et al.*, 2020).

Además, por medio del análisis metagenómico, se puede conocer la abundancia de las familias de bacterias presentes en las hormigas, así como algunas estadísticas sobre la diversidad bacteriana basándose en la comparación de secuencias metagenómicas con bancos de datos como SILVA, que contiene una gran cantidad de secuencias del gen ribosomal del 16S rARN de microorganismos que son cultivables o no cultivables en el laboratorio (Figura 1B) (Barcoto *et al.*, 2020). El gen 16S rARN es de gran importancia, se encuentra en las bacterias y es el encargado de fabricar una molécula que forma parte de los ribosomas, que son las “fábricas” de proteínas de las células bacterianas. Al estudiar el gen 16S rARN, los científicos pueden identificar diferentes tipos de bacterias, ya que este gen es único para cada especie. Es como una huella digital de las bacterias que ayuda a entender la diversidad de la vida microbiana.

¿CUÁL ES LA FUNCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS EN LAS HORMIGAS?

Las hormigas presentan modificaciones genéticas que reflejan su dependencia obligada con un “hongo saprófito” que se alimenta de materia orgánica muerta, con la finalidad de obtener nutrientes que las hormigas no pueden producir por sí mismas. Como ejemplo, la vía de la biosíntesis de aminoácidos como la arginina y de producción de la proteína hexamerina; ambos compuestos son necesarios para la obtención de nutrientes y son probablemente obtenidos de los hongos cultivados por las hormigas (Suen *et al.*, 2011).

En general, las hormigas attinas llevan a cabo un mutualismo tripartito con el hongo *Leucoagaricus gongylophorus*, que proporciona alimento, y con bacterias como los actinomicetos, que producen una gran variedad de compuestos con propiedades antimicrobianas, como la canicidina y la dentigerumicina (Barke *et al.*, 2010).

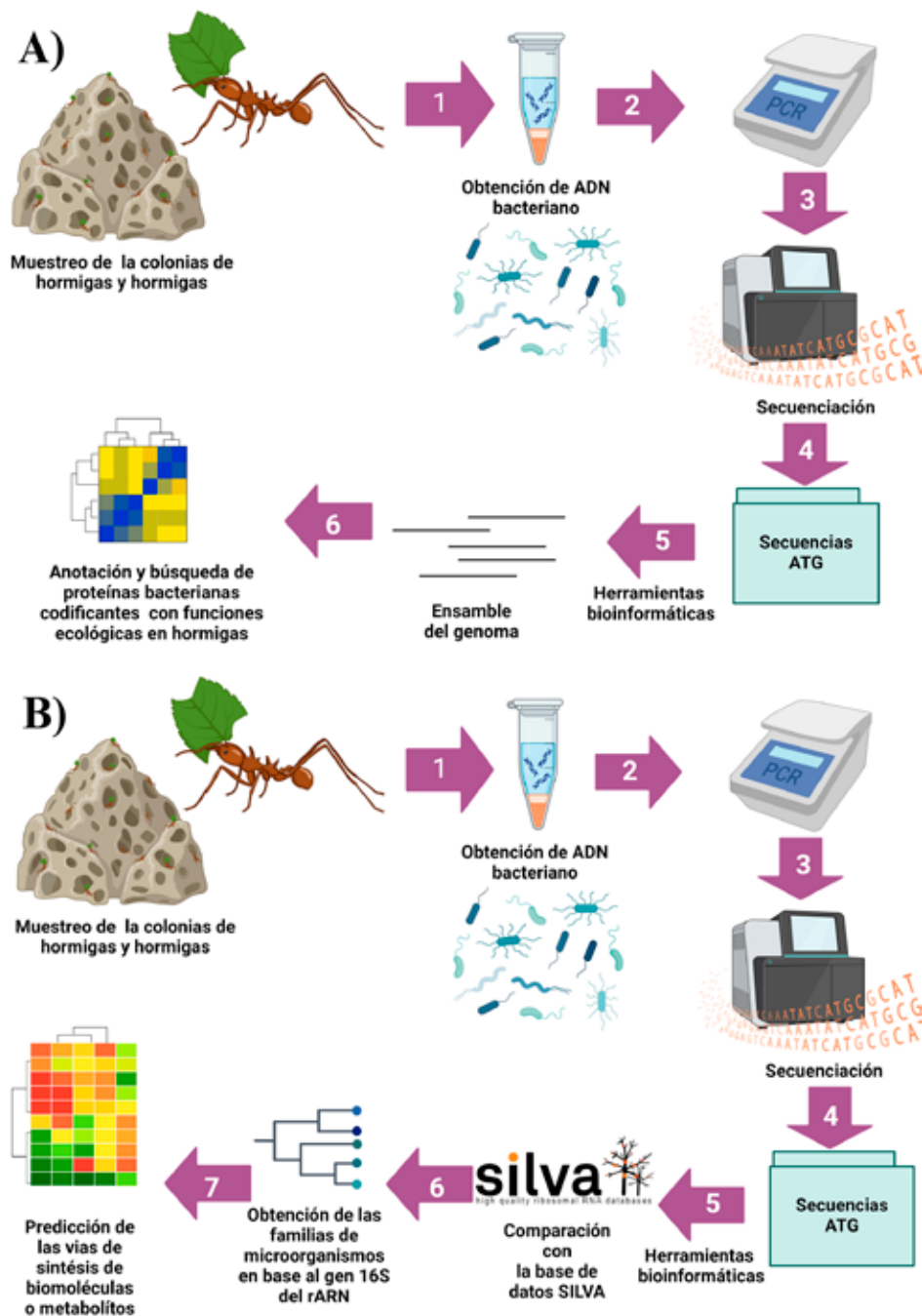


Figura 1. Técnicas metagenómicas usadas para comprender la ecología de las hormigas y bacterias simbióticas. (A) Secuenciación metagenómica de los genomas de hormigas. (B) Secuenciación del gen 16S rARN en bacterias provenientes de hormigas. Figura elaborada en BioRender bajo una licencia institucional.

Los actinomicetos se pueden encontrar en la cutícula de las hormigas y son capaces de inhibir el crecimiento de hongos patógenos de hormigas como *Escovopsis* (Worsley *et al.*, 2019; do Nascimento *et al.*, 2022). Una característica importante de las hormigas es que pueden heredar simbiontes microbianos compartiéndolos o enredándose a sus crías. Las hormigas cortadoras de hojas, así como la

microbiota intestinal y del nido, desempeñan funciones que incluyen la fijación de nitrógeno, la producción de antibióticos y enzimas degradadoras de carbohidratos, la síntesis de vitaminas y la conversión de arginina en amoníaco. Todos estos compuestos son necesarios para los procesos vitales de las hormigas

(Aylward *et al.*, 2012; Worsley *et al.*, 2019). Además, las hormigas suelen tener resistencia natural a los hongos y pueden producir compuestos antifúngicos que incluyen proteínas especializadas, venenos, fluidos corporales conocidos como hemolinfas y otros metabolitos secundarios que ayudan a combatir infecciones causadas por hongos (Kett *et al.*, 2021).

En las colonias existen mecanismos de limpieza en los que participan microorganismos que viven en el exoesqueleto de las hormigas. Por ejemplo, los actinomicetos que funcionan como una primera línea de defensa.

Además, las hormigas forrajeras tienden a rechazar ciertas plantas utilizando su memoria olfativa, que se forma por medio del aprendizaje por evitación, lo que le ayuda a identificar que no son adecuadas para cultivar su hongo simbiótico. Este mecanismo se aplica a las crías de hormiga: las adultas establecen un sistema de limpieza mediante la absorción y propagación de veneno, cuyo componente principal es el ácido fórmico. Este proceso actúa como un mecanismo de inmunidad social contra patógenos como los hongos que afectan a las hormigas, y ayuda a reducir la contaminación microbiana del material de las hojas antes de que ingresen al nido.

En resumen, se trata de un tipo de inmunidad social que se basa en mecanismos de reconocimiento químico. Así es como se crea una memoria que relaciona los daños a la colonia con señales específicas provenientes de microorganismos patógenos (Goes *et al.*, 2020). En las hormigas del género *Atta*, la secuenciación del metagenoma ha sido muy útil para predecir las proteínas codificantes que realizan diversas funciones bacterianas. Un ejemplo son las enzimas hidrolíticas conocidas como “CaZymas”, que degradan material vegetal y liberan nutrientes (Barcoto *et al.*, 2020).

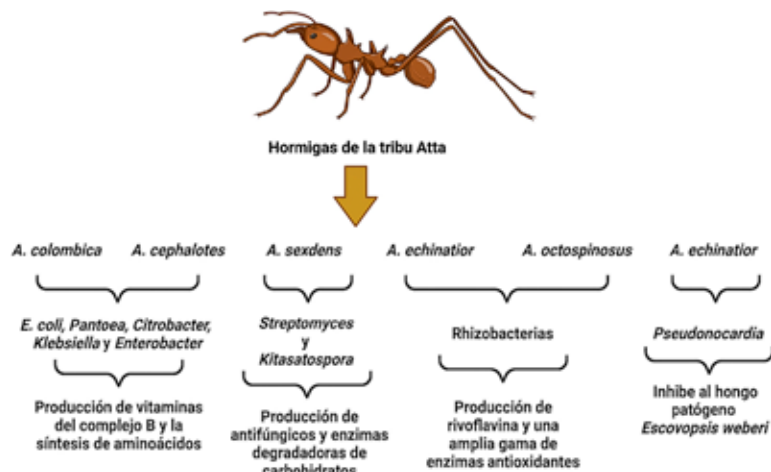


Figura 2. Simbiosis bacterianas en hormigas *Atta* y *Acromyrmex* obtenidos a partir del ensamble metagenómico, la experimentación con procesos bacterianos y la integración de herramientas de predicción (Aylward *et al.*, 2012; Worsley *et al.*, 2019; do Nascimento *et al.*, 2022; Zhukova *et al.*, 2022). Figura elaborada en BioRender bajo una licencia institucional.

También ha sido importante empalmar los datos de secuenciación y predicción con la experimentación en el laboratorio. Un ejemplo es el aislamiento de la bacteria Gram-positiva *Pseudocardia* a partir de la cutícula de la hormiga *Acromyrmex* (Worsley *et al.*, 2019).

Asimismo, en el intestino de *Acromyrmex* se han identificado microorganismos que, como los rizobios, desempeñan un papel biológico importante al proporcionar vitaminas a las hormigas. Además, se ha estudiado el uso del sistema inmunitario adaptativo de las bacterias, en particular del sistema CRISPR, que actúa como un mecanismo de defensa contra virus que afectan a los microorganismos simbióticos de las hormigas conocidos como “fagos”. Cuando las bacterias son atacadas por estos virus, pueden reconocerlo y defenderse de futuras interacciones con los fagos almacenando fragmentos de su ADN en una región especial del ADN bacteriano, que es nada menos que el sistema CRISPR. Posteriormente, se produce una proteína nombrada Cas, la cual tiene la función de cortar el ADN viral neutralizando así la amenaza y evitando el proceso infectivo (Zhukova *et al.*, 2022).

El cambio climático ha sido un factor ante el cual los simbiosis microbianos han logrado adaptarse de manera eficaz. Un ejemplo son las bacterias anhidrobióticas que viven en la cutícula de las hormigas. Estas bacterias han desarrollado mecanismos de tolerancia a la desecación que mejoran la

supervivencia de estos insectos. Estas adaptaciones también permiten a las bacterias regular la temperatura corporal de las hormigas, ayudándolas a enfrentar las condiciones de sequía (Duarte *et al.*, 2019).

La Figura 2 ilustra el papel de los microorganismos aislados de diversas partes del cuerpo de las hormigas y de los nidos de la tribu *Atta*.

INTERACCIONES ECOLÓGICAS ENTRE LAS BACTERIAS SIMBIÓTICAS Y LAS HORMIGAS

La secuenciación del metagenoma ayuda a conocer cuáles son las familias de bacterias que interactúan con las colonias de hormigas y a entender cómo funcionan las proteínas que producen estos microorganismos. Con ello se facilita entender cómo es que las bacterias y las hormigas van adaptándose mutuamente con la finalidad de preservar la supervivencia mutua, tal como se ha señalado en la interacción entre la bacteria *Rhizobium* y las hormigas (Zhukova *et al.*, 2022).

Por otro lado, importa conocer las funciones metabólicas y nutricionales de las bacterias porque las hormigas constantemente están procesando material vegetal como las hojas, que colectan para romperlas mecánicamente con sus mandíbulas, macerarlas y formar una especie de bolo alimenticio con la finalidad de construir y mantener su colonia. Al mismo tiempo, las hormigas cultivan hongos. Esto significa que impregnan o “inoculan” las masas de hojas con un hongo saprófito que llevan en su cutícula y que ha sido heredado de otras hormigas. Esta actividad es la más importante para la vida de la hormiga, ya que el hongo proporciona alimento a toda la colonia y es por ello que la hormiga cuida constantemente del hongo. Esto les permite obtener nutrientes que se hacen digeribles gracias a la acción de los hongos. También hay bacterias especializadas que viven en simbiosis con las hormigas.

Estas bacterias actúan como defensa para las hormigas al producir compuestos antifúngicos. Otra habilidad de las bacterias es que poseen un arsenal muy vasto de enzimas que degradan el material vegetal y lo convierten en azúcares digeribles, lo cual es por sí mismo un mecanismo de supervivencia. En este caso, las enterobacterias, actinobacterias y

firmicutes son los principales microorganismos responsables de estas funciones (Barcoto *et al.*, 2020).

Finalmente, los aminoácidos y vitaminas son esenciales en los insectos, ya que desempeñan funciones vitales relacionadas con el crecimiento, la reproducción y el metabolismo. Es importante conocer los principales microorganismos involucrados en los procesos de síntesis de biomoléculas. Para lograrlo, existen bacterias que dedican su existencia a suministrar estas moléculas a los insectos, ya que estos no pueden sintetizar aminoácidos y vitaminas por sí mismos. Por lo tanto, las hormigas actúan como hospedadores que proporcionan nutrientes, como fuente de carbono, y un ambiente favorable para la multiplicación de las bacterias simbióticas como las Gram-negativas (Aylward *et al.*, 2012; Zhukova *et al.*, 2022).

CONCLUSIÓN

La metagenómica ha sido una herramienta muy poderosa para determinar las familias de bacterias que interactúan con las hormigas. El uso de herramientas de predicción ha permitido a los investigadores comprender mejor las posibles funciones de los microorganismos en el ciclo de vida de las hormigas. Simultáneamente, ha sido crucial determinar los procesos bacterianos relacionados con la adquisición de nutrientes y la producción de antibióticos como línea de defensa. Esto ha marcado el inicio de la comprensión de las interacciones tripartitas entre hormigas, hongos y bacterias. Es de esperarse que, en un futuro, se investigarán estas interacciones en nuevas especies de hormigas cuya principal actividad es el forrajeo de hojas y el cultivo de hongos.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT, por otorgar la beca de estancia postdoctoral de la autora (CVU 406969).

R E F E R E N C I A S

Aylward FO, Burnum KE, Scott JJ, Suen G, Tringe SG, Adams SM, Barry KW, Nicora CD, Piehowski PD, Purvine SO, Starrett GJ, Goodwin



LA, Smith RD, Lipton MS and Currie CR (2012). Metagenomic and metaproteomic insights into bacterial communities in leaf-cutter ant fungus gardens. *The ISME Journal*, 6(9):1688-1701.

Barcoto MO, Carlos-Shanley C, Fan H, Ferro M, Nagamoto NS, Bacci M, Currie CR and Rodrigues A (2020). Fungus-growing insects host a distinctive microbiota apparently adapted to the fungiculture environment. *Scientific Reports*, 10:1-13.

Barke J, Seipke RF, Grünschow S, Heavens D, Drou N, Bibb MJ, Goss RJ, Yu DW and Hutchings MI (2010). A mixed community of actinomycetes produce multiple antibiotics for the fungus farming ant *Acromyrmex octospinosus*. *BMC Biology*, 8(1):1-10.

do Nascimento MO, Teles Tenório AC, Sarmento RA, Melo R de CC, Della Lucia TMC, Dias AK and de Souza DJ (2022). Soil actinobacteria inhibit antagonistic fungi of leafcutter ant colonies. *Journal of Basic Microbiology*, 62(1):63-73.

Duarte BF, Michelutti KB, Antonialli-Junior WF, Cardoso CAL (2019). Effect of temperature on survival and cuticular composition of three different ant species. *Journal of Thermal Biology*, 80:178-189.

Goes AC, Barcoto MO, Kooij PW, Bueno OC, Rodrigues A (2020). How do leaf-cutting ants recognize antagonistic microbes in their fungal crops? *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8:1-2.

Kett S, Pathak A, Turillazzi S, Cavaliere D, Marvasi M (2021). Antifungals, arthropods and antifungal resistance prevention: lessons from ecological

interactions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288(1944):1-7.

Suen G, Teiling C, Li L, Holt C, Abouheif E, Bornberg-Bauer E, Bouffard P, Caldera EJ, Cash E, Cavanaugh A, Denas O, Elhaik E, Favé M-J, Gadau J, Gibson JD, Graur D, Grubbs KJ, Hagen DE, Harkins TT, Helmkamp M, Hu H, Johnson BR, Kim J, Marsh SE, Moeller JA, Muñoz-Torres M C, Murphy MC, Naughton MC, Nigam S, Overson R, Rajakumar R, Reese JT, Scott JJ, Smith CR, Tao S, Tsutsui ND, Viljakainen L, Wissler L, Yandell MD, Zimmer F, Taylor J, Slater SC, Clifton SW, Warren WC (2011). The genome sequence of the leaf-cutter ant *atta cephalotes* reveals insights into its obligate symbiotic lifestyle. *PLOS Genetics*, 7(2):1-11.

Worsley S, Hutchings M, Murrell C (2019). The chemical ecology of protective microbiomes in plant roots and leafcutter ants. *Access Microbiology*, 1.

Zhukova M, Sapountzis P, Schiøtt M Boomsma JJ (2022). Phylogenomic analysis and metabolic role reconstruction of mutualistic Rhizobiales hindgut symbionts of *Acromyrmex* leaf-cutting ants. *FEMS Microbiology Ecology*, 98(9):1-13.

Esmeralda Escobar Muciño
Instituto Potosino de Investigación Científica
y Tecnológica A.C.
Postgrado en Ciencias Ambientales
esmeralda.escobar@ipicyt.edu.mx

La movilidad humana y los insectos

Alfredo **Castillo-Vera**
Enrique **Coraza de los Santos**

La movilidad ha sido una constante en la historia humana desde el período paleolítico, cuando la vida nómada era común. Esta práctica persiste en varias culturas contemporáneas, y a veces ocurre de forma voluntaria, y en otras forzada, como una condición de personas y colectivos.

Los primeros humanos se desplazaban constantemente en busca de alimento y dependían de la recolección, la caza y la pesca. Esta necesidad impulsó a las poblaciones humanas a moverse continuamente cada vez a mayores distancias, colonizando eventualmente casi todos los rincones de la Tierra. En la actualidad, todas las personas que habitan el planeta derivaron de poblaciones en movimiento.

Estudios genéticos sugieren que la humanidad se originó en África, aunque algunas teorías consideran un posible origen asiático (Bae *et al.*, 2017); por tanto, somos portadores de una mezcla de genes, resultado de mestizajes producidos por las movilidades.

Esta característica de movilidad, y la capacidad para adaptarse al entorno, han permitido la formación de culturas humanas que son resultado de una mezcla de grupos étnicos, mismas que han usado a la naturaleza en general, y a los insectos en particular, como elementos constituyentes de diversas actividades y costumbres; por ejemplo, como alimentos, motivos ornamentales, medicinas, cosméticos, artesanías, etcétera.



Figura 1. Vista dorsal de piojo adulto recolectado de la cabeza de una niña en la ciudad de Tapachula, Chiapas. Foto: Eduardo R. Chamé Vázquez.

La cultura chichimeca consideraba a la mariposa *Rothschildia orizaba* como el espíritu de las mujeres muertas en parto, que durante la noche descendían del cielo (Mac Gregor-Loaeza, 1975).

De manera similar, los mayas usaron en su calendario la figura de un escarabajo para representar un ciclo dedicado a la fertilidad y la renovación, celebrado con ceremonias rituales. Es innegable que los insectos han influido en la agricultura, la cultura y la religión, pero el trasiego de insectos por humanos ha sido escasamente analizado.

Es probable que las personas transporten insectos –de manera consciente o inconsciente– al desplazarse de un lugar a otro, llevándolos en su cuerpo o entre sus pertenencias.

Por ello, pensar en movilidades humanas no es solo considerar el movimiento como el acto material de trasladarse, sino también como el trasiego

de elementos, algunos materiales y otros simbólicos intangibles.

Los registros documentados de humanos trasladando insectos durante el movimiento de sus poblaciones son escasos y en su mayoría han recibido poca atención.

Hemos recopilado información documentada y anecdótica sobre insectos asociados a la movilidad humana, con ejemplos de casos que se describen a continuación.

PIOJOS

Los piojos son un grupo de insectos que incluye más de 3,000 especies. Estos insectos son parásitos que no poseen alas y se alimentan exclusivamente de la sangre de aves y mamíferos (Figura 1).

Los piojos son altamente específicos del hospedero, e incluso de las partes del cuerpo que parasitan. Por ejemplo, las tres especies de piojos que parasitan a humanos son específicos de la cabeza (*Pediculus humanus capitis*), el cuerpo (*Pediculus humanus humanus*) y los genitales (*Phthirus pubis*, conocida comúnmente como ladilla). El contagio por piojos en humanos ocurre por el contacto con personas infestadas, ya que estos insectos caminan para conseguir un nuevo hospedero, comportamiento que ha permitido asociarlos con patrones migratorios humanos.

Un grupo de científicos ha sugerido que la actual población de piojos que parasitan a humanos en América son resultado de una mezcla de poblaciones procedentes de nativos americanos y colonizadores europeos (Ascunce *et al.*, 2013).

Trabajos posteriores sugieren vínculos entre la diversidad genética de piojos de la cabeza y la dispersión humana alrededor del mundo (Ascunce *et al.*, 2023).

De ahí el valor de las movilidades humanas como productoras de nuevas realidades derivadas de los contactos y los aportes.

En definitiva, datos así nos muestran que nuestras sociedades actuales son resultado de la movilidad y que esta no es algo anormal, sino al contrario, una constante histórica.

COLMOYOTE O TÓRSALO

La mosca *Dermatobia hominis* es un parásito que causa miasis cutánea, una enfermedad producida por insectos que parasitan la piel de mamíferos, incluidos los humanos (Figura 2).

Esta enfermedad parasitaria prevalece naturalmente en animales silvestres, y el humano la adquiere cuando invade el ciclo silvestre de la enfermedad, es decir, cuando las personas se infectan al visitar o vivir en lugares donde la enfermedad ocurre naturalmente; en este punto, se convierte en una zoonosis (enfermedad que se transmite de un animal al ser humano).

La hembra adulta de esta mosca tiene hábitos de vida libre y deposita sus larvas sobre el abdomen de otras moscas o mosquitos que se alimentan de sangre; estos colocan la larva sobre la piel de un hospedero potencial.

La larva se introduce dentro de alguna herida, como la mordida de una mosca hematófaga o el piquete de un mosquito, y se desarrolla bajo la piel formando una lesión enrojecida con un orificio por el que sale un líquido sanguinolento.

El nombre común de esta mosca depende de la región donde se encuentre (zonas selváticas tropicales y subtropicales, desde el sur de México hasta Colombia). Una persona que visita áreas donde ocurre naturalmente este parasitismo puede regresar a su casa llevando la larva parasítica

debajo de la piel. La extraña y dolorosa experiencia finaliza con la extracción del parásito, aunque una larva muerta y no extraída puede generar complicaciones infecciosas.

El trasiego accidental de insectos por el ser humano no siempre resulta ser un condicionante directo de la distribución geográfica global de insectos, porque también hay factores determinantes como el potencial biótico (la capacidad de una población para crecer sin restricciones) y la capacidad de adaptación de las especies a condiciones ambientales.

MOSQUITO DE LA FIEBRE AMARILLA O ZANCUDO PATAS BLANCAS

Aedes aegypti es una especie perteneciente a la familia Culicidae, que es originaria de África, pero que se ha dispersado por todo el mundo porque sus adultos tienen la habilidad para pasar inadvertidos y porque las hembras se alimentan de sangre humana (Figura 3).

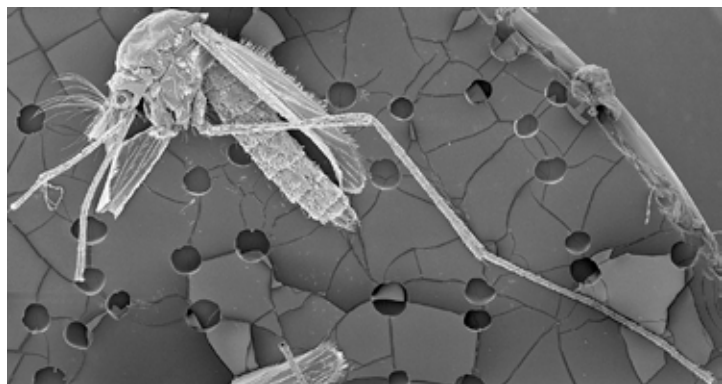
Los hábitos domésticos de este mosquito y su capacidad de vuelo, no mayor a 50 metros, hacen que los adultos permanezcan próximos al sitio donde emergieron.

Los adultos son transportados por el ser humano en autos u otros medios, como ocurrió hace más de 200 años cuando llegó al Nuevo Mundo por vía marítima. *Aedes aegypti* es actualmente el



Figura 2. Vista ventral de una larva de la mosca *Dermatobia hominis*. Foto: Juan Cisneros Hernández.

Figura 3. Vista lateral de adulto del mosquito *Aedes aegypti* en un microscopio electrónico de barrido. Foto: Érika Roxana Bautista Arredondo.



principal transmisor de la fiebre amarilla, dengue, zika y chikungunya en todo el mundo, al igual que *Aedes albopictus*, especie que puede ser transportada dentro de autos y dispersada por el humano usando las redes carreteras, según un estudio del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales en Panamá (Miller y Loaiza, 2015).

Este mosquito siempre está próximo al humano por la necesidad de alimentarse de sangre, su vuelo sigiloso lo hace pasar desapercibido dentro de un auto, pero los humanos somos los responsables de la movilidad de este insecto por las vías carreteras al facilitar su traslado de un sitio a otro y propiciar su dispersión.

CHINCHES BESUCONAS O TALAJES

Existen más de cien especies de chinches pertenecientes a la familia Triatominae, cuyos adultos

y ninfas se alimentan de sangre (Figura 4) y transmiten la enfermedad de Chagas, también conocida clínicamente como tripanosomiasis americana. Esta enfermedad provocada por el parásito *Trypanosoma cruzi* se presenta naturalmente en algunas zonas rurales de varios países de América Latina.

La transmisión de la enfermedad a los seres humanos y a otros mamíferos ocurre por la exposición a la orina y heces defecadas por las chinches al alimentarse. Esta enfermedad es potencialmente mortal, aunque las cepas del parásito en Mesoamérica son menos virulentas que las sudamericanas. Las chinches pueden dispersarse a nuevos sitios por el trasiego de materiales para la construcción de casas (palma o madera) y por la movilidad de humanos que trasladan huevos de estas chinches entre sus pertenencias.

PULGA DE LA ARENA

Tunga penetrans es un insecto perteneciente a la familia Hectopsyllidae, parásito de animales y humanos que ocurre naturalmente en algunas zonas socialmente marginadas.

Este insecto, también conocido como nigua o pique, suele parasitar animales de corral como cerdos, vacas y aves, bajo condiciones de hacinamiento. La parasitosis ocurre principalmente en el pie de las personas, las cuales se contagian por caminar descalzos en suelos o playas infestadas por este insecto.

La tungiasis es una parasitosis que inicia con un ligero escozor en la zona afectada del pie, y días después se convierte en una dolorosa lesión. El daño puede afectar el crecimiento de uñas y las personas parasitadas pueden ser reconocidas por su peculiar forma de caminar. Esta enfermedad es endémica en varios países de Centroamérica, el Caribe y África, pero cada día se ve más en Europa, en turistas y en menor medida en migrantes (Beltrán, 2005).

Por ello, si consideramos la movilidad como un elemento estructural, histórico y como realidad social global, debemos asimilar que moverse también implica diferentes formas de interacción con

Figura 4. Grupo de ocho ninfas de quinto estadio (abajo); hembra adulta (arriba a la derecha); hembra adulta recién emergida (arriba a la izquierda) de *Triatoma lecticularia*. Foto: Francisco Javier Ramírez Aguilar.





Figura 5. Vista dorsal de hembra de la mosca del Mediterráneo, *Ceratitis capitata*. Foto: Florida López Arriaga.

el ambiente y todos sus componentes, independientemente de que esta sea producto de un viaje turístico, laboral o una migración por otros motivos.

MOSCA DEL MEDITERRÁNEO

Ceratitis capitata es una plaga de orden mundial perteneciente a la familia Tephritidae que ataca una gran variedad de frutas con endospermo blando, que incluyen guanábana, guayaba, aguacate, higo, café, naranja, etcétera (Morales *et al.*, 2004).

Los adultos de esta mosca no tienen gran capacidad de vuelo, pero han superado casi todas las fronteras mundiales transportándose por automóvil, barco, tren y avión (Figura 5).

Las frutas que cualquier viajero lleva dentro de su maleta es la vía de dispersión más eficiente de esta plaga. La movilidad humana contribuye a incrementar los casos de invasión de este insecto y también los fenómenos naturales como huracanes, tormentas o vientos fuertes.

Los factores que inciden en su propagación incluyen al turismo, la globalización y el comercio internacional, que han permitido el trasiego de esta

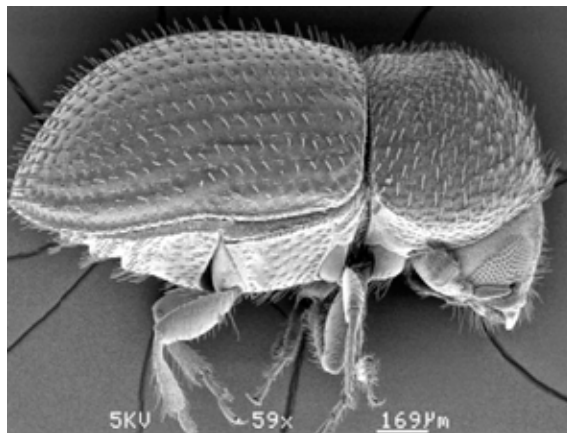


Figura 6. Vista lateral de una hembra de la broca del café, *Hypothenemus hampei*; imagen obtenida con un microscopio electrónico de barrido. Foto: Guadalupe Nieto.

especie fuera de su área de origen geográfico, la costa occidental de África.

BROCA DEL CAFÉ

Hypothenemus hampei es una de más de 200 especies que pertenecen a este género de coleópteros, pero la única especie que se alimenta de la semilla de los frutos de café.

Este pequeño insecto se encuentra ampliamente distribuido en las plantaciones de café de todo el mundo (Figura 6), pero sus infestaciones están restringidas por la altitud, ya que sus poblaciones se reducen drásticamente a una altitud mayor a 2,000 metros sobre el nivel del mar.

Estudios genéticos realizados por una investigadora del Instituto de Investigación para el Desarrollo, en Francia, reveló cinco grupos de *H. hampei* geográficamente delineados en muestras procedentes de 18 países del mundo, y que probablemente África Oriental sea la región geográfica de origen de esta plaga (Gauthier, 2010).

Los adultos de la broca del café, como se le conoce popularmente, pueden realizar vuelos sostenidos de varias horas, lo cual permite que puedan ser desplazados por el viento.

Sin embargo, la movilidad humana es un factor que ha facilitado la expansión de esta plaga al ser



Figura 7. Vista dorsal del adulto macho del barrenador del tallo del café, *Monochamus sargi*. Foto: Humberto Baena Basave.

transportada sobre ropa, herramientas, costaleras, canastos e, incluso, por el traslado de frutos de café infestados, todo lo cual facilita su dispersión a nuevas áreas de cultivo.

CERAMBÍCIDOS

La familia Cerambycidae es el grupo más diverso de coleópteros, con alrededor de 35,000 especies descritas en todo el mundo. Los adultos de estos insectos se distinguen por tener antenas más largas que su cuerpo (Figura 7). La mayor cantidad de especies se encuentra en el trópico, con más de 1,600 especies y subespecies registradas en México (Noguera, 2014).

Eventualmente, estos insectos pueden causar daños a plantaciones forestales, ornamentales u hortícolas, aunque la mayor parte de especies se alimentan de madera y son importantes agentes recicladores en los ecosistemas forestales.



Figura 8. Adultos de Makech (*Zopherus chilensis*) decorados para su venta en tiendas de artesanías del centro de la ciudad de Mérida, Yucatán. Foto: Alfredo Castillo.

Los vuelos cortos de estos insectos limitan su capacidad de dispersión, pero pueden atravesar fronteras asociados a productos importados dentro de embalajes de madera sólida. Investigadores de los Estados Unidos identificaron morfológica y genéticamente a 23 géneros de cerambícidos presentes en madera usada como embalaje de mercancías importadas a Estados Unidos entre 2012 y 2015 (Wu, 2017).

Esto demuestra que el comercio mundial contribuye también a la dispersión de insectos hacia fuera de sus áreas nativas, y que los programas para la detección de insectos en las fronteras son importantes para el análisis y manejo de riesgos de plagas que comen madera.

MAKECH

Zopherus chilensis es un coleóptero polífago perteneciente a la subfamilia Tenebrionoidea, con un endemismo condicionado por la limitada capacidad de dispersión de sus adultos y porque su desarrollo depende de las condiciones ambientales locales que prevalecen en el estado de Yucatán. Los adultos silvestres son recolectados vivos y decorados

con piedras artificiales o naturales, para ser comercializados como artesanías (Figura 8).

En esta región, estos insectos son considerados como amuletos de amor, creencia que tiene su origen en una antigua historia de amor maya. En la actualidad, persiste la costumbre en algunas mujeres nativas de esta región de México, de adornar su vestido con estos insectos.

Los turistas que visitan la ciudad de Mérida adquieren estas “artesanías” en el comercio local atraídos por la cautivadora historia de amor que sostiene esta costumbre. La dispersión de este insecto a otras regiones de mundo es poco probable, ya que el insecto no sobrevive por mucho tiempo y porque hasta ahora no ha sido posible reproducirlo fuera de su hábitat natural.

Sin embargo, la recolección y venta de este insecto está prohibida por ser una especie endémica, aunque en la práctica no parece existir ningún tipo de regulación.

CONCLUSIONES

Los insectos han sido de gran importancia para las culturas humanas, pero la modernidad ha propiciado aspectos que condicionan la movilidad de algunas especies que por sí solas no se hubieran desplazado tan ampliamente.

Estos factores incluyen la alteración de los ecosistemas y el cambio climático, así como el turismo, la globalización y el comercio internacional, en los que la actividad humana juega un papel preponderante e impacta particularmente la distribución geográfica de insectos de importancia agrícola, forestal y médica. La movilidad de personas y productos en el mundo está relacionada, o tiene potencial para hacerlo, con la dispersión de insectos exóticos e invasivos, incluso en aquellos que ya tienen una distribución global. Este fenómeno se magnifica por la eficacia y rapidez de los actuales medios de comunicación y provoca un incremento potencial del número de especies que se desplazan, de las áreas afectadas y de la velocidad del desplazamiento. Investigar y registrar las movilidades, sus trayectorias, condiciones, medios y circunstancias

es fundamental para comprender el mundo que nos rodea y generar formas de acción sustentables, sostenibles y con justicia social.

REFERENCIAS

- Ascunce MS, Fane J, Kassu G, Toloza AC Picollo MI, Gonzalez-Oliver A and Reed DL (2013). Mitochondrial diversity in human head louse populations across the Americas. *American Journal of Physical Anthropology* 152:118-129.
- Ascunce MS, Toloza AC Picollo MI, Gonzalez-Oliver A and Reed DL (2023). Nuclear genetic diversity of head lice sheds light on human dispersal around the world. *Plos one* 18:e0293409.
- Bae CJ, Douka K and Petraglia MD (2017). On the origins of modern humans: Asian perspectives. *Science* 358:eaai9069.
- Beltrán FM (2005). Tungiosis y *Tunga penetrans*. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica* 22:323-324.
- Gauthier N (2010). Multiple cryptic genetic units in *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytinae): evidence from microsatellite and mitochondrial DNA sequence data. *Biological Journal of the Linnean Society* 101:113-129.
- Mac Gregor-Loaeza R (1975). Los insectos y las antiguas culturas mexicanas. Un ensayo etnoentomológico. *Revista de la Universidad de México* 2:8-13.
- Miller MJ and Loaiza JR (2015). Geographic expansion of the invasive mosquito *Aedes albopictus* across Panama-implications for control of dengue and chikungunya viruses. *PLoS Neglected Tropical Diseases* 9:e0003383.
- Morales P, Cermeli M, Godoy F and Salas B (2004). Lista de hospederos de la mosca del Mediterráneo *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) basada en los registros del Museo de Insectos de Interés Agrícola del INIA-CENIAP. *Entomotropica* 19:51-54.
- Noguera FA (2014). Biodiversidad de Cerambycidae (Coleoptera) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85:290-297.
- Wu Y, Trepanowski NF, Molongoski JJ, Reagel PF, Lingafelter SW, Nadel H, Myers SW and Ray AM (2017). Identification of wood-boring beetles (Cerambycidae and Buprestidae) intercepted in trade-associated solid wood packaging material using DNA barcoding and morphology. *Scientific Reports* 7:40316.

Alfredo Castillo-Vera
Departamento de Ecología de Artrópodos
y Manejo de Plagas
El Colegio de la Frontera Sur
acastill@ecosur.mx

Enrique Coraza de los Santos
Departamento de Sociedad y Cultura
El Colegio de la Frontera Sur
ecoraza@ecosur.mx



© Enrique Soto. *Imaginando*, México DF, ca. 1972.

Control inteligente de plagas

Daniela **Ordaz-Pérez**
David **Alavez-Rosas**

Los insectos constituyen el grupo de animales más abundante y diverso del planeta, hay cerca de un millón de especies descritas (más que todos los demás grupos de animales juntos). Existen insectos benéficos para el ser humano y que tienen una enorme importancia económica, como las abejas, que son aprovechadas para polinizar cultivos o por sus productos. Otros insectos han ejercido un enorme impacto en la historia de la humanidad, como es el caso del gusano de la seda. Sin embargo, también existen insectos que son perjudiciales para el ser humano e impactan en el desarrollo económico. Tal es el caso de insectos plaga de cultivos, como el gusano cogollero del maíz, las moscas de la fruta y los barrenadores de granos almacenados. Además, están los insectos de importancia médica, ya que transmiten enfermedades. Por ejemplo, los mosquitos transmiten malaria, dengue y zika; y las chinches besuconas transmiten el parásito que causa la enfermedad de Chagas.

Los seres humanos hemos desarrollado métodos de control de plagas insectiles que van desde el uso de insecticidas, de depredadores del insecto plaga, o técnicas más novedosas como la selección genética de los cultivos. Actualmente se ha desarrollado el manejo integrado de plagas, con el que se enfatiza el uso de prácticas preventivas simples y económicas con la finalidad de ocasionar el menor daño posible a las personas y al medio ambiente. Dentro de este manejo se encuentra el

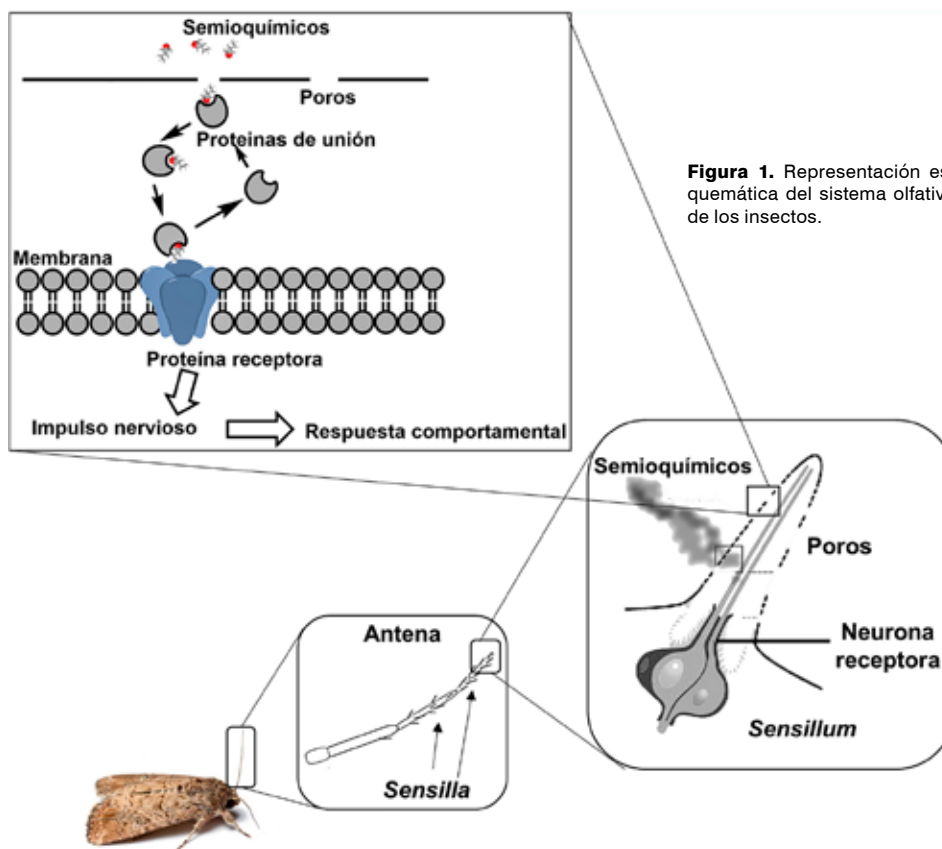


Figura 1. Representación esquemática del sistema olfativo de los insectos.

control etológico, que utiliza técnicas que modifican el comportamiento de los insectos. Básicamente, consiste en el uso de atrayentes, repelentes o inhibidores químicos, ya sea de origen natural o sintético (feromonas, cebos alimenticios, aceites esenciales, etc.) para controlar las poblaciones de plagas de importancia económica, ya sea médica o agrícola.

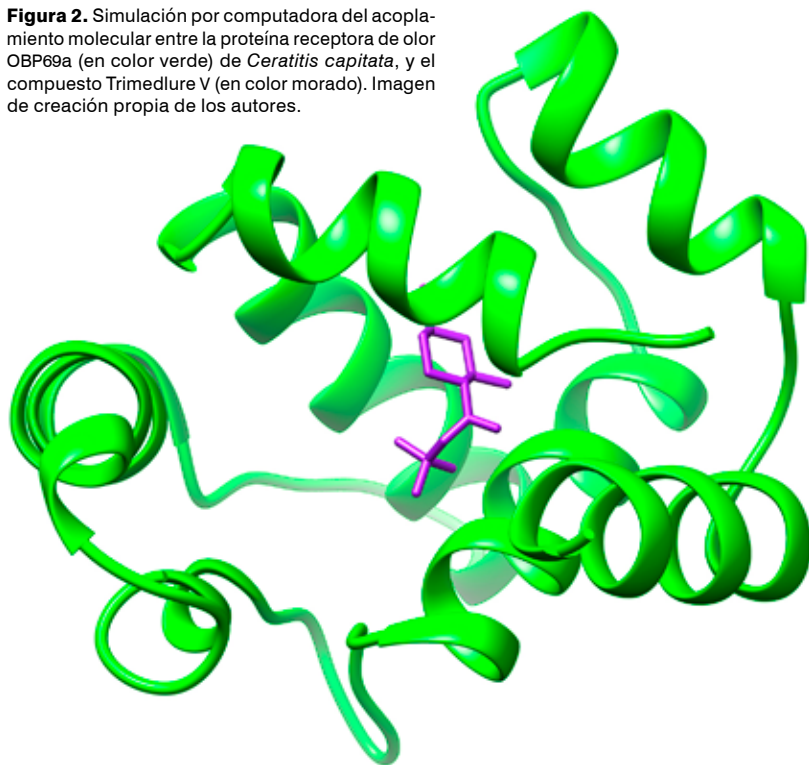
¿CÓMO SE APROVECHA EL COMPORTAMIENTO DE LOS INSECTOS PARA CONTROLARLOS?

Los insectos utilizan un lenguaje químico para comunicarse entre ellos o con su entorno; estas sustancias son llamadas semioquímicos y sirven ya sea para la búsqueda de pareja, para elegir sitios donde depositar huevos o para las interacciones con otras especies (Anderson y Newcomb 2017). Los humanos hemos aprendido a usar el conocimiento de estas sustancias para el control de plagas de importancia agrícola y médica.

El área que se encarga de este estudio se llama ecología química. Convencionalmente, el método para descifrar este lenguaje consiste en extraer los compuestos de los insectos, identificarlos en el laboratorio con técnicas especializadas, y comprobar el proceso por medio de bioensayos, tanto en el laboratorio como en el campo. Posteriormente, con las sustancias identificadas se realizan estudios a escala molecular para entender bioquímicamente cómo los insectos producen y perciben estos compuestos. Este proceso suele ser muy largo, hay casos en los que la caracterización de algún semioquímico ha tardado años e incluso décadas. Actualmente, se conoce el proceso bioquímico por el cual los insectos perciben los semioquímicos, que involucra a su sistema olfativo.

Estos animales detectan los olores por medio de sus antenas, donde poseen unas estructuras especializadas llamadas *sensilla* (en singular, *sensillum*), parecidas a vellos muy delgados. En las *sensilla* existen unos diminutos poros por donde los compuestos penetran la antena, llegando a proteínas de

Figura 2. Simulación por computadora del acoplamiento molecular entre la proteína receptora de olor OBP69a (en color verde) de *Ceratitis capitata*, y el compuesto Trimedlure V (en color morado). Imagen de creación propia de los autores.



compuestos es mediante simulaciones por computadora. Existen programas computacionales que nos permiten ver las interacciones que ocurren entre el semioquímico y las proteínas receptoras.

Además, por medio de estas simulaciones se pueden identificar los lugares exactos donde ocurre el acoplamiento (*docking*, en inglés) entre los semioquímicos y los receptores; o sea, se obtiene un modelo aproximado de cómo, en qué lugar y de qué manera se unirían estos compuestos con las proteínas del insecto (Figura 2).

unión que transportan los compuestos hasta otras proteínas llamadas receptoras (Figura 1). Esto desencadena una serie de impulsos eléctricos en las neuronas, que se convierten en estímulos nerviosos y se traducen en una orden en el comportamiento del insecto (Leal 2017).

¿LAS COMPUTADORAS HAN AYUDADO EN ESTE PROCESO?

Como en muchas otras áreas del quehacer humano, las computadoras han facilitado el proceso haciéndolo más rápido y menos costoso. Existe una vasta cantidad de compuestos químicos de los cuales no se conoce si tienen un efecto, o qué tipo de respuesta generan en el insecto (atrayente o repelente). Un ejemplo son las interacciones de las proteínas receptoras del olor de *Drosophila melanogaster* (la mosca de la fruta) con la feromona, el acetato de *cis*-vaccenilo, que solamente es producida por los machos. Esta feromona provoca dos tipos de respuesta según su interacción sea con machos o hembras: en los primeros, induce a la agresión; y en los segundos, provoca la receptividad sexual (Bentzur *et al.*, 2018). Una manera rápida y barata de predecir la respuesta antenal del insecto hacia estos

Así, es posible diseñar compuestos que tengan mayor afinidad por las proteínas que los propios semioquímicos. Es decir, podemos fabricar moléculas que sean mejores atrayentes o repelentes que las sustancias naturales, pero con la ventaja de que también serán amigables con el ambiente.

Otra gran ventaja que nos dan las computadoras es el ahorro de tiempo y recursos materiales y humanos. Por ejemplo, suponiendo que se conocen 1,000 compuestos con uso potencial para el control de plagas, sin la ayuda de las computadoras se tendría que evaluar el efecto de cada uno de los compuestos aplicándolos directamente a un insecto.

Este proceso tomaría semanas e incluso meses o años, y lo más probable es que solo algunos de los compuestos tuvieran un efecto aplicable. Esto representa un gasto en recursos económicos, insumos, tiempo y personal capacitado. Por el contrario, con los programas de acoplamiento se pueden realizar simulaciones de la interacción de los 1,000 compuestos con las proteínas receptoras del insecto de interés en cuestión de minutos.



© Enrique Soto. Sombrerera, ca. 1981.

De esta manera se podrían evaluar los 1,000 compuestos en un día. Una vez que se realiza la simulación de los compuestos, se pueden evaluar los resultados obtenidos y seleccionar aquellos que tienen mayor afinidad por el receptor. Suponiendo que, de los 1,000 compuestos, únicamente 10 tienen mayor afinidad, estos 10 serían los seleccionados para realizar experimentos y evaluar en vivo la reacción del insecto al compuesto. Esto daría como resultado el ahorro de tiempo y recursos, puesto que, en lugar de evaluar 1,000 compuestos, únicamente se evaluarían los 10 mejores candidatos. Hasta hace algunos años era necesario el uso de súper computadoras para realizar estos acoplamientos, ahora se pueden realizar con las computadoras que tenemos en casa.

Una desventaja de esta técnica es que solo nos brinda información de qué compuestos podrían tener una fuerte unión con las proteínas receptoras y, por ende, una fuerte actividad antenal, pero no nos permite saber qué tipo de respuesta conductual generará en el insecto; es decir, si lo atrae, lo repele,

lo inmoviliza, etc., para lo que todavía se tendrían que realizar bioensayos. Debido a que aún no se tienen muchos estudios, no se conoce si los semioquímicos diseñados por computadora tendrían un efecto nocivo en otras especies o en el medio ambiente. Sin embargo, debemos ser conscientes de que, al ser moléculas, pueden también generar problemas si se usan sin medida. Por ejemplo, pueden generar el fenómeno de resistencia o incluso pueden degradarse en el ambiente y funcionar como veneno para otras especies.

¿CÓMO SE DISEÑAN ESTAS SUSTANCIAS?

Algunos de los insectos de importancia económica y médica han sido analizados secuenciando su ADN, por lo que se conoce cuál es el código genético que permite la síntesis de las proteínas por el organismo. A partir del conocimiento de estas secuencias y del uso de algunos programas bioinformáticos, se puede realizar un modelado en tercera dimensión de las estructuras de las proteínas receptoras; es como si se realizara una maqueta de la proteína por computadora. Con esto, se puede hacer una simulación

de cómo interactúan las moléculas con la proteína receptora. Estos modelos (proteína y semioquímico) pueden ser visualizados y manipulados mediante programas computacionales especializados.

Posteriormente, ambos archivos se llevan a un programa bioinformático que se encarga de evaluar todas las posibles interacciones que pueden ocurrir entre la proteína y el semioquímico (Caballero-Vidal *et al.*, 2021), de tal manera que pueden elegirse aquellas conformaciones que muestran mayor afinidad. Estos son los compuestos químicos que vale la pena probar en vivo con el insecto, por medio de bioensayos. A este proceso se le ha nombrado ecología química inversa.

© Enrique Soto. Sombrerera, ca. 1981.



Recientemente, en México, nuestros grupos de investigación (UNAM y MOSCAFRUT) han comenzado a trabajar con la elucidación de atrayentes y repelentes que simulen a las feromonas de chinches besuconas y moscas de la fruta.

CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Se ha probado que el proceso aquí descrito puede funcionar para encontrar compuestos que sirvan para el combate de insectos plaga; de hecho, con esta metodología se han descubierto algunos fármacos para uso humano. El aprovechamiento de las herramientas computacionales ha abierto nuevas posibilidades para obtener sustancias que combatan plagas, pero que, a su vez, no sean dañinas para el ser humano ni para el medio ambiente. Es fundamental que la investigación científica aborde estos temas que son de interés nacional y mundial.

REFERENCIAS

- Andersson M and Newcomb R (2017). Pest control compounds targeting insect chemoreceptors: Another silent spring? *Frontiers in Ecology and Evolution* 5:1-6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00005>.
- Bentzur S, Shmueli A, Omesli L, Ryvkin J, Knapp JM, Parnas M, Davis FP and Shohat-Ophir G (2018). Odorant binding protein 69a connects social interaction to modulation of social responsiveness in *Drosophila*. *PLoS Genetics* 14(4):1-23. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007328>.
- Caballero-Vidal G, Bouysset C, Gévar J, Mbouyid H, Nara C, Delaroché J, Golebiowski J, Montagné M, Fiorucci S and Jacquín-Joly E (2021). Reverse chemical ecology in a moth: machine learning on odorant receptors identifies new behaviorally active agonist. *Cellular and Molecular Life Sciences* 78:6593-6603. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00018-021-03919-2>.
- Leal W (2017). Reverse chemical ecology at the service of conservation biology *PNAS* 114(46):12094-12096. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1717375114>.

Daniela Ordaz-Pérez
Departamento de Genética
Programa Operativo de Moscas
Planta MOSCAFRUT

David Alavez-Rosas
Instituto de Ecología
Universidad Nacional Autónoma de México
alavezd@yahoo.com



© Enrique Soto. *Fiestas*, Oaxaca, 2023.

Balas mágicas contra el cáncer

Nohemí **Salinas Jazmín**
Sofía **Álvarez Lorenzo**

El cáncer es un grave problema de salud pública y está entre las primeras causas de mortalidad a nivel mundial. En México, ocupa el tercer lugar en mortalidad. Las células cancerosas tienen su origen en la transformación maligna de las células sanas; estas células transformadas se caracterizan por una proliferación descontrolada y tienen la capacidad de invadir y diseminarse a cualquier parte del cuerpo.

Al paso de los años se ha logrado un gran progreso en la prevención, diagnóstico y tratamiento del cáncer. En particular, en las estrategias terapéuticas tradicionales como la cirugía, la radioterapia y la quimioterapia, que han evolucionado con el desarrollo de agentes dirigidos, como los anticuerpos terapéuticos. Estos agentes se han posicionado como una de las opciones más relevantes y eficaces en el tratamiento del cáncer al dirigirse a antígenos específicos de las células tumorales. Describimos aquí, de manera general, la historia de los anticuerpos monoclonales, sus mecanismos de acción y los efectos adversos que tienen, así como una perspectiva de su uso en México y el mundo.

BREVE HISTORIA DE LOS ANTICUERPOS

El origen de este tipo de terapia se remonta al siglo XIX, con los hallazgos de Emil Adolf von Behring y Shibasaburo Kitasato, quienes sentaron las bases de la inmunidad humoral al descubrir sustancias en el suero que podían inhibir la actividad de toxinas (García, 2011). A finales del

siglo XIX, Paul Ehrlich propuso que las células tienen “cadenas laterales” que pueden unirse con ciertas toxinas, y que tras verse amenazadas por la presencia de patógenos o agentes extraños, producen más cadenas laterales que posteriormente se liberan para “atraparlos”; estas moléculas podrían funcionar de manera específica, tal como una llave con su cerradura, sin afectar a células sanas. Posteriormente, Paul Ehrlich acuñó el término *Immunkörper* (anticuerpo) en la primera descripción de lo que hoy conocemos como anticuerpos (Creus *et al.*, 2002; García, 2011). Además, fue el primero en proponer el uso de moléculas específicas con la capacidad de unirse a agentes patógenos o extraños para la destrucción de estos; las denominó “balas mágicas” (Zipfel y Skerka, 2022).

Hoy sabemos que se trata de proteínas producidas por las células B, mejor conocidas como anticuerpos. Gracias a la información que contienen las células B en su genoma, pueden producir anticuerpos con la capacidad de reconocer de manera específica regiones de moléculas extrañas o de agentes patógenos, con la finalidad de neutralizarlos o marcarlos para su posterior eliminación (Creus *et al.*, 2002).

En 1975, Köhler y Milstein descubrieron y produjeron por primera vez anticuerpos monoclonales a partir de una clona (grupo de células que provienen de una única célula) de células B proveniente de un mieloma. Los anticuerpos monoclonales son glicoproteínas que pueden unirse con alta especificidad a un antígeno y son producidas por una clona de células B. En 1982 se evaluó por primera vez la eficacia y seguridad de un anticuerpo monoclonal en el tratamiento de un tipo de linfoma. A partir de entonces se han desarrollado distintas tecnologías para mejorar tanto la producción, como la tolerancia y la eficacia de los anticuerpos monoclonales (Creus *et al.*, 2002).

Durante el desarrollo de anticuerpos terapéuticos se ha buscado que los antígenos a los que irán dirigidos sean específicos de células tumorales, se encuentren en muy baja expresión en las células normales, o bien, que no sean expresados y, además, que sean accesibles para su reconocimiento.

Por otro lado, el antígeno tumoral debe tener un papel importante en la progresión del tumor y contribuir a las señales de proliferación y a la supresión del sistema inmunitario, entre otras características (Modjtahedi *et al.*, 2012). La idea es que la actividad del anticuerpo repercuta en dichas funciones y afecte a las células tumorales.

En general, los anticuerpos terapéuticos se caracterizan por ser menos tóxicos y por provocar menos efectos adversos que la quimio y la radioterapia, que pueden afectar tanto a las células tumorales como a las células sanas. A pesar de que los pacientes toleran bien los esquemas con anticuerpos monoclonales, algunos pueden experimentar eventos adversos (Figura 1), como reacciones anafilácticas, erupciones cutáneas, cardiotoxicidad, trombosis venosa profunda, enfermedades autoinmunes como el síndrome similar al lupus, o afectaciones a la tiroides, entre otros. Algunos eventos adversos se han asociado a la vía de administración (Hansel *et al.*, 2010).

¿CÓMO TRABAJAN LOS ANTICUERPOS TERAPÉUTICOS ANTITUMORALES?

El mecanismo de acción de los anticuerpos se basa en el reconocimiento de los antígenos tumorales, lo cual resulta en la eliminación directa o indirecta de las células tumorales (Figura 1):

1) Los mecanismos de acción directa de los anticuerpos están relacionados con la función de los receptores de membrana de las células tumorales, los cuales suelen activar señales de crecimiento celular cuando se unen a sus ligandos (lo que favorece el crecimiento tumoral o el de los vasos sanguíneos, por ejemplo). Para eliminar células tumorales, los anticuerpos terapéuticos pueden unirse directamente al receptor e interrumpir sus funciones de señalización, modificar la interacción entre dos receptores e inducir la internalización o la degradación de dicho receptor, evitando así su activación. Adicionalmente, la señalización del receptor se puede inhibir cuando el anticuerpo se une al ligando para evitar que este se una a su receptor. Es decir, los anticuerpos tienen la capacidad de unirse tanto al receptor como al ligando, lo que les permite interrumpir la

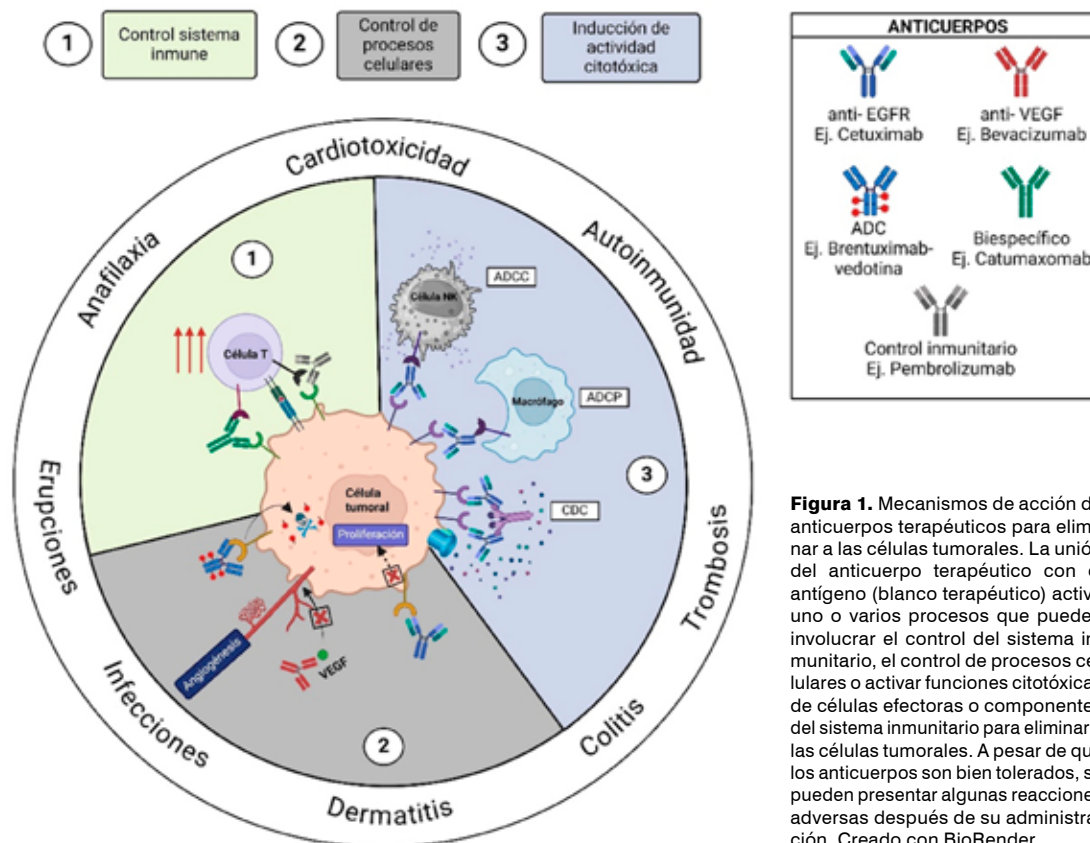


Figura 1. Mecanismos de acción de anticuerpos terapéuticos para eliminar a las células tumorales. La unión del anticuerpo terapéutico con el antígeno (blanco terapéutico) activa uno o varios procesos que pueden involucrar el control del sistema inmunitario, el control de procesos celulares o activar funciones citotóxicas de células efectoras o componentes del sistema inmunitario para eliminar a las células tumorales. A pesar de que los anticuerpos son bien tolerados, se pueden presentar algunas reacciones adversas después de su administración. Creado con BioRender.

señalización que promueve la progresión tumoral (Zahavi y Weiner, 2020).

II) Los mecanismos de acción indirecta requieren que el anticuerpo interactúe primero con el antígeno tumoral y después con otras células o componentes del sistema inmunitario que eliminarán a las células tumorales. Tales mecanismos incluyen: a) la ingestión de las células tumorales por células del sistema inmunitario (como los macrófagos), fenómeno conocido como fagocitosis (fagocitosis dependiente de anticuerpo: ADCP); b) la inducción de la actividad citotóxica de células inmunitarias para liberar moléculas que provocan la muerte de la célula tumoral (citotoxicidad celular dependiente del anticuerpo: ADCC); c) la activación de sistemas de la respuesta inmunitaria, como el del complemento, para inducir la formación de poros que provocan la muerte de las células (citotoxicidad dependiente de complemento: CDC); d) la liberación de compuestos citotóxicos transportados al interior de las células tumorales (anticuerpo que tiene unido un fármaco: ADC); e) la

restauración de la actividad antitumoral del sistema inmunitario al bloquear el efecto inmunosupresor de las células tumorales sobre las células del sistema inmunitario, para lo cual se han diseñado anticuerpos que pueden reconocer tanto a receptores de la célula tumoral como a receptores en las células T. Este tipo de anticuerpos tiene como objetivo permitir la activación de las células T e inducir la muerte de la célula tumoral (Zahavi y Weiner, 2020).

Hoy en día se cuenta con más de 50 anticuerpos terapéuticos de uso oncológico aprobados para tratar diferentes tipos de cáncer. A continuación mencionamos algunos ejemplos. Cetuximab es un anticuerpo antitumoral dirigido contra el receptor del factor de crecimiento epidérmico (EGFR) con el objetivo de bloquear su señalización, lo que conduce a la inhibición de la proliferación de células tumorales.

Además, este anticuerpo puede activar CDC, ADCC y ADCP para la eliminación de las mismas. Su



© Enrique Soto. *Reflejos*, Puebla, Puebla, 2024.



© Enrique Soto. *Reflejos*, Puebla, Puebla, 2024.

uso está recomendado para pacientes con cáncer colorrectal metastásico, de pulmón y el cáncer de cabeza y cuello (Modjtahedi *et al.*, 2012).

Catumaxomab es un anticuerpo biespecífico dirigido a EpCAM (molécula presente en células tumorales) y CD3 (molécula presente en células T). Es un anticuerpo multifuncional capaz de:

- 1) inhibir la señalización de EpCAM asociada con la proliferación y migración de células cancerosas,
- 2) activar la función antitumoral de las células T, y 3) activar ADCC y la fagocitosis.

Su uso está recomendado para pacientes con ascitis maligna en cáncer gástrico, pancreático y de ovario (Modjtahedi *et al.*, 2012).

Pembrolizumab es un anticuerpo dirigido a una proteína de control inmunológico, PD-1, un receptor que se encuentra en células T que permite su reactivación para eliminar a las células tumorales. Su uso está recomendado en diversos tipos de cáncer como melanoma, de pulmón, de vejiga, colorrectal, entre otros (Modjtahedi *et al.*, 2012).

Brentuximab-vedotina es un ejemplo de un ADC dirigido hacia CD30 (una molécula expresada en las células tumorales) que tiene unida a vedotina, un agente citotóxico que es capaz de inducir la muerte de células tumorales que sobreexpresan CD30 en su superficie.

Su uso está recomendado para pacientes con linfoma de Hodgkin y linfoma de no Hodgkin (Modjtahedi *et al.*, 2012).

PERSPECTIVAS

El uso de anticuerpos monoclonales para el tratamiento de cáncer ha mejorado el pronóstico y la tolerancia clínica de los pacientes. Gracias a su especificidad poseen menos efectos secundarios que las terapias tradicionales. Sin embargo, estos agentes cuentan con limitantes, como su elevado costo y el desarrollo de resistencia terapéutica. Por ello, es necesario estudiar los mecanismos de resistencia terapéutica para identificar e implementar estrategias que eleven la eficacia de esta terapia y, por tanto, mejoren la sobrevida y calidad de vida de los pacientes.

En general, a nivel mundial se ha reportado un aumento en la supervivencia de los pacientes con cáncer tratados con anticuerpos monoclonales, en comparación con los que no reciben este tratamiento. Antes del uso de anticuerpos monoclonales para tratar el melanoma, la supervivencia para pacientes con enfermedad diseminada (metastásica) era de 6 a 7 meses; con el uso de anticuerpos monoclonales se ha incrementado a casi 6 años (Knight, 2023).

Sin embargo, en México hay pocos datos reportados al respecto. Recientemente, algunos investigadores recopilaron datos disponibles de incidencia y mortalidad por cáncer de 1990 a 2019 para hacer un análisis de las necesidades de prevención, diagnóstico y tratamiento del cáncer en México (Beltran-Ontiveros, 2024). Un análisis realizado por estudiantes y académicos de la BUAP determinó que el 40 % de las pacientes con cáncer de mama que usan anticuerpos monoclonales responden completamente a la terapia,



© Enrique Soto. Bellas Artes, México SF, ca. 1974.

mejorando la calidad de vida y disminuyendo el número de muertes (BUAP, 2022); el uso de este mismo anticuerpo a nivel mundial ha reducido en un 50 % la mortalidad (Delgado M, 2023). Por tanto, es indispensable incluir el uso de estos agentes en las estrategias de tratamiento, así como difundir la información sobre la respuesta a la terapia en la población mexicana. En el año 2017, el Congreso de la Unión aprobó la creación de un registro nacional de cáncer que permitirá tener un panorama del cáncer en México, tipos de tratamientos, asignación de recursos y programas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM (Clave IA204323) y a CONAHCyT (CF-2023-I-92). S. A. L es estudiante de maestría del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Bioquímicas, de la UNAM, y es apoyada por CONAHCyT (CVU 1271130).

REFERENCIAS

Beltran-Ontiveros SA *et al.* (2024). National Burden and Trends for 29 Groups of Cancer in Mexico from 1990 to 2019: A Secondary Analysis of the Global Burden of Disease Study 2019. *Cancers* 16:149.

BUAP (2022). El uso de anticuerpos monoclonales disminuye la mortalidad por cáncer de mama. Recuperado de: <https://boletin.buap.mx/node/2250>.

Creus N *et al.* (2002). Anticuerpos monoclonales en oncología. *Farmacia Hospitalaria* 26(1):28-43.

Delgado M and García-Sainz J (2023). Therapeutic Monoclonal Antibodies against Cancer: Present and Future. *Cells* 12(24):2837.

Hansel T, Kropshofer H, Singer T, Mitchell J and George A (2010). The safety and side effects of monoclonal antibodies. *Nature Reviews Drug Discovery* 9:325-338.

Knight A, Karapetyan L and Kirkwood J (2023). Immunotherapy in Melanoma: Recent Advances and Future Directions. *Cancers* 15(4):1106.

Modjtahedi H, Ali S and Essapen S (2012). Therapeutic application of monoclonal antibodies in cancer: advances and challenges. *British Medical Bulletin* 104(1):41-59.

Zahavi D and Weiner L (2020). Monoclonal Antibodies in Cancer Therapy. *Antibodies* 9(3):34.

Zipfel P and Skerka C (2022). From magic bullets to modern therapeutics: Paul Ehrlich, the German immunobiologist and physician coined the term 'complement.' *Molecular Immunology* 150:90-98.

Nohemí Salinas Jazmín
Sofía Álvarez Lorenzo
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Medicina
Departamento de Farmacología
nohemysj@unam.mx



© Enrique Soto. *Sin título*, Veracruz, ca. 1978.

Bioinformática y medicina tradicional

Itzel **Gutiérrez-Aztatzi**
Thomas **Scior**

Desde sus inicios, la humanidad ha enfrentado diversas enfermedades que le han planteado el desafío de combatirlas mediante una variedad de métodos, desde el uso de recursos mágicos y religiosos hasta el empleo de plantas y raíces medicinales.

Con el tiempo, estos esfuerzos evolucionaron hacia el desarrollo de la farmacoterapia, permitiendo así la cura específica de enfermedades.

En la actualidad, la bioinformática es una disciplina emergente de la era digital que emplea herramientas computacionales para investigar y analizar acontecimientos biológicos. Además, ha revolucionado la forma en que entendemos y aplicamos la información biológica y molecular en el ámbito de la salud. Pero, ¿qué sabemos realmente sobre la medicina tradicional?, ¿cómo se desarrollan los medicamentos que en algún momento de la vida hemos tomado o tomaremos?, ¿cuánto tiempo se necesita para desarrollar un medicamento y cómo la bioinformática ha impactado en dicho desarrollo? Aquí proporcionamos un panorama general que responda a esas preguntas.

LA MEDICINA TRADICIONAL: UNA PRÁCTICA MILENARIA

La medicina tradicional, transmitida a lo largo de generaciones, se basa en el uso de hierbas medicinales, rituales curativos y conocimientos ancestrales que han sido fundamentales para tratar nuestras enfermedades.

Nombre científico	Nombre común	Uso tradicional
<i>Chamomilla recutita</i> <i>Chamaemelum nobile</i>	Manzanilla	Fiebre, inflamación, espasmos musculares, úlceras, heridas, desórdenes gastrointestinales, dolor reumático y hemorroides.
<i>Mentha spicata</i>	Hierbabuena	Náuseas, vómito y desórdenes gastrointestinales.
<i>Chenopodium ambrosioides</i>	Epazote o yerba del zorrillo	Antihelmíntico.
<i>Heterotelea inuloides</i> <i>Arnica montana L</i>	Árnica	Antiinflamatorio y antimicrobiano.
<i>Aloe vera</i>	Sábila	Tratamiento de quemaduras, heridas y para bajar la fiebre.

Tabla 1. Dilemas éticos en etapas de una investigación. Plantas con uso en la medicina tradicional mexicana (Guzmán *et al.*, 2017).

A lo largo de los siglos, estas prácticas han sido perfeccionadas y adaptadas dentro de cada cultura, y han generado una rica herencia de remedios naturales (Tabla 1) (Guzmán *et al.*, 2017).

Sin embargo, uno de los aspectos dignos de exploración es que muchos de los principios activos (compuestos responsables del efecto deseado) de las plantas medicinales, también denominados fitofármacos, aún no han sido caracterizados por la ciencia. A pesar de que su eficacia ha sido reconocida y avalada por la experiencia empírica durante siglos, hace falta una comprensión científica detallada de estos compuestos (Guzmán *et al.*, 2017).

En el contexto de la medicina tradicional mexicana, se integran también diversos rituales curativos intrínsecamente ligados a un simbolismo cultural y espiritual, cuyas desventajas son la falta de evidencia científica, los diagnósticos inexactos, el riesgo de retrasar tratamientos médicos eficaces, las posibles interacciones negativas entre sustancias, y las limitaciones en el tratamiento de enfermedades complejas (Menéndez, 2022; Guzmán *et al.*, 2017).

Sin embargo, la evolución de la ciencia y la tecnología, así como la falta de regulación en el uso de las plantas medicinales, suscitan cuestionamientos acerca de la medicina tradicional mexicana debido al uso no fundamentado (científicamente) de plantas medicinales, ya que en la elaboración de remedios

tradicionales no se tiene en cuenta la cantidad adecuada a emplear, no se conoce la estructura química específica (principio activo) que tiene el efecto curativo, y la seguridad y eficacia no están garantizadas (Scior *et al.*, 2008; Guzmán *et al.*, 2017).

Pero, a medida que la investigación avanza, surge la necesidad de abordar estas dudas y conciliar los conocimientos ancestrales con los avances científicos para garantizar la seguridad y eficacia de los remedios tradicionales. Así ha ocurrido en Asia y en países del centro de Europa, donde las plantas medicinales se han identificado como medicamentos y, además, están definidas en la farmacopea (libro establecido por autoridades competentes en el área, en el que se describen las sustancias químicas y los fármacos, y la forma en la que se usan como medicamentos), ya que científicamente se conoce el compuesto que ejerce el efecto, la dosis efectiva, su seguridad y eficacia; por lo tanto, su elaboración presenta valores agregados, como forma farmacéutica (cápsula, tableta, etc.), diferentes vías de administración, cadena de distribución comercial, registro ante las autoridades de salud, entre otras (Tabla 2) (Scior *et al.*, 2008).

Gracias al conocimiento científico sobre plantas medicinales y a los avances tecnológicos, numerosos fármacos contemporáneos se han podido obtener de plantas. Ejemplos notables incluyen el ácido acetilsalicílico, derivado de la corteza del sauce (*Salix spp*) y de *Spirea ulmaria*.

USO TRADICIONAL	USO RACIONAL
Herencia cultural.	Aportación científica.
Aceptación local, por difusión oral y libros o revistas populares.	Difusión en revistas científicas, en lenguaje objetivo y especializado.
Preparación casera o culto curativo, curanderos, etcétera.	Preparaciones galénicas: manuales o industriales, elaboradas utilizando material especializado, farmacopeas, buenas prácticas de manufactura, etcétera.
Uso de plantas endémicas de la zona.	Cultivos controlados.
Identificación por costumbres.	Identificación mediante descripción histológica y estudios de composición fitoquímica.
Dosis empírica.	Dosificación documentada.
Indicaciones intuitivas.	Indicaciones de acuerdo con la composición fitoquímica.
Perfil farmacodinámico (lo que el medicamento hace con el cuerpo) y farmacocinético (lo que el cuerpo hace con el medicamento) desconocidos o ignorados.	Perfil farmacodinámico (lo que el medicamento hace con el cuerpo) y farmacocinético (lo que el cuerpo hace con el medicamento) conocidos y aplicados.
Identificación de la planta empírica, organoléptica.	Identificación de la planta por aspectos macro y microscópicos, análisis fitoquímicos según referencias de farmacopeas.
Presentación en el mercado herbolario a granel.	Presentaciones prefabricadas industriales o formulaciones magistrales.

Tabla 2. Comparación entre el uso tradicional y racional de las plantas medicinales (Scior *et al.*, 2008).

Para el tratamiento de la malaria, se emplea la quinina, extraída de la corteza del árbol *Cinchona*, y para combatir el paludismo la artemisinina, obtenida de *Artemisia annua*. En cuanto a patologías cardíacas, se utiliza la digoxina, proveniente de *Digitalis purpurea*, y la atropina, de *Atropa belladonna*, que también se emplea como preanestésico y antiespasmódico. La codeína y la morfina, extraídas de *Papaver somniferum*, se utilizan como analgésicos bajo prescripción médica debido a sus efectos narcóticos.

En la actualidad, estamos presenciando un resurgimiento del interés en la medicina herbolaria y la medicina tradicional impulsado por una creciente demanda de enfoques más naturales para el cuidado de la salud. Sin embargo, la caracterización química exhaustiva de miles de plantas empleadas en la medicina tradicional aún está lejos de completarse (Guzmán *et al.*, 2017), lo que ha contribuido a que las farmacéuticas desarrollen nuevas moléculas a partir de las ya identificadas, con el fin de diseñar

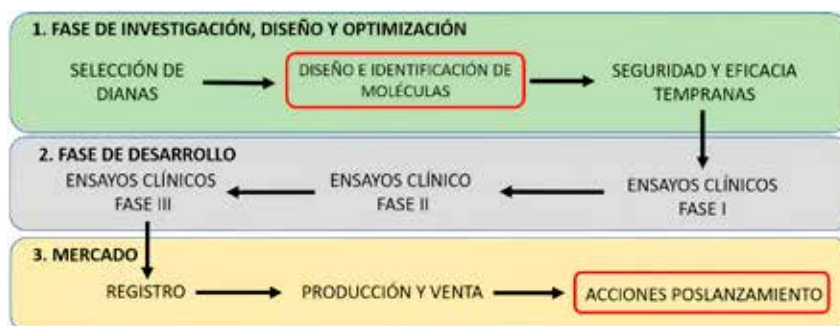
nuevas estructuras químicas con una categoría terapéutica específica (analgésico, anestésico, etc.).

DESARROLLO DE MEDICAMENTOS:

UN VIAJE DE DESCUBRIMIENTO

El desarrollo de nuevos fármacos es un proceso multidisciplinario que involucra a científicos, médicos, reguladores y a la industria farmacéutica en la búsqueda constante de tratamientos innovadores para enfermedades que afectan a millones de personas en todo el mundo. Este proceso, que puede llevar años o incluso décadas, es un viaje de descubrimiento lleno de desafíos, con el potencial de mejorar significativamente la salud. El proceso comienza con la identificación de una necesidad médica no satisfecha o un nuevo blanco terapéutico, como una proteína asociada con una enfermedad. Luego, los científicos investigan

Figura 1. Etapas del desarrollo de fármacos. El recuadro rojo indica los pasos donde las herramientas computacionales son empleadas.



exhaustivamente su función y papel en la enfermedad, utilizando herramientas y conocimientos de farmacología, biología molecular, bioquímica, bioinformática, genómica, entre otras, para entender los mecanismos subyacentes (Saldívar-González *et al.*, 2017).

Posteriormente, se inicia la fase de desarrollo de fármacos, buscando compuestos químicos que a menudo provienen de plantas medicinales y que puedan modular algún blanco terapéutico de manera efectiva y segura. También se pueden sintetizar nuevas moléculas o usar el cribado virtual (*virtual screening*) de compuestos químicos en bases de datos o emplear las pruebas biológicas de alto rendimiento (HTS, *High Throughput Screening*) (Saldívar-González *et al.*, 2017). Una vez identificados los candidatos a fármacos, comienza la fase de desarrollo preclínico, en la cual se realizan estudios en modelos animales para evaluar la seguridad y eficacia de los compuestos (Saldívar-González *et al.*, 2017; Hefti, 2008).

Estos estudios proporcionan datos esenciales sobre la farmacocinética, la toxicidad y el perfil de efectividad de los fármacos candidatos, información que resulta indispensable para avanzar hacia los ensayos clínicos en humanos (Hefti, 2008), que constituyen una etapa crítica y final en el desarrollo de fármacos. Dichos ensayos se llevan a cabo en varias fases: la fase I, evalúa la seguridad y tolerabilidad del fármaco; la fase II, además de medir la dosis, evalúa su eficacia en pacientes con la enfermedad objetivo; y la fase III confirma la eficacia del tratamiento, detecta efectos adversos y se compara con otros tratamientos utilizados para la misma patología. (Saldívar-González *et al.*, 2017; Hefti, 2008).

Una vez completados con éxito los ensayos clínicos, el fármaco candidato es sometido a revisión regulatoria por agencias como la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) en México, o la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) en Estados Unidos, o la Agencia Europea de Medicamentos (EMA). Esto representa una gran ventaja sobre la medicina tradicional, ya que en la farmacoterapia se evalúan la seguridad, eficacia y calidad del medicamento, antes de su aprobación para la comercialización y uso clínico (Figura 1).

Todo el proceso es largo, costoso y demanda una inversión sustancial de tiempo, recursos y experiencia, lo que resulta en productos económicamente inaccesibles para gran parte de la población. Esta desventaja se hace evidente al compararse con los remedios tradicionales, que son más económicos y fácilmente adquiribles en mercados y tiendas naturistas, mientras que los medicamentos solo se pueden obtener en farmacias a un precio mucho más alto. Aunque la industria farmacéutica está adoptando el uso de herramientas bioinformáticas para reducir tanto el tiempo como los costos asociados con la investigación y elaboración de nuevos fármacos, esta reducción de costos beneficia únicamente a la industria y no se traduce en una disminución real del precio para el consumidor.

BIOINFORMÁTICA: UNA HERRAMIENTA EFICIENTE EN EL DISEÑO DE FÁRMACOS

La bioinformática, una disciplina interdisciplinaria que integra varios campos de la ciencia como la biología, la bioquímica, la física, la química, junto con disciplinas como la informática y la estadística, ha

emergido como una herramienta poderosa en el diseño de fármacos en la era moderna. Por lo general, el desarrollo e investigación de un fármaco ronda los 15 años y requiere una inversión promedio aproximada de 2.5 millones de dólares. Esto se debe a la alta tasa de fracaso de moléculas en una o en varias etapas del desarrollo (Figura 1) debido a sus pobres propiedades farmacocinéticas y alta toxicidad (Saldívar-González *et al.*, 2017).

Asimismo, las herramientas bioinformáticas son fundamentales para el diseño racional de fármacos, y permiten analizar estructuras químicas (obtenidas de plantas medicinales o sintetizadas) mediante técnicas como el acoplamiento molecular (*docking*) y la dinámica molecular. A través de estas técnicas, los científicos pueden observar la conformación y orientación de aquellas moléculas que son termodinámicamente más estables, así como visualizar el tipo de interacciones que se producen y el tamaño de la cavidad del sitio de unión, lo que permite predecir cómo se unirá un compuesto a su blanco terapéutico. Otras herramientas, como el empleo de modelos de relación cuantitativa entre estructura y actividad (QSAR, *Quantitative Structure-Activity Relationship*), permiten predecir posibles moléculas candidatas mediante la correlación de propiedades químicas con la actividad biológica. Además, mediante el modelado del farmacóforo, se puede optimizar la estructura química para mejorar su afinidad y selectividad (Scior *et al.*, 2012, Saldívar-González *et al.*, 2017).

Una notable ventaja del uso de dichos métodos y herramientas es que una buena parte de las licencias de los programas están disponibles de forma gratuita, lo que facilita su acceso (Gastaiger *et al.*, 2003). No obstante, el desafío radica en la interpretación de los resultados y en la necesidad de contar con un *hardware* adecuado y eficiente. Es así como la bioinformática ofrece enfoques innovadores y eficaces para la identificación y el desarrollo de nuevos medicamentos. Esto permite el diseño de fármacos más específicos y efectivos, minimizando los efectos secundarios no deseados y maximizando el potencial terapéutico (Scior *et al.*, 2008; Scior *et al.*, 2012. Así, esta disciplina ha revolucionado la forma en que se descubren y diseñan fármacos, acelerando el proceso

y mejorando las tasas de éxito en el desarrollo de terapias efectivas. Como resultado, en la actualidad existen fármacos desarrollados con la ayuda de métodos computacionales que ya se encuentran en uso clínico, tal es el caso de captopril, empleado para el tratamiento de hipertensión; tipranavir, indicado para tratamiento del SIDA; oseltamivir, para la influenza; y el boceprevir para hepatitis C, entre otros (Medina-Franco, 2007; Saldívar-González *et al.*, 2017).

Además, en los últimos años diversos grupos de investigación trabajan para identificar compuestos provenientes de plantas medicinales con actividad biológica, aportando mayor conocimiento a este campo (Guzmán *et al.*, 2017). A pesar de sus numerosas ventajas, la bioinformática también presenta desafíos y limitaciones en el diseño de fármacos. La interpretación de datos biológicos puede ser compleja y requerir experiencia en múltiples disciplinas, y la predicción de la actividad de los compuestos químicos a menudo se basa en modelos simplificados que pueden no representar completamente la complejidad de los sistemas biológicos (Scior *et al.*, 2012).

Además, la validación experimental de predicciones computacionales sigue siendo crucial para garantizar la eficacia y seguridad de los fármacos diseñados mediante enfoques bioinformáticos.

CONCLUSIÓN

La convergencia de la medicina tradicional y la bioinformática en el desarrollo de medicamentos resulta crucial debido a su impacto en la optimización del diseño de fármacos y de su potencial para hacernos avanzar hacia una medicina más personalizada y precisa. Sin embargo, la necesidad de regulación en el uso de plantas medicinales en la medicina tradicional mexicana, debida a la deficiente fundamentación científica y a la falta de garantías de seguridad y eficacia, plantea riesgos y limitaciones. En consecuencia, al combinar el conocimiento ancestral con las herramientas computacionales, podemos aprovechar el potencial terapéutico de la naturaleza de manera más eficiente y precisa que nunca. Este enfoque integrador



© Enrique Soto. Evacuación, Caixa Forum, Madrid, 2023.

promete revolucionar la forma en que tratamos las enfermedades. La experiencia de Asia y Europa, donde las plantas medicinales se han identificado como medicamentos y están definidas en la farmacopea, muestra el potencial de esta integración. Esto ofrece una ventaja significativa en la farmacoterapia, donde la seguridad, eficacia y calidad de los medicamentos son rigurosamente evaluadas antes de su aprobación para uso clínico. La convergencia entre la medicina tradicional y la bioinformática ofrece actualmente un potencial empleo en la farmacoterapia, al combinar el conocimiento ancestral y los avances de la ciencia, con las últimas innovaciones tecnológicas.

REFERENCIAS

- Gasteiger E, Gattiker A, Hoogland C, Ivanyi I, Appel RD and Bairoch A (2003). ExPASy: the proteomics server for in-depth protein knowledge and análisis. *Nucleic Acids Res.* 31:3784-3788. Servidor: <https://www.expasy.org/>.
- Guzmán Maldonado SH, Díaz Huacuz RS y González Chavira MM (2017). Plantas medicinales la realidad de una tradición ancestral. SAGARPA, *Folleto Informativo* Núm. 1. Recuperado de: https://vun.inifap.gob.mx/VUN_MEDIA/BibliotecaWeb/_media/_folletoinformativo/1044_4729_Plantas_medicinales_la_realidad_de_una_tradici%C3%B3n_ancestral.pdf.
- Hefti FF (2008). Requirements for a lead compound to become a clinical candidate. *BMC Neuroscience* 9 (Suppl 3):S7.
- Medina-Franco JL (2007). Aplicaciones exitosas del diseño de fármacos utilizando métodos computacionales. *Ciencia* (México) 59(1):1-8.
- Menéndez EL (2022). Orígenes y desarrollo de la medicina tradicional: una cuestión ideológica. Recuperado de: <https://www.scielosp.org/pdf/scol/2022.v18/e4225/es>.
- Prieto-Martínez FD y Medina-Franco JL (2018). Diseño de fármacos asistido por computadora: cuando la informática, la química y el arte se encuentran. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 21(2):e201826.
- Saldívar-González F, Prieto-Martínez FD y Medina-Franco JL (2017). Descubrimiento y desarrollo de fármacos: un enfoque computacional. *Educación Química* 28(1):51-58.
- Scior T, Bender A, Tresadern G, Medina-Franco J, Martínez K, Langer T, Cuanalo-Contreras K and Agrafiotis D (2012). Recognizing Pitfalls in Virtual Screening: A Critical Review. *Journal of Chemical Information and Modeling* 52(4):867-81.
- Scior T, Sánchez G y Lozano-Aponte J (2008). La planta medicinal: una auténtica planta química (parte II), *Informacéutico* 15(1):15-26.
- Itzel Gutiérrez-Aztatzi**
Posgrado en Ciencias-Microbiología, ICUAP
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
itzel.gutierrezaztatzi.icuap@viep.com.mx
- Thomas Scior**
Laboratorio de Simulaciones
Computacionales Moleculares
Departamento de Farmacia
Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Hipomineralización en dientes deciduos y permanentes

Erika Vianney **Rosales Hinojosa**
Julieta Sarai **Becerra Ruiz**

El término hipomineralización se refiere, en los órganos dentarios, a un defecto en la estructura del esmalte que se puede originar desde el final del embarazo de la madre hasta los primeros 4 años de edad. Esto se debe a estímulos sistémicos y genéticos que pueden actuar en conjunto provocando alteraciones durante las fases en las que se desarrolla el esmalte de los dientes. Que el defecto se manifieste clínicamente en la cavidad oral dependerá de la duración, la fuerza y el momento en que se presenten estos estímulos; además, su grado de severidad puede variar (Silva *et al.*, 2016).

Cuando un diente tiene hipomineralización se pueden observar opacidades o manchas que van desde el color blanco opaco hasta un amarillo o marrón, y pueden o no ir acompañadas de hipersensibilidad dental. Además, el esmalte de estos dientes es muy propenso a presentar fracturas, lesiones de caries y pérdidas prematuras ya que, al tener menos minerales en su estructura, se vuelve más poroso, débil y difícil de mantener en buenas condiciones (Negre-Barber *et al.*, 2018).

Este defecto se observa principalmente en molares e incisivos permanentes, por lo que se ha denominado *hipomineralización molar incisivo* (HMI) o hipomineralización incisivo molar; sin embargo, también se presenta en segundos molares temporales y en otros dientes

permanentes como premolares o segundos molares (Sosa-Soto *et al.*, 2022).

Últimamente, las hipomineralizaciones se presentan con mayor frecuencia en la consulta odontológica y se han vuelto un gran desafío para los profesionales de la salud oral, especialmente para los odontopediatras, ya que son los encargados de cuidar la salud dental y oral tanto de los niños como adolescentes.

Esta condición dental puede causar problemas funcionales, estéticos y psicológicos, por lo que resulta primordial que nuestra población esté informada sobre este defecto, ya que su detección y diagnóstico temprano permitirá un manejo adecuado y preventivo para posibles complicaciones (Bussanelli *et al.*, 2022).

EPIDEMIOLOGÍA

Se han reportado prevalencias de casos de HMI a nivel mundial que oscilan de un 3 % a un 22 % con diferencias entre países y regiones. En el continente americano se ha reportado una prevalencia del 15.3 % (Lopes *et al.*, 2021).

En México se han reportado datos de diferentes estados de la república y se han obtenido prevalencias diferentes, como se puede observar en la Tabla 1; esto puede deberse a que la HMI es de etiología multifactorial, lo que quiere decir que para

su desarrollo intervienen distintos factores, entre ellos los genéticos y los ambientales como, por ejemplo, la exposición a toxinas.

Este defecto del esmalte puede afectar tanto a la dentición permanente como a la temporal, ya que los ameloblastos, que son las células encargadas de la formación del esmalte, son muy sensibles y se ven comprometidos ante cualquier estímulo, sea local o sistémico (Bussanelli *et al.*, 2022).

Los factores causantes de HMI aún no se determinan por completo; existen diferentes hipótesis sobre su etiología de las cuales se infieren las alteraciones que pueden ocurrir durante el embarazo y los primeros cuatro años de vida.

Estas pueden ser, por ejemplo, enfermedades durante la primera infancia y sus consecuencias (como la fiebre), medicamentos ingeridos en el primer año de vida (principalmente antibióticos), entre otras (Bekes, 2021).

En diversos estudios se ha reportado una correlación entre HMI y bajo peso al nacer, parto por cesárea, parto prematuro o complicaciones durante el mismo (Lygidakis *et al.*, 2022).

Una vez que el bebé nace y durante sus primeros años de vida, los principales factores que pueden causar este defecto son: enfermedades como sarampión, infección del tracto urinario, bronquitis, otitis, neumonía y asma, entre otras (Tabla 2) (Lygidakis *et al.*, 2022).

Estado	Muestra total	Edad (años)	Prevalencia (%)
Baja California Norte	446	6-12	2.2
Ciudad de México	1156	6-12	15.8
Estado de México	411	8-12	40.4
Jalisco	400	6-12	36.0
San Luis Potosí	613	8	12.4
Nayarit	384	8-12	15.9
Tabasco	195	0-15	8.7

Tabla 1. Estados de la república donde se han reportado prevalencias de HMI.

Prenatales	Perinatales	Posnatales (hasta los 4 años)
Enfermedades maternas	Parto prematuro o cesárea	Contaminantes ambientales
Exposición a toxinas (tabaquismo o alcohol)	Ausencia de lactancia materna	Enfermedades como sarampión, bronquitis, otitis, neumonía, asma, fiebres altas, infección del tracto urinario
Fiebre durante el embarazo	Bajo peso al nacer	Uso de antibióticos

Tabla 2. Factores etiológicos de HMI (Bekes, 2021; Lygidakis *et al.*, 2021).

FISIOPATOLOGÍA DE LA HIPOMINERALIZACIÓN

Según ciertos autores, el desarrollo de esta afección comienza por un desequilibrio que ocurre principalmente durante la fase de maduración de los ameloblastos, pero cuando estos, que son células muy sensibles a cualquier estímulo, se encuentran amenazados, comienzan a tener una secreción alterada de proteínas que puede llegar a causar la muerte de algunos de ellos; así, clínicamente, el esmalte se manifestará con defectos cualitativos que podrán observarse como opacidades bien delimitadas, de colores que van desde el blanco opaco hasta el amarillo o marrón. El defecto en la estructura del esmalte se debe a la disminución de los componentes inorgánicos y a una mineralización disminuida.

TRATAMIENTOS PARA HMI

Existen diversas opciones terapéuticas y cada una representa un reto debido a la variabilidad en la apariencia clínica y a las necesidades individuales de tratamiento. La elección de la opción adecuada debe hacerse de manera individual, considerando la gravedad de las lesiones, los síntomas del órgano dentario afectado, la edad y las expectativas del paciente o sus tutores.

Existen tratamientos preventivos y correctivos para atender las hipomineralizaciones. Dentro de los tratamientos preventivos, algunos ejemplos son el empleo de pastas dentales que contengan CCP-ACP (fosfopéptido de la caseína con calcio y fosfato amorfo), el uso de selladores de fosas y fisuras como manejo preventivo de fracturas pos eruptivas

o lesiones de caries atípicas; o bien, el empleo de fluoruro de amino de plata que, además de funcionar como cariostático, ayuda a disminuir la hipersensibilidad; todos estos compuestos ayudarán a prevenir fracturas pos eruptivas, el desarrollo de lesiones cariosas y, además, contribuirán a disminuir la hipersensibilidad que este defecto de estructura del esmalte puede llegar a provocar en la mayoría de los casos.

Cuando se trata de casos más severos, debemos de proceder al uso de tratamientos restauradores, como pueden ser las restauraciones con ionómeros de vidrio, ionómeros de vidrio modificados con resina o con partículas de zirconia, el uso de resinas compuestas u otros materiales de restauración, según sea el caso; también podemos recurrir al uso de coronas de acero-cromo, restauraciones indirectas, entre otros, o bien considerar la extracción del órgano dentario severamente afectado, siempre y cuando contemos con los requisitos ortodóncicos adecuados para un manejo oportuno posterior a la extracción. En su mayoría, estos tratamientos nos permitirán devolver la estructura del diente que se perdió en un 100 %, además de mantener su salud y función.

Debido a que el esmalte hipomineralizado cuenta con propiedades mecánicas más bajas además de valores disminuidos en dureza y módulo de elasticidad, todo ello podría considerarse limitante al momento de decidir cuál material de restauración es el ideal para llevar a cabo un tratamiento exitoso (Elhennawy y Schwendicke, 2016).

Dentro de los efectos secundarios de estos tratamientos es importante considerar el ciclo restaurador repetitivo, ya que el esmalte hipomineralizado, al ser más poroso y poseer una menor cantidad de mineral, impide una correcta adhesión, por lo que es importante realizar una remoción completa del esmalte dañado para asegurar mayor longevidad a la restauración, con lo que se evitan restauraciones atípicas y se pone en consideración la rentabilidad en la toma de decisiones clínicas bien fundamentadas.

OTRAS CONDICIONES QUE AFECTAN LA ESTRUCTURA DENTAL

Existen otros defectos en el esmalte que pueden llegar a confundirse con HMI debido a que también se presentan clínicamente como manchas en los dientes. Los defectos a considerar son:

1. La amelogenénesis imperfecta, una enfermedad genética que afecta la estructura del esmalte, en la que los dientes son pequeños y quebradizos.
2. La fluorosis dental, que es más frecuente en los dientes permanentes que en los dientes de leche y en la que los dientes muestran decoloraciones como manchas blancas que pueden estar acompañadas de pequeñas estrías; se debe al consumo excesivo de fluoruro durante el periodo de formación del diente. La fluorosis no afecta la función del diente ni causa dolor (Ortiz-Madaleno y Pozos-Guillen, 2024).
3. La hipoplasia del esmalte, que es un defecto de desarrollo caracterizado por una menor cantidad de esmalte dental de lo normal. En las hipoplasias, los dientes más afectados son los incisivos y los caninos superiores (Almulhim, 2021).

Debido a que existen muchos cambios en el aspecto del esmalte dental, es recomendable acudir a consulta odontológica, o con un especialista, para obtener un diagnóstico certero con la finalidad de recibir el tratamiento adecuado que mejore la calidad de vida de las personas que padecen cualquiera de estas situaciones.

CONCLUSIÓN

La HMI afecta principalmente a uno o más primeros molares permanentes y puede o no afectar a los incisivos permanentes. Las principales causas de la hipomineralización son factores ambientales, biológicos y sistémicos.

En este defecto del esmalte existe una disminución de los componentes inorgánicos y una escasa mineralización, lo que aumenta la posibilidad de desarrollar caries dental e hipersensibilidad. Además, los dientes con hipomineralización son más propensos a quebrarse.

Es importante diferenciar esta patología de otras condiciones que afectan también la estructura del esmalte. Debido al aumento de la prevalencia de esta afección en años recientes, es necesaria una mejor comprensión por parte de la población de los aspectos involucrados en ella y en otros defectos del esmalte dental.

El conocimiento del tema podría incitar a la población a acudir a consultas dentales y a ejercer

© Enrique Soto. *Desayuno jarocho*, Veracruz, ca. 1974.





© Enrique Soto. Pescadores, Anton Lizardo, Veracruz, ca. 1975.

medidas preventivas y de protección adecuadas con la finalidad de aumentar su calidad de vida.

REFERENCIAS

- Almulhim B (2021). Molar and Incisor Hypomineralization. *J Nepal Med Assoc* 59(235):295-302.
- Bekes K (2021). *Molar incisor hypomineralization: A clinical guide to diagnosis and treatment*. Vienna, Austria: Springer Nature.
- Bussanelli DG, Vieira AR, Santos-Pinto L and Restrepo M (2022). Molar-incisor hypomineralisation: an updated view for aetiology 20 years later. *Eur Arch Paediatr Dent* 23(1):193-198.
- Elhennawy K and Schwendicke F (2016). Managing molar-incisor hypomineralization: A systematic review. *J Dent* 55:16-24.
- Lopes LB, Machado V, Mascarenhas P, Mendes JJ and Botelho J (2021). The prevalence of molar-incisor hypomineralization: a systematic review and meta-analysis. *Sci Rep* 11(1):22405.
- Lygidakis NA, Garot E, Somani C, Taylor GD, Rouas P and Wong FSL (2022). Best clinical practice guidance for clinicians dealing with children presenting with molar-incisor-hypomineralisation (MIH): an updated European Academy of Paediatric Dentistry policy document. *Eur Arch Paediatr Dent* 23(1):3-21.
- Negre-Barber A, Montiel-Company JM, Catalá-Pizarro M and Almerich-Silla JM (2018). Degree of severity of molar incisor hypomineralization and its relation to dental caries. *Sci Rep* 8(1):1248.
- Ortiz-Magaleno M y Pozos-Guillén A (2024). Flúor en el agua: riesgos y beneficios para la salud. *Elementos* 135:41-48. <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000009964.pdf>.
- Silva MJ, Scurrah KJ, Craig JM, Manton DJ and Kilpatrick N (2016). Etiology of molar incisor hypomineralization-A systematic review. *Community Dent Oral Epidemiol* 44(4):342-353.
- Sosa-Soto J, Padrón-Covarrubias AI, Márquez-Preciado R, Ruiz-Rodríguez S, Pozos-Guillén A, Pedroza-Urbe IM and Garrocho-Rangel A (2022). Molar incisor hypomineralization (MIH): prevalence and degree of severity in a Mexican pediatric population living in an endemic fluorosis area. *J Public Health Dent* 82(1):3-10.

Erika Vianney Rosales Hinojosa
Julieta Sarai Becerra Ruiz
Departamento de Clínicas
Centro Universitario de Los Altos
Universidad de Guadalajara
julieta.becerra@academicos.udg.mx



© Enrique Soto. *Luna de miel*, Veracruz, ca. 1973.

No puedo comer...

Los trastornos temporomandibulares

Irene Aurora **Espinosa de Santillana**
Elena Aurora **Popoca Hernández**

¿Alguna vez has tenido dolor al masticar? ¿Alguna vez has escuchado un ruido como un clic al momento que abres o cierras la boca? O peor aún, ¿te has quedado bloqueado o trabado sin poder abrir o cerrar la boca? Si respondiste afirmativamente a alguna de las preguntas anteriores, podrías padecer de trastornos temporomandibulares.

¿QUÉ SON LOS TRASTORNOS TEMPOROMANDIBULARES?

Los trastornos temporomandibulares (TTM) son un conjunto de problemas que afectan a la articulación y a varios músculos encargados principalmente de realizar las funciones de masticar, hablar, tragar, etcétera (Dworkin *et al.*, 1992).

LA ARTICULACIÓN

La articulación afectada por estos trastornos se llama articulación temporomandibular (Figura1), se ubica por delante de los oídos y es una “bisagra” que nos permite abrir y cerrar la mandíbula, además de realizar todos los movimientos necesarios para ejecutar la formación de un bocado y poderlo tragar. Lleva ese nombre porque une dos huesos de la cabeza; el hueso temporal; que se encuentra por arriba de las orejas, y la mandíbula.

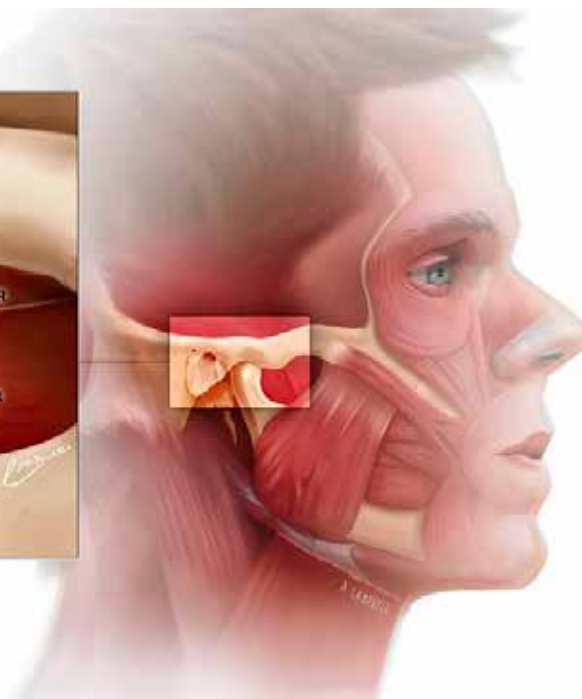
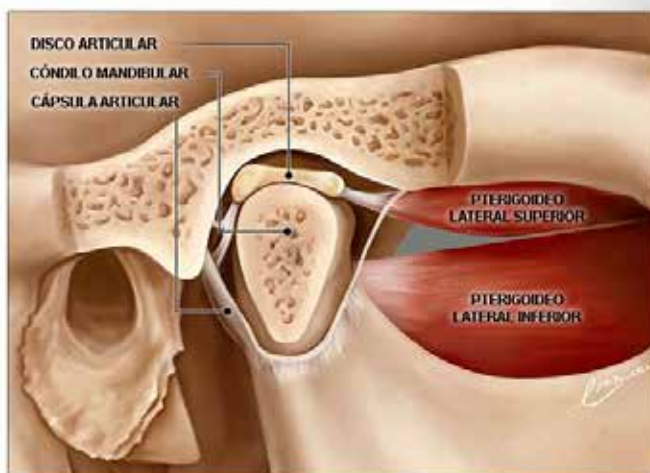


Figura 1. Anatomía de la articulación temporomandibular; está conformada por dos huesos, el temporal y la mandíbula. En medio de esos dos huesos se encuentra el disco articular, el cual amortigua los movimientos de ambos para que se desplacen y no se lastimen. (Imagen modificada a partir del original de la Universidad de Dundee.)

La forma de trabajar de esta articulación es complicada porque cualquier movimiento que realiza la articulación del lado derecho, como masticar un bocado, repercute en la articulación del lado izquierdo; es decir, ambas trabajan de manera simultánea. Uno de los problemas principales con esta articulación es que, entre esos dos huesos, el temporal y la mandíbula, se encuentra un disco articular. Este disco es un cojín que permite que los dos huesos se desplacen entre sí sin rozar entre ellos y sin lastimarse.

LOS MÚSCULOS

Por otro lado, cuando existe algún trastorno temporomandibular, también pueden estar involucrados algunos músculos, particularmente los músculos llamados de la masticación.

Los músculos de la masticación son cuatro, y su misión principal es darle fuerza al acto de masticar; es decir, cuando cortamos algún alimento de consistencia dura o masticamos carne fibrosa y debemos

hacerlo con fuerza, esa fuerza la proporcionan los músculos de la masticación. (Figura 2)

OTRAS PARTES AFECTADAS

Es importante mencionar que cuando padecemos de trastornos temporomandibulares, también se pueden afectar estructuras como algunos de los ligamentos de la articulación.

La función de estos ligamentos es limitar los movimientos de la mandíbula para que esta no se lastime. Un ejemplo de lo anterior es el hecho de que cuando intentamos abrir la boca ampliamente, sentimos una molestia o dolor que probablemente se origina en uno de los ligamentos de la articulación que nos protege para no lastimarnos (Lelis *et al.*, 2023).

POR QUÉ SE PRESENTAN LOS TTM

Las causas de que se presenten los trastornos temporomandibulares son muy variadas. Los autores expertos en el tema las han clasificado en tres tipos de factores.

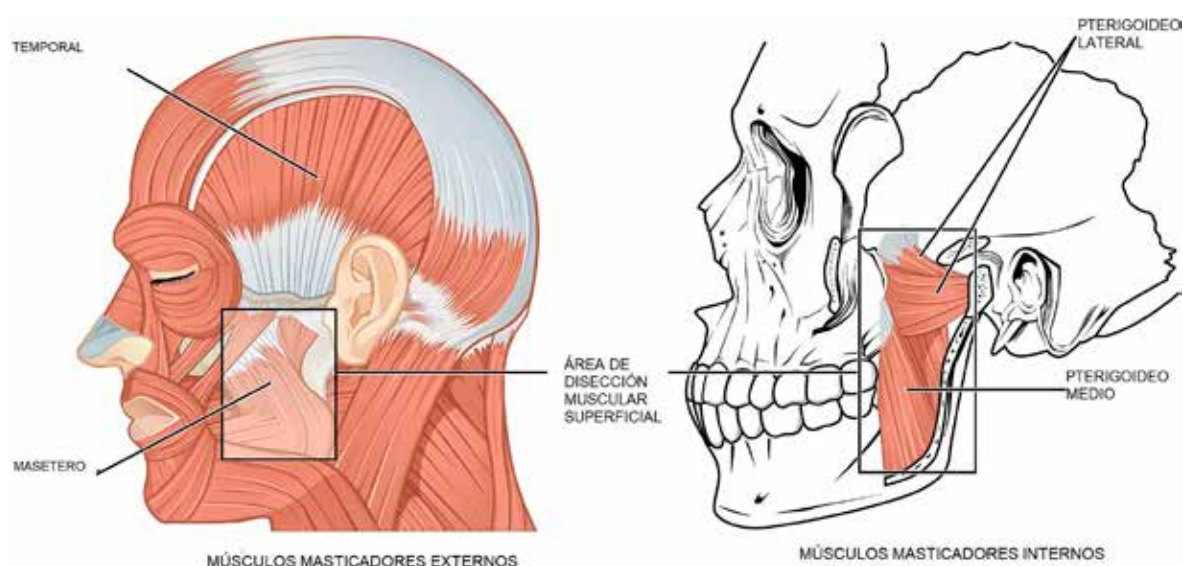


Figura 2. Músculos de la masticación involucrados con el funcionamiento de la articulación temporomandibular. En la zona más profunda se observan los músculos pterigoideos, y sobre estos, los músculos masetero y temporal. Todos estos músculos permiten apretar la mandíbula para realizar la masticación. (OpenStax, CC BY 4.0, vía Wikimedia Common.)

1. *Emocionales.* Cuando una persona está sometida a estados emocionales como el estrés, la ansiedad, la depresión, etc., de forma voluntaria o involuntaria tensa los músculos en general, y particularmente los de la masticación. Lo anterior es denominado bruxismo, que es el hecho de apretar o rechinar los dientes sin ninguna función fisiológica y por tiempo prolongado, lo que provoca que las fibras musculares se fatiguen y que se presenten dolores en las regiones anatómicas relacionadas, algo parecido al dolor que se siente después de hacer ejercicio extremo. Adicionalmente, al generarse fuerza muscular excesiva, la articulación, específicamente el disco articular, se afecta y, como consecuencia, podría ser desplazado de su lugar o podría perforarse por efecto de la fuerza aplicada (Seitenfus *et al.*, 2022).

2. *Biológicos o físicos.* Dentro de estos factores están consideradas las enfermedades sistémicas articulares como la artritis, o las musculares como la fibromialgia. Además, en el caso de las mujeres, las hormonas (estrógenos) juegan un papel muy importante en el padecimiento de los TTM. Por otro lado, las formas incorrectas en que se relacionan los dientes de la arcada superior e inferior, lo que se conoce como maloclusión, también es un factor que aumenta el riesgo de padecer TTM,

aunque esto ha generado mucha controversia entre los expertos debido a que hay muchas personas con maloclusiones que no presentan trastornos temporomandibulares y viceversa. Las posturas inadecuadas sostenidas por periodos prolongados durante las actividades diarias como el estudio, el trabajo y aun el descanso, también se han asociado con los TTM. Finalmente, los traumas mayores, por ejemplo, golpes directos sobre la mandíbula o la articulación, es decir, delante del oído, como los recibidos al practicar cualquier deporte de contacto o en accidentes automovilísticos; o menores, como los producidos por amalgamas o resinas colocadas de forma inadecuada (Huang *et al.*, 2002).

3. *Sociales.* Por último, pero no de menor importancia, están los factores sociales. Estos incluyen aspectos como las relaciones, ya sea laborales, familiares, de pareja, etc., o problemas de tipo económico que afectan la búsqueda de ayuda médica oportuna y eficaz (Quinteromarmol-Juárez *et al.*, 2008).

En resumen, los TTM se presentan como resultado de una suma de factores que influyen para que, finalmente, se presente dolor, ruidos y limitaciones en funciones como masticar, hablar, tragar, bostezar, etcétera.

SIGNOS Y SÍNTOMAS DE LOS TTM

• Ruidos

Los TTM se acompañan de algunos signos, que son aquellas manifestaciones evidentes para el paciente, pero también para el profesional. Los ruidos pueden ser de dos tipos:

a) Un chasquido que generalmente se presenta al abrir ampliamente o cerrar la boca, o incluso en los movimientos hacia los lados de la mandíbula. Este ruido se presenta porque el disco articular se desplaza de su sitio. Lo raro es que esto ocurre no cuando se abre la mandíbula, que sería lo más lógico, sino cuando se cierra, y particularmente cuando se cierra con fuerza, como en los estados estresantes o angustiantes. Cada vez que el disco sale o regresa a su posición adecuada, se presenta el chasquido y este puede acompañarse, o no, de dolor.

b) Arrastre o crepitación, que se presenta en los casos crónicos. Este ruido se presenta cuando el disco articular se quedó fuera de su sitio y en consecuencia los huesos rozan directamente. Puede, o no, acompañarse de dolor.

• Dolor

Los TTM también se acompañan de algunos síntomas (manifestaciones clínicas que son percibidas únicamente por el paciente) como el dolor. Este puede presentarse sobre la articulación temporomandibular, es decir, delante o incluso dentro del oído, por lo que frecuentemente se confunde con problemas originados en este último. El dolor también puede presentarse sobre los músculos encargados de la fuerza de masticación. Ocasionalmente, el dolor se presenta sobre el músculo temporal, que se ubica en las sienes, y se manifiesta como dolor de cabeza, cuya característica es que se presenta posteriormente al inicio de la masticación o al hablar por tiempo prolongado, por lo que afecta la calidad de dichas actividades (Estallo-Villuendas *et al.*, 2021).

• Limitación de las funciones

La tercera manifestación de importancia de los TTM es la limitación funcional; es decir, el paciente presenta dificultad para cortar con los dientes alimentos

como una manzana, un pan grande o cualquier alimento que implique abrir la boca con cierta amplitud y al mismo tiempo hacer fuerza con los músculos para dividirlo. También pudiera presentar dolor al masticar los alimentos (particularmente los que son más duros, como las carnes rojas o los vegetales fibrosos) o al masticar por tiempos prolongados (goma de mascar, por ejemplo). Cuando el paciente tiene un TTM severo o crónico, puede tener problemas para hablar, bostezar e incluso para deglutir o tragar saliva, lo cual afecta su calidad de vida (Espinosa *et al.*, 2019).

¿QUIÉNES PADECEN TTM?

Los trastornos temporomandibulares son actualmente un problema extremadamente común. Los investigadores han encontrado que alrededor del 25 % y hasta el 60 % de la población en general ha presentado alguna vez en su vida signos y síntomas de TTM. Estudios recientes posteriores a la pandemia han encontrado que los TTM se presentan con mayor frecuencia que antes de ella, particularmente en la población adolescente y juvenil. Lo anterior posiblemente se explique debido a las múltiples reacciones psicológicas adversas que generaron miedo excesivo, ansiedad y depresión por la pandemia del COVID-19 (Meneses-Rivadeneira, 2022).

La edad más común en la que se presentan los TTM es alrededor de los 40 años, con explicaciones muy variadas como el estado emocional, las hormonas, la exposición a los accidentes, etcétera. Sin embargo, es muy importante tener claro que los niños, los adolescentes y los adultos mayores no están libres de estos padecimientos. Con respecto al sexo, también es cierto que las mujeres padecen con mayor frecuencia de TTM debido a aspectos hormonales, específicamente los estrógenos, hormonas presentes en las mujeres en edad reproductiva. De acuerdo con el periodo del ciclo menstrual en el que se encuentren, serán más susceptibles de presentar TTM. Por otro lado, también es cierto que las mujeres presentan condiciones emocionales muy diferentes a las de los hombres, lo cual podría también explicar las diferencias en las frecuencias



© Enrique Soto. Calpan, Puebla, ca. 1980.

con las que las mujeres y los hombres sufren de TTM (Magnusson *et al.*, 2000).

Es necesario resaltar que, independientemente de la edad o el sexo, los pacientes que sufren de TTM ven afectada su calidad de vida y tienen, como consecuencia, estados emocionales negativos que cerrarán el círculo vicioso del padecimiento.

EL DIAGNÓSTICO

Como hemos mencionado, los TTM tienen un origen multifactorial. Por ello, en ocasiones, su diagnóstico no es fácil y suele confundirse con otros padecimientos como los problemas del oído, las migrañas, las neuralgias e incluso dolores de dientes. Por ello, es necesario estar pendiente. Cuando se han tenido dolores constantes por delante o dentro del oído, en la cabeza, particularmente en las sienes o en la mandíbula, cuando se dificulta masticar o cortar alimentos con los dientes, o se escuchan ruidos al mover la mandíbula, ya sea al abrirla, cerrarla o moverla hacia los lados, muy probablemente se trata de TTM. Para confirmarlo o descartarlo, se debe acudir con un profesional de la salud que puede ser

el estomatólogo general o el médico familiar, quien luego de una revisión decidirá si puede tratar el trastorno o debe enviar al paciente con un especialista de la salud bucal.

Para hacer un diagnóstico certero, es necesario recopilar algunas preguntas relacionadas con el dolor que el paciente haya experimentado días, semanas o incluso meses antes, ya sea en la articulación o en los músculos de la zona. También se debe investigar si el paciente ha percibido ruidos al mover la mandíbula y si hay dificultades para realizar las funciones de masticar, comer, hablar, tragar, etcétera. Además, será necesaria una revisión clínica detallada para confirmar o descartar los signos y síntomas que en conjunto darían como resultado un diagnóstico de TTM.

Normalmente, el diagnóstico es clínico, es decir, con la información reunida con las preguntas y la revisión del profesional en una consulta. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario solicitar algunos estudios como radiografías, tomografías o incluso otros más sofisticados, como imágenes de



© Enrique Soto. *San Miguel Canoa*, Puebla, ca. 1974.

resonancia magnética, además de algunos estudios de laboratorio que confirmen o descarten el diagnóstico (Tirado, 2015).

EL TRATAMIENTO

El tratamiento para los TTM es un reto para el estomatólogo u odontólogo. Como se vio en los párrafos anteriores, sus causas son muchas y, para tratar adecuadamente al paciente con TTM, es necesario identificarlas.

Inicialmente es indispensable conocer el estado emocional del paciente, esto puede hacerse con sencillas preguntas que pudieran sacar a la luz que el paciente debe ser valorado también por un profesional de la salud mental. Los casos de mayor éxito en el tratamiento de los TTM son aquellos que se tratan con la participación conjunta de los especialistas necesarios, dentro de los que destacan los psicólogos y los psiquiatras. Otro especialista que aporta mucho al tratamiento de los TTM es el fisioterapeuta, que se encargará de la valoración de la salud postural que pudiera condicionar algunos síntomas del padecimiento, así como de manejar las terapias necesarias, como la relajación, para tratar las contracturas múltiples de los músculos involucrados en el padecimiento.

Por supuesto que el odontólogo debe vigilar la salud bucal, es decir valorar los malos hábitos como cortarse las uñas con los dientes, cortar hilos o cintas adhesivas, morder lápices o lapiceros, o masticar goma de mascar por mucho tiempo. Una buena evaluación bucal permitirá detectar los signos característicos de estos hábitos perniciosos que dañan el aparato de la masticación.

El uso de una férula de reposo, que es un dispositivo removible, es decir, que se coloca y se retira voluntariamente de la boca, ha producido excelentes resultados en los pacientes con TTM. La construcción de dicho dispositivo puede ser realizada por el odontólogo general o cualquier especialista de la salud bucal, quien también establecerá el horario, las indicaciones de uso, de higiene y desinfección del dispositivo, así como su control cada determinado tiempo. Vigilar una oclusión adecuada, o lo que es igual, mantener una buena relación entre los dientes de la arcada superior y los de la inferior es muy conveniente, independientemente del papel controversial que tiene la oclusión en el padecimiento de los TTM. Otra responsabilidad del especialista es vigilar que las restauraciones (resinas, amalgamas, prótesis, etc.) sean colocadas en la boca del paciente sin ningún contacto prematuro, es decir, el paciente no debe sentirla alta o que toca antes con el diente con el que mastica, lo que provocará dolor a nivel de la articulación



© Enrique Soto. San Miguel Canoa, Puebla, ca. 1974.

y de la musculatura antes de que logre ajustarla. Asimismo, debe evitarse que el paciente mantenga la boca muy abierta por tiempo prolongado, sin periodos de descanso. Esta mala práctica ocasionará que la articulación con todas sus estructuras y músculos sufra daños que hubiera sido muy fácil evitar.

CONCLUSIÓN

La dificultad para masticar y otras limitaciones del aparato masticador pueden ser consecuencia de padecimientos como los TTM. Es necesario conocer cuáles son sus factores de riesgo, o lo que es lo mismo, qué es lo que debemos evitar para disminuir la probabilidad de desarrollarlos. También es necesario conocer sus signos y síntomas para acudir oportunamente con un profesional que confirme o descarte el diagnóstico. En caso de tener TTM, deben seguirse las indicaciones del tratamiento para evitar complicaciones que comprometan la calidad de vida.

REFERENCIAS

- Dworkin SF and LeResche L (1992). Research diagnostic criteria for temporomandibular disorders: review, criteria, examinations and specifications, critique. *Journal Craniomandibular Disorder* 6:301-355.
- Espinosa IA, Álvarez J y Romero T (2019). Calidad de vida en los adultos mayores con trastornos temporomandibulares. *Revista de Información Científica* 98:319-331.

Estallo J y Mendoza M (2021). Relación entre los trastornos temporomandibulares y las cefaleas: revisión bibliográfica. *Cuestiones de Fisioterapia* 50:70-83.

Huang GJ, LeResche L, Critchlow CW, Martin MD and Drangsholt MT (2002). Risk Factors for Diagnostic Subgroups of Painful Temporomandibular Disorders (TMD). *Journal of Dental Research* 81:284-8.

Lelis LR, Dos Santos I and Freitas AP (2023). Temporomandibular joint: from anatomy to internal derangement. *Radiologia Brasileira* 56:102-9.

Magnusson T, Egermark I and Carlsson GE (2000). A Longitudinal Epidemiologic Study of Signs and Symptoms of Temporomandibular Disorders from 15 to 35 Years of Age. *Journal of Orofacial Pain* 14:310-9.

Meneses L (2022). Desórdenes temporomandibulares durante la pandemia por el COVID-19. *Diagnóstico* 61:27-32.

Quinteromarmol M, Espinosa IA, Martínez J y Vargas H (2008). Trastornos temporomandibulares y funcionamiento familiar. *Revista Médica del IMSS* 46:473-8.

Seitenfus D, Saram P and Pascoal M (2022) Depression, somatization, and sleep disorders as risk factors for temporomandibular disorders development: a population-based case-control study. *PSICO* 53:1-12.

Tirado LR (2015). Trastornos temporomandibulares: algunas consideraciones de su etiología y diagnóstico. *Revista Nacional de Odontología* 11:83-93.

Irene Aurora Espinosa de Santillana
Elena Aurora Popoca Hernández
Facultad de Estomatología
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
irene.espinosa@correo.buap.mx



Bancos de semillas: tesoros genéticos de los humedales

Carmen Zepeda Gómez
Javier Manjarrez

Escondidos en el fango y como promesas silenciosas de vida futura, los tesoros latentes de las hijas del pantano esperan pacientemente dormidas, aguardando su momento para brotar y regenerar el verde del reino inundado.

Carmen Zepeda Gómez

También conocidos como pantanos, ciénegas o marismas, los humedales son uno de los ecosistemas más productivos del planeta y de los que obtenemos múltiples bienes y servicios.

Ya sea marinos, costeros, continentales o artificiales, los humedales se caracterizan porque son espacios que se cubren de agua permanente o intermitentemente, y porque en ellos se desarrolla una flora y fauna adaptada a la inundación.

Se trata de ecosistemas que actualmente abarcan entre 4 y 6 % de la superficie de la Tierra, y que además de brindar oportunidades recreativas y ser una fuente de alimento, también contribuyen significativamente a la estabilidad del ambiente y a nuestro bienestar a través de funciones como la acumulación de biomasa o materia orgánica, el reciclaje de nutrientes, la recarga de las reservas de agua subterránea, el aporte de agua potable, el control de flujos de agua, la regulación de inundaciones, erosiones

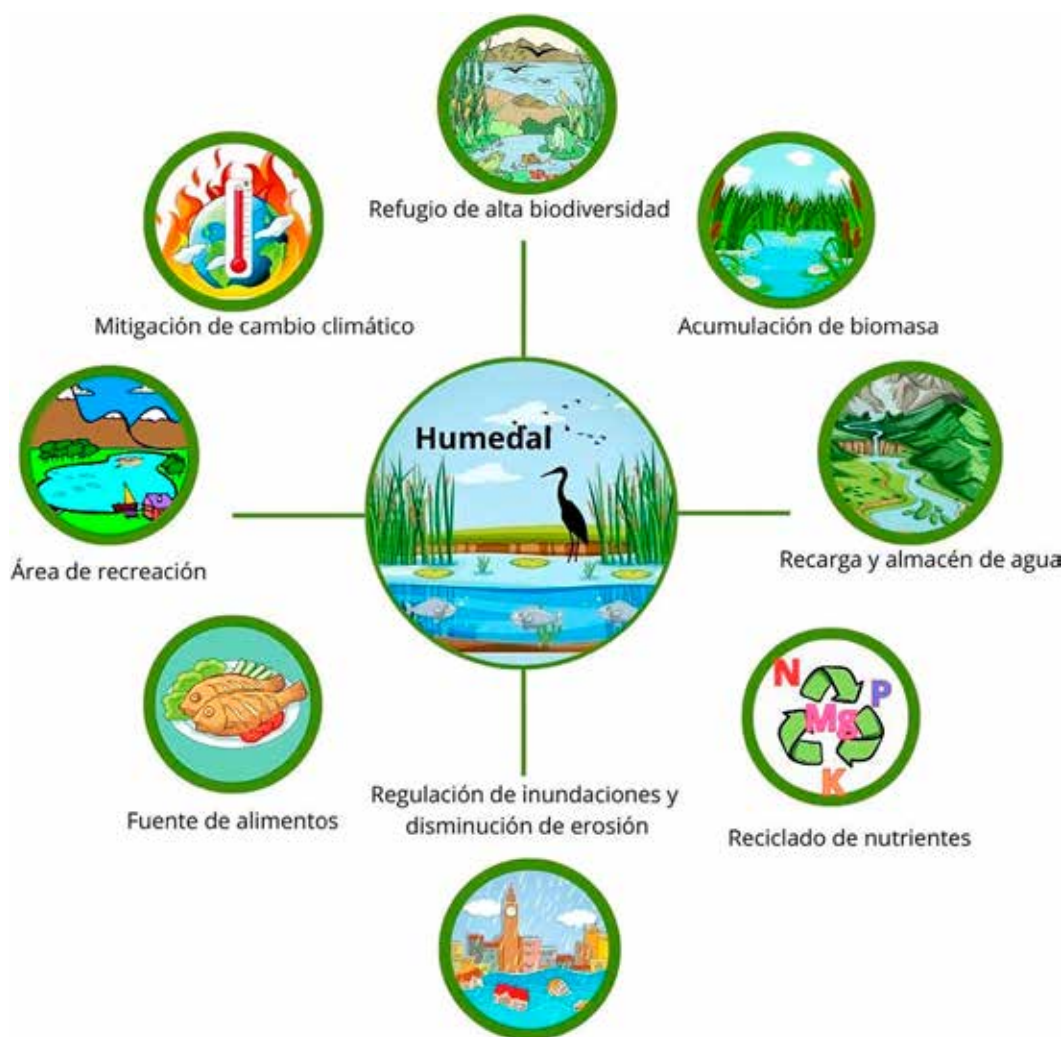


Figura 1. Bienes y servicios ecosistémicos de los humedales.

y microclima local, el resguardo de la diversidad biológica y, en alguna medida, como mecanismos para contrarrestar el cambio climático (Figura 1).

Con todo esto, los humedales son ambientes que con sus contribuciones determinan la subsistencia de innumerables especies vegetales y animales, incluida la especie humana (Gardner y Finlayson, 2018).

HIDRÓFITAS: LAS HIJAS DEL PANTANO

La vegetación es uno de los componentes más importantes de los humedales, su composición y cobertura determinan el funcionamiento del ecosistema y la mayoría de los servicios ecológicos que aporta.

Las plantas vasculares que crecen en espacios inundados se conocen como hidrófitas y han desarrollado muchas adaptaciones, tanto estructurales como fisiológicas, para prosperar en estos ambientes. Por ejemplo, sus tallos y hojas tienen tejidos con numerosos espacios llenos de aire que, además de permitirles flotar, mantenerse erguidas y maximizar su exposición a la luz, también ayudan a que las partes inundadas tengan acceso al oxígeno y, por tanto, a que sus células puedan producir energía.

Estas adaptaciones les permiten vivir en zonas someras o poco profundas y, en algunos casos, hasta dos o tres metros bajo el agua. Es así como las plantas acuáticas pueden crecer flotando, sumergidas o emergiendo del agua, de tal forma que su distribución da forma al ecosistema y crea diferentes

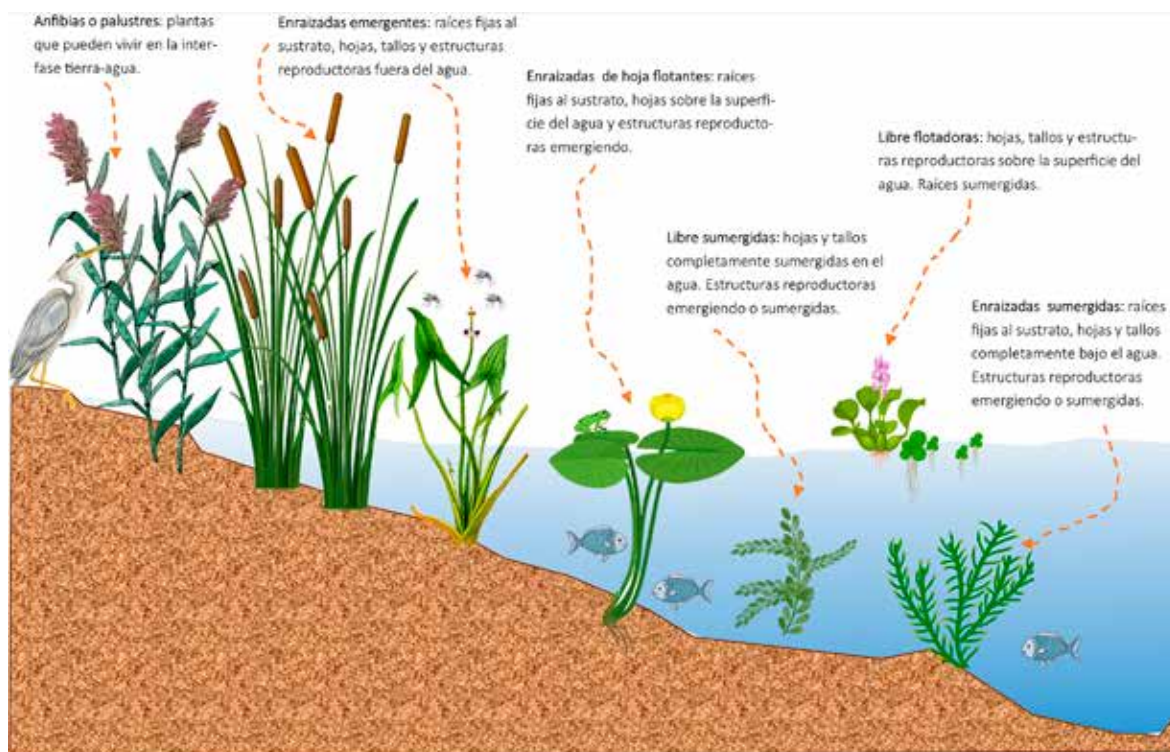


Figura 2. Tipos de plantas acuáticas y su distribución en un cuerpo de agua.

estratos o capas, tanto a lo largo de la columna de agua como a lo ancho de la misma (Figura 2).

Junto con las algas y algunas briofitas (plantas pequeñas y sin flores, como los musgos), las hidrófitas son el primer eslabón en la cadena trófica o alimentaria de los cuerpos de agua, se encargan de fijar nutrientes como carbono y nitrógeno, así como de filtrar o acumular elementos tóxicos, y al ser el hábitat y refugio de numerosas especies de microorganismos, moluscos como los caracoles, insectos, peces, aves y mamíferos, dan estructura y benefician las interacciones entre las diferentes especies, la dinámica y el equilibrio de todo el ecosistema (Gary, 2023).

LOS TESOROS OCULTOS EN EL FANGO

Como en todas las comunidades vegetales, las plantas de los humedales periódicamente destinan recursos para reproducirse sexual o asexualmente, una etapa en la que nuevas hidrófitas se incorporan al ecosistema. En la reproducción sexual, año con año o temporada tras temporada, las diferentes

hidrófitas florecen, y tras la fecundación sus frutos y semillas son esparcidos por el viento, el agua o algún animal. Estas nuevas generaciones de plantas se dispersan tanto dentro como fuera del cuerpo de agua, y ya sea en forma de frutos o semillas, eventualmente se depositarán en el fango y poco a poco formarán un almacén o banco de semillas.

Los bancos de semillas también se conocen como bancos de germoplasma porque conservan información genética derivada de la combinación de los genes del padre y la madre y son, por tanto, almacenes que guardan la diversidad de plantas del ecosistema (Baker, 1989).

En la época de reproducción, numerosas semillas llueven sobre el cuerpo de agua gracias a los esfuerzos de las plantas acuáticas que están creciendo en ese momento y de sus aliados para diseminarlas; algunas pueden llegar de otras localidades por efectos del aire y las aves, otras flotarán en el agua por algún tiempo y se alejarán de su madre, pero después, todas se depositan en

el fondo del cuerpo de agua y progresivamente se van cubriendo y ocultando por capas de sedimentos y materia orgánica.

Enterradas o depositadas sobre la superficie del fango, las nuevas generaciones de plantas se mantienen latentes en las profundidades del humedal, dormidas y a la espera de que las condiciones permitan su germinación (Harper, 1981; Baker, 1989).

En la reproducción asexual o vegetativa, algunas plantas acuáticas forman tallos horizontales llamados rizomas y estolones; otras acumulan materiales de reserva en bulbos u órganos subterráneos que se mantienen enterrados por algún tiempo; y algunas más se reproducen por fragmentos de ellas mismas.

Estas formas de reproducción vegetativa que las hidrófitas usan, generan muchas plantas y ayudan a la rápida colonización de un cuerpo de agua, pero a diferencia de la formación de semillas y sus bancos, estos propágulos no se consideran bancos de germoplasma porque los genes que conservan son los mismos que los de la planta que las formó y no pasaron por la recombinación genética que implica la reproducción sexual, de tal suerte que, si de ellos crece una nueva planta, esta será genéticamente igual a su madre (Li, 2014).

LA RIQUEZA DEL TESORO ENTERRADO

Debido a que las semillas se acumulan en los sedimentos cada temporada y durante años, el banco de semillas, además de mantener los genotipos o la información genética de las hidrófitas actualmente presentes en el cuerpo de agua, también almacena la información de plantas de años anteriores. Es decir, en los sedimentos de los humedales hay bancos llenos de semillas de diferentes especies que se adicionan constantemente en cantidades variables y que van formando un registro de la vegetación pasada y presente, incluso puede contener especies que no se ven en ese momento en la vegetación establecida, pero que en el pasado formaron parte de ella (Leck, 1989; Hopfensperger, 2007).

En los ecosistemas acuáticos, las condiciones ambientales y las interacciones ecológicas entre las diferentes especies son dinámicas y cambian constantemente, lo que genera una vegetación diversa y que también cambia en el tiempo.

Las semillas formadas por las hidrófitas y almacenadas en el banco, representan plantas de múltiples generaciones, producidas bajo condiciones ambientales diferentes.

Es por esto que los bancos de germoplasma se consideran almacenes genéticos cuya riqueza reside en tres aspectos fundamentales: 1) poseen varias especies en cantidades diferentes y de distintas generaciones, incluso especies que quizás han desaparecido de la vegetación; 2) son un registro genético e histórico de la vegetación, con memoria de las condiciones ambientales que hubo en el pasado y de las más recientes, y 3) son reservas que tienen el potencial para que una población de plantas, o la comunidad completa, se recupere si la vegetación acuática desaparece o es destruida por algún disturbio (Baker, 1989; Hopfensperger, 2007).

UNA FORTUNA CAMBIANTE Y EN CONSTANTE CRECIMIENTO

En los ecosistemas naturales, las inversiones en los bancos de semillas son activas y cambiantes en el tiempo y el espacio.

Cada cuerpo de agua tiene un banco de semillas único que depende de los ingresos y las pérdidas de semillas que hay en él (Figura 3). Entonces, cada año y en cada rincón del humedal, el banco de semillas varía en el número de especies que posee, en la cantidad de semillas o plántulas potenciales que hay de cada especie, en la calidad de las semillas y en la posibilidad que estas tienen para germinar (Leck, 1989).

Los ingresos o aportes al banco tienen que ver con la vegetación establecida y la capacidad de esta para generar una rica y diversa lluvia de semillas, así como con la actividad de los agentes dispersores que mueven las semillas dentro y fuera del humedal, esto último como una estrategia para aumentar sus oportunidades de sobrevivencia (Figura 3).

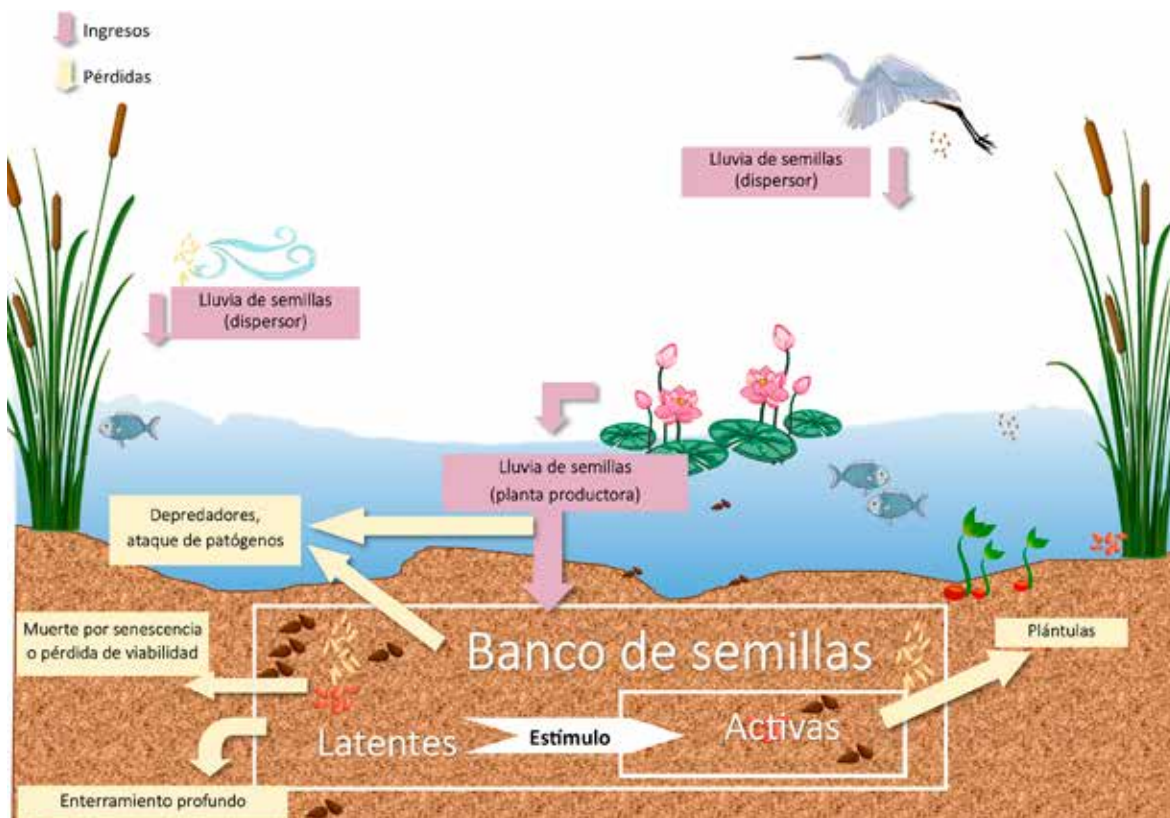


Figura 3. Diagrama de flujo para la dinámica del banco de semillas de humedales. (Figura adaptada de Harper, 1981).

Si las semillas llegan completas al fondo del cuerpo de agua, ahí se mantienen latentes por algún tiempo; y si su madurez y las condiciones ambientales como la cantidad y calidad de la luz, la temperatura, el pH o las características físicas y químicas de los sedimentos lo permiten, dejarán el banco para formar parte de la vegetación establecida en la etapa de plántula (Leck, 1989; Baker, 1989).

Las pérdidas se relacionan precisamente con las respuestas de las semillas a las señales ambientales que permiten o inhiben su germinación, así como con la acción de patógenos o depredadores, el envejecimiento natural y la pérdida de viabilidad o capacidad de germinar de las semillas (Figura 3).

Además, algunas semillas podrán dejar de ser parte del banco activo cuando se entierran profundamente, esto debido a algún evento que al remover intensamente los sedimentos hace que los propágulos queden por debajo de los 10 cm de la superficie del fango; desafortunadamente, estas semillas no

podrán germinar dado que las condiciones ambientales ahí usualmente son desfavorables (Harper 1981; Leck, 1989).

La diversidad y capacidad reproductiva de las plantas establecidas en el humedal, el estado fisiológico de las semillas, junto con los depredadores y las condiciones ambientales, no solo mantienen la riqueza del banco, sino que también hacen que crezca y se regenere constantemente.

Esto sucede porque son estos mismos factores los que determinan qué plantas producen semillas, qué semillas se mantienen vivas en el banco, cuáles pueden germinar y crecer para formar parte de la vegetación y cuáles de ellas contribuirán en el futuro con más semillas al banco en formación.

De esta forma se puede decir que el banco de semillas inicia y se enriquece con la lluvia de semillas y termina con la germinación o la pérdida de sus elementos.



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Pueblo Nuevo, ca. 1977.

EL REINO INUNDADO Y SU TESORO EN PELIGRO DE DESAPARECER

La sobreexplotación de las reservas de agua, la contaminación y el aumento de los requerimientos de espacio para usos agrícola y urbano han conducido a una gran pérdida y desequilibrio de ecosistemas inundados, tanto continentales como costeros. Desde hace varias décadas, la superficie que los humedales cubrían se ha reducido drásticamente y hay indicios preocupantes de que están desapareciendo a un ritmo mayor que otros ambientes. Las estimaciones indican que, a nivel mundial, más de la mitad de ellos se ha perdido (Gardner y Finlayson, 2018), y si bien en México aún no existe una evaluación precisa, se calcula que cerca del 62 % de ellos ya no está presente (CONAGUA, 2021).

Las hidrófitas son extremadamente sensibles a los cambios ambientales, de forma que su crecimiento, supervivencia y reproducción sexual, así como su diversidad, se comprometen en sistemas contaminados o con altos niveles de perturbación.

A corto y mediano plazo, la pérdida de la vegetación de los humedales tiene efectos negativos en el ambiente y en los beneficios y servicios sociales y económicos que aportan. Desafortunadamente, numerosos espacios inundados ahora están gravemente degradados y en peligro de desaparecer, por lo que es necesario, prioritario y urgente que unamos esfuerzos para restaurarlos, recuperar su vegetación y toda su diversidad (Nishihiro *et al.*, 2006; Gary, 2023).

UN TESORO CON POTENCIAL PARA REGENERAR LA VEGETACIÓN

Durante la planeación y el diseño de los programas de rehabilitación y manejo de un ecosistema es necesario documentar el estado de los recursos que conserva y los factores que los regulan. Por ejemplo, es muy relevante conocer qué semillas se producen, cómo se dispersan, cuándo y qué factores hacen que sus semillas germinen y qué condiciones son necesarias para que las plántulas se establezcan. A través de esta información se puede saber el estado de sucesión o la etapa en la que se encuentra el ecosistema, por lo que el análisis del banco de semillas

de una comunidad se considera una técnica de alto valor ecológico (Nishihiro *et al.*, 2006).

Además, la comprensión de la relación entre el banco y la vegetación que aún existe en un humedal puede ayudar directamente en los programas de restauración y regeneración, aportando datos sobre las consecuencias de los disturbios, la invasión de especies no deseables o la extinción de especies nativas; al mismo tiempo, permite predecir los cambios que ocurrirían si sus elementos germinan y si se incorporan a la vegetación, así como los efectos que podría tener algún tipo de manejo (Van der Valk y Pederson, 1989; Hopfensperger, 2007).

En los cuerpos de agua con un nivel de perturbación bajo, en los que algunas hidrófitas y fauna típica

aún están presentes, la fuente de germoplasma para la revegetación natural es el mismo banco de semilla que aún mantiene en sus sedimentos. Estos bancos naturales pueden almacenar semillas de especies deseables por lo que, si se elimina la perturbación, al expresarse ayudarán a mantener la dinámica de la vegetación y contribuirán con más semillas. En ciertos casos solo es necesario recuperar algunas características físicas del lugar, por ejemplo, el nivel del agua o la calidad y periodicidad de esta (Nishihiro *et al.*, 2006).

En los cuerpos de agua sometidos a fuertes perturbaciones, la tendencia es la disminución progresiva de la flora nativa y sus contribuciones a los bancos de semillas y, por lo tanto, de su capacidad para regenerar la comunidad. En estos casos, es probable que los bancos de germoplasma no sean suficientemente ricos y no posean especies deseables para recuperar el humedal y sus funciones.

Por lo tanto, algunos autores sugieren como alternativa la revegetación asistida, ya sea introduciendo plantas adultas o incorporando semillas que se encuentran almacenadas en el banco natural de otros cuerpos de agua. Si bien hay historias exitosas del uso de esta técnica, siempre es necesario hacer un análisis minucioso de la diversidad de especies nativas, introducidas, deseadas y no deseadas del banco de semillas donador, de la biota que aún queda en el espacio a restaurar, de la presencia de condiciones ambientales en el sitio a recuperar, para satisfacer

© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Pueblo Nuevo, ca. 1977.



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Pueblo Nuevo, ca. 1977.





© Enrique Soto. Serie Viacrucis, Pueblo Nuevo, ca. 1977.

las necesidades de germinación de las semillas donadas y de aquellas que sus plántulas requieren para crecer y establecerse (Nishihiro *et al.*, 2006).

De esta forma, los bancos de semillas naturales representan una reserva con potencial para aprovechar las semillas almacenadas en ellos y regenerar la vegetación; así, los esfuerzos de restauración pueden centrarse en el restablecimiento de especies de plantas nativas, el monitoreo de la salud y del establecimiento de las plántulas, y la promoción de la biodiversidad por medio de la rápida recuperación del ecosistema.

REFERENCIAS

- Baker HG (1989). Some aspects of the natural history of seed banks. En Leck MA, Parker VT and Simpson RL (Ed.), *Ecology of soil seed banks* (pp. 9-24). Academic Press. New York.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2021). *Inventario Nacional de Humedales (INH)*. Recuperado de: <https://sigagis.conagua.gob.mx/humedales/>.
- Gardner RC y Finlayson CM (2018). *Perspectiva mundial sobre los humedales: Estado de los humedales del mundo y sus servicios a las personas*. Secretaría de la Convención de Ramsar. Suiza: Gland.
- Gary NE (2023). *The biology of aquatic and wetland plants*. CRC Press, Taylor and Francis. Florida: Boca Ratón.
- Harper JL (1981). *Population biology of plants*. Academic Press. United Kingdom: London.
- Hopfensperger KN (2007). A review of similarity between seed bank and standing vegetation across ecosystems. *Oikos* 116:1438-1448.
- Leck MA (1989). Wetland seed banks. En Leck MA, Parker VT and Simpson RL (Ed.), *Ecology of soil seed banks* (pp. 283-305). Academic Press. New York.
- Li W (2014). Environmental opportunities and constraints in the reproduction and dispersal of aquatic plants. *Aquatic Botany* 118:62-70.
- Nishihiro J, Nishihiro MA and Washitani I (2006). Restoration of wetland vegetation using soil seed banks: lessons from a project in Lake Kasumigaura, Japan. *Landscape and Ecological Engineering* 2:171-176.
- Van der Valk AG and Pederson RL (1989). Seed banks and the management and restoration of natural vegetation. En Leck MA, Parker VT and Simpson RL (Ed.), *Ecology of soil seed banks* (pp. 329-346). Academic Press. New York.
- Carmen Zepeda Gómez**
Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ciencias
zepedac@uaemex.mx
- Javier Manjarrez**
Universidad Autónoma del Estado de México
Centro de Investigación en Recursos Bióticos

Estrategias para el estudio de las comunidades microbianas del suelo

Gobinath **Chandrakasan**

Cuando pensamos en ecosistemas solemos imaginar grandes selvas lluviosas, densos bosques de pino-encino o incluso matorrales semiáridos, pero pocas veces volteamos hacia abajo, a pensar en el suelo en el que se desarrollan estos ecosistemas. Pues bien, es precisamente en el suelo, pocas veces considerado, en donde se decide qué tipo de vegetación puede establecerse y cuán productivo será, en el caso de los agroecosistemas. En particular, las comunidades microbianas que habitan en el suelo facilitan el establecimiento de determinadas especies vegetales y así mismo la productividad del ecosistema. Existe un creciente interés en el estudio de las comunidades microbianas del suelo, cómo se estructura y controla la estabilidad de los agroecosistemas. Los avances en metodologías, como la metagenómica, se aplican al análisis de suelos y al estudio del patrón espacial de las comunidades microbianas. Las características moleculares a nivel de comunidad pueden utilizarse como indicadores de los procesos del ecosistema, “biomarcadores” de los procesos del ecosistema para el monitoreo y la gestión de la salud sostenible del suelo. Entender las estrategias teóricas y metodológicas para evaluar y comprender mejor la distribución y evolución de las comunidades del suelo, incluyendo bacterias, hongos, nematodos y arqueas, es de vital importancia para promover prácticas agrícolas sustentables que satisfagan la alta demanda de alimentos y energía en la agricultura moderna.

Las comunidades microbianas del suelo (CMS) poseen patrones de distribución espacial coherentes con la distribución de la vegetación y la heterogeneidad ambiental. Uno de los factores que más influye en esta distribución espacial de las CMS es la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo (MOS). Entre los beneficios de la MOS se encuentran la mejora de la capacidad de intercambio iónico, la retención de agua en el suelo, la mejora de la agregación del suelo y reducción de la erosión, así como el almacenamiento y captura de gases de efecto invernadero. En los últimos diez años, las técnicas de genómica ambiental han proporcionado una mejor comprensión de la composición microbiana, pero aún falta información detallada sobre algunos de los grupos microbianos (por ejemplo, bacterias, hongos, nematodos y arqueas) (Wang *et al.*, 2022).

Estos organismos juegan papeles fundamentales en la descomposición de materia orgánica, la ciclación de nutrientes y la formación de la estructura del suelo. Las bacterias del suelo son extremadamente diversas y pueden ser aeróbicas o anaeróbicas, es decir, pueden vivir en presencia de oxígeno o en ausencia de él. Algunas bacterias del suelo son importantes fijadoras de nitrógeno, lo que significa que son capaces de convertir el nitrógeno atmosférico en formas utilizables por las plantas. Los hongos del suelo, por otro lado, son cruciales en la descomposición de la materia orgánica, ya que son capaces de descomponer compuestos orgánicos complejos como la celulosa y la lignina. Esto ayuda a liberar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Los nematodos del suelo son gusanos microscópicos que pueden ser beneficiosos o perjudiciales para las plantas, dependiendo de la especie. Las arqueas del suelo son menos estudiadas en comparación con las bacterias y los hongos, pero se sabe que desempeñan papeles importantes en la transformación de nutrientes y en la estabilidad del suelo. De ahí la importancia de examinar las comunidades microbianas del suelo y revisar el conocimiento actual

de la función microbiana del suelo, destacando al mismo tiempo las diferentes prácticas de manejo del suelo con sistemas metodológicos avanzados para taxones específicos de naturaleza filogenética y funcional.

IMPACTO DEL MANEJO DEL SUELO EN LAS COMUNIDADES MICROBIANAS

Existe un debate sobre el efecto de los distintos manejos de labranza en los nutrientes del suelo, la diversidad microbiana, la actividad de las CMS y el rendimiento de los cultivos. El manejo del suelo puede tener un impacto significativo en las comunidades microbianas presentes en el mismo, y estos cambios en la composición y diversidad microbiana pueden influir en la salud del suelo y en la producción de cultivos.

El manejo de labranza puede afectar a las comunidades microbianas de varias maneras, como alterar la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes, la humedad y el pH. Estos cambios pueden afectar la actividad microbiana y la biodiversidad en el suelo, lo que a su vez puede influir en la salud de las plantas cultivadas en ese suelo. Además, el manejo del suelo y su influencia en las comunidades microbianas puede jugar un papel importante en la mitigación de la escasez de recursos, como el agua y los nutrientes, así como en la mejora de la productividad agrícola. Sin embargo, es crucial entender que la relación entre el manejo del suelo, las comunidades microbianas y la escasez de recursos es compleja y multifacética.

Los diferentes métodos de labranza pueden afectar la estructura del suelo, su capacidad de retención de agua y nutrientes, y la actividad microbiana. Por ejemplo, las prácticas de labranza mínima o ausencia de labranza pueden promover la formación de una capa superficial de materia orgánica que mejora la retención de agua y nutrientes, así como la diversidad microbiana en el suelo (Li *et al.*, 2020). Esto puede contribuir a la conservación del agua y a una mejor disponibilidad de nutrientes para las plantas, lo que a su vez puede ayudar a mitigar la escasez de recursos.

En términos de calidad de los cultivos, los microorganismos presentes en el suelo pueden influir en la acumulación de nutrientes y compuestos bioactivos en los tejidos de las plantas, así como en su resistencia a enfermedades y estrés ambiental. Por lo tanto, un manejo del suelo que promueva comunidades microbianas saludables puede contribuir a la producción de cultivos de mayor calidad en términos de valor nutricional, sabor, textura y resistencia a factores estresantes.

Adicionalmente, cada vez son más las investigaciones que apuntan al efecto negativo que tiene sobre el microbioma el cambio de uso de suelo de ecosistemas como humedales, bosques, matorrales y, especialmente, plantaciones forestales, a tierras de cultivo. En la microescala del suelo, factores como la porosidad, el contenido de carbono, la disponibilidad de nutrientes y el nivel de protección de los agregados del suelo, se ven seriamente afectados por las perturbaciones asociadas al cambio de uso del suelo. Se sabe que las CMS desempeñan un papel fundamental en la descomposición de la MOS forestal. La conversión de un terreno forestal a agrícola suele ser perjudicial para la diversidad microbiana, ya que altera su diversidad y riqueza, y afecta también las propiedades de agregación del suelo (Wang *et al.*, 2020).

Así pues, diversas perturbaciones como la deforestación, los cambios en el manejo del suelo o incluso los cambios naturales en los ecosistemas a lo largo del tiempo, producen cambios en las estructuras de las CMS. Se requiere un enfoque multidimensional que vincule la taxonomía, la función y un conjunto más amplio de variables ambientales, a fin de describir la diversidad, la ocupación de nichos y los factores ecológicos en los suelos agrícolas.

La conversión de suelos forestales a agrícolas altera la proporción de grupos dominantes en la CMS, favoreciendo a grupos tales como Proteobacterias, Acidobacterias, Planctomicetos, Bacteroidetes y Firmicutes, como respuesta a la entrada de nutrientes con la fertilización nitrogenada (Kim *et al.*, 2021).

En un experimento de campo a largo plazo en el que se compararon los sistemas de agricultura

ecológica y convencional, se encontró que los suelos fertilizados con estiércol fueron capaces de mantener una mayor abundancia de bacterias y hongos a largo plazo (Santoni *et al.*, 2023).

La evaluación de la composición de la comunidad de nematodos puede proporcionar una visión única de los procesos biológicos del suelo (Cui *et al.*, 2024).

Los nematodos desempeñan papeles esenciales en las funciones del ecosistema debido a la especialización de diferentes grupos de acuerdo con sus fuentes de alimento.

RETOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LA COMUNIDAD MICROBIANA DEL SUELO

La composición de una CMS puede describirse a través de caracterizaciones microbiológicas, bioquímicas y moleculares, tanto independientes del medio como dependientes del medio de cultivo. En cuanto a las metodologías microbiológicas, el recuento de colonias en placas de cultivo es una técnica ampliamente utilizada pero muy limitada en el estudio de las CMS.

La principal limitación de esta aproximación es que no refleja la comunidad total de microorganismos, sino solo de aquellos con la capacidad de adaptarse al medio de cultivo y las condiciones controladas. Se utilizan también análisis en microplacas adicionales con diferentes sustratos para obtener perfiles fisiológicos a nivel de comunidad, y patrones de consumo de nutrientes del suelo para estudiar la diversidad microbiana en varios terrenos (Rutgers *et al.*, 2016).

En cuanto a análisis moleculares, algunos estudios se basan en la amplificación de segmentos específicos de DNA por medio de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), para posteriormente realizar el análisis de la composición de la comunidad.

La secuenciación de nueva generación (SNG, por sus siglas en inglés) se ha aplicado ampliamente en la exploración de la composición, la diversidad y la distribución de la comunidad microbiana, y a la



Figura 1. Principales técnicas de caracterización de la comunidad microbiana del suelo.

descripción de las funciones de los microorganismos en diversos ecosistemas (Muñoz-Ramírez *et al.*, 2024).

Los análisis de las muestras pueden basarse en la replicación de una región específica del genoma de los hongos (ITS 1-4), bacterias o arqueas (gen RNA 16S); o bien, puede secuenciarse al azar y tener representados los genomas de todos los organismos de la muestra.

La pirosecuenciación es una técnica de secuenciación de ADN basada en la detección de pirofosfato liberado durante la incorporación de nucleótidos en una cadena de ADN en crecimiento.

Otras técnicas que no se basan en la cuantificación con PCR ni en secuenciación, son el análisis de huellas bioquímicas de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés), ácidos grasos totales (WCFA, por sus siglas en inglés) y de fosfolípidos (PLFA, por sus siglas en inglés); estas técnicas han permitido caracterizar los cambios en la

composición de CMS enteras, incluyendo la biomasa fúngica, la biomasa bacteriana y la proporción entre hongos y bacterias, todas ampliamente relacionadas con los procesos del ecosistema (Balser *et al.*, 2019).

El uso de más de una técnica de manera simultánea permite comprender de mejor manera la diversidad y funcionalidad de los microorganismos del suelo. Así, el estudio combinado de secuenciación, principalmente basado en Illumina, se ha utilizado ampliamente para determinar la diversidad y las distribuciones espaciales de las CMS en diferentes entornos. Por ejemplo, la secuenciación Illumina ofrece un mayor rendimiento, longitudes de lectura más largas y una mayor precisión en comparación con la pirosecuenciación (Akacin *et al.*, 2022). Esta técnica permite encontrar posibles vínculos entre la funcionalidad real de las CMS (actividad enzimática interpretada como el ciclado de nutrientes, y la respiración basal como la actividad metabólica total de la CMS) y la abundancia de genes funcionales (Figura 1).



© Enrique Soto. Serie *Viacrucis*, Huaquechula, Puebla, 2014.

RETOS FUTUROS

Mantener la gran diversidad de la CMS en los agroecosistemas es fundamental para conservar una buena calidad del suelo.

Existe la necesidad de desarrollar enfoques y políticas de protección de la CMS basados en factores ambientales globales como el uso de la tierra, el enriquecimiento de nitrógeno, el cambio climático y los programas de monitoreo de la diversidad microbiana del suelo.

Los métodos modernos de adquisición de datos permiten un mejor análisis de la función microbiana del suelo y proporcionan información sobre las prácticas agrícolas que permitirán aumentar la producción de alimentos de forma sostenible.

Esto es especialmente cierto cuando se combina más de una técnica en el estudio de las comunidades microbianas y se explora de manera conjunta la diversidad y la funcionalidad de las CMS. Una visión completa de los atributos ecológicos y las distribuciones espaciales de la CMS debería mejorar la predicción de los cambios en su estructura y, a su vez, del funcionamiento del suelo.

REFERENCIAS

- Akacin I, Ersoy Ş, Doluca O and Güngörmüşler M (2022). Comparing the significance of the utilization of next generation and third generation sequencing technologies in microbial metagenomics. *Microbiological Research* 264:127154. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127154>.
- Balser TC, Liang C and Gutknecht JL (2019). Linking microbial community analysis and ecosystem studies: a rapid lipid analysis protocol for high throughput. *Soil Ecology Letters* 1:22-32.
- Cui S, Mo X and Zheng G (2024). Body size induced changes in metabolic carbon of soil nematodes under N deposition and precipitation regime change in a temperate grassland. *Ecol Process* 13:9. <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00484-x>.
- Kim HS, Lee S, Jo HY, Finneran KT and Kwon MJ (2021). Diversity and composition of soil Acidobacteria and Proteobacteria communities as a bacterial indicator of past land-use change from forest to farmland. *Sci Total Environ* 797:148944. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148944>.
- Li Y, Zhang Q, Cai Y, Yang Q and Chang SX (2020) Minimum tillage and residue retention increase soil microbial population size and diversity: Implications for conservation tillage. *Science of the Total Environment* 716:137164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137164>.
- Muñoz-Ramírez ZY, González-Escobedo R, Avila-Quezada GD, Ramírez-Sánchez O, Higareda-Alvear VM, Zapata-Chávez E, Borrego-Loya A and Muñoz-Castellanos LN (2024). Exploring microbial rhizosphere communities in asymptomatic and symptomatic apple trees using



amplicon sequencing and shotgun metagenomics. *Agronomy* 14:357. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020357>.

Rutgers M, Wouterse M, Drost SM, Breure AM, Mulder C, Stone D, Creamer RE, Winding A and Bloem J (2016). Monitoring soil bacteria with community-level physiological profiles using Biolog™ ECO-plates in the Netherlands and Europe. *Applied Soil Ecology* 97:23-35. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.06.007>.

Santoni M, Verdi L, Imran Pathan S, Napoli M, Dalla Marta A, Dani FR, Pacini GC and Ceccherini MT (2023). Soil microbiome biomass, activity, composition and CO₂ emissions in a long-term organic and conventional farming systems. *Soil Use and Management*. 39(1):588-605. <https://doi.org/10.1111/sum.12836>.

Wang J, Zou Y, Di Gioia D, Singh BK and Li Q (2020). Conversion to agroforestry and monoculture plantation is detrimental to the soil carbon and nitrogen cycles and microbial communities of a rainforest. *Soil Biology and Biochemistry* 147:107849. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107849>.

Wang YF, Chen P, Wang FH, Han WX, Qiao M, Dong WX, Hu CS, Zhu D, Chu HY and Zhu YG (2022). The ecological clusters of soil organisms drive the ecosystem multifunctionality under long-term fertilization. *Environment International* 161:107133. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107133>.

Gobinath Chandrakasan
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
gobi.marine@gmail.com

La importancia de los suelos agrícolas saludables

Natalia **Solís Pérez**
Juan Fernando **García Trejo**

En la actualidad, un alto porcentaje de los suelos mexicanos posee algún tipo de degradación física, química o biológica, lo que ha ocasionado una disminución en su capacidad productiva. Sumado a esto, se han acentuado otros efectos negativos como la disminución en el carbono orgánico, la retención y filtrado de agua, y la disposición de los minerales, todo lo cual genera suelos no fértiles (FAO, 2024).

La FAO define como un suelo degradado aquel que “sufre un cambio en su estado de salud que resulta en una menor capacidad del ecosistema para proveer los bienes y servicios para sus beneficiarios”.

El término “salud del suelo” se refiere al estado físico, químico y biológico del suelo, y se considera positiva cuando tiene la capacidad de sostener el crecimiento y desarrollo de la vegetación. La diferencia con un suelo degradado se encuentra en que el suelo sano posee una alta resistencia a la erosión; tiene una buena estructura física; porosidad, laboreo y drenaje correctos; mantiene ciclos deseables de materia orgánica y un aporte suficiente de nutrientes; tiene niveles deseables de transformación del carbono; está libre de contaminantes; posee una buena regulación de enfermedades, plagas y ciclos microbiológicos, y tiene una presencia dominante de organismos benéficos sobre los patógenos (Idowu *et al.*, 2019).

Como parte de la estrategia de salud pública a escala mundial, los suelos saludables son un tema importante para poder lograr 16 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU para 2030, junto con el tema de “One Health” (Una sola salud), basado en la idea de que la salud humana, la animal y la vegetal son interdependientes y están unidas a la salud de los ecosistemas de los que forman parte (Hernando Amado *et al.*, 2019).

Desde esta perspectiva, está surgiendo un modelo que señala que el microbioma del suelo es importante para la formación del microbioma intestinal humano, y que es responsable de modificaciones en el sistema inmunitario y algunos desórdenes alérgicos que sufrimos en la actualidad.

La biodiversidad de los suelos es recomendada para lograr suelos saludables, y el hecho de que exista un desequilibrio en ellos da ventaja a los organismos patógenos sobre los benéficos. Aunado a esto, por la parte ambiental, los suelos saludables promueven la buena calidad del aire, son menos propensos a la erosión hídrica, proveen de agua limpia y segura a través de la filtración y los microorganismos remueven muchos de los contaminantes que llegan a ellos, lo cual incide positivamente en la salud del ecosistema y de sus habitantes (es decir, se cumple con el postulado principal de Una sola salud) (Lal *et al.*, 2021).

Hoy tenemos suelos degradados en nuestro país debido a que desde que se comenzó con la utilización de agroquímicos en la agricultura, a inicios del siglo XX, los seres humanos hemos ido agotando la salud del suelo de muchas maneras.

Se ha probado que el abuso en el empleo de fertilizantes inorgánicos es uno de los mayores causantes del deterioro de la salud del suelo. Existe evidencia de que el uso inapropiado de agroquímicos, por periodos prolongados y en grandes dosis, puede resultar en cambios directos en el pH del suelo, lo cual tiene serias implicaciones en términos de la productividad de los suelos a largo plazo, así como afectaciones graves a la diversidad microbológica del suelo (Mandal *et al.*, 2020).

Aquí se discute la importancia de reconocer los suelos degradados y cómo diferenciarlos de los saludables. También las propuestas actuales para recuperar sus características deseables y sus capacidades.

¿QUÉ ES EL SUELO AGRÍCOLA?

El suelo es un complejo sistema de características variables que dependen de la región, el clima, los seres vivos que han estado en interacción con él y las reacciones físicas, químicas y biológicas que ha tenido desde su formación y a lo largo de los años.

De manera más específica, un suelo agrícola es el sustrato en el que se desarrollan las actividades del sector económico primario enfocadas principalmente a la alimentación, que proporciona capital material y terreno estratégico para la localización de empresas agroindustriales (Torres y Rojas, 2018).

SALUD Y CALIDAD DEL SUELO

La calidad de un suelo se manifiesta como el beneficio en una escala amplia de tiempo. El término “calidad del suelo” se comenzó a delimitar al distinguir sus funciones: beneficiar la salud de animales, plantas y humanos que habitan y se alimentan de él (salud del suelo), sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; originar la productividad del sistema (productividad biológica sostenible) y atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental).

Al ampliar el concepto, se ha considerado de igual manera que es el sustrato básico para las plantas; provee, retiene y absorbe agua y es el mejor filtro ambiental. Consecuentemente, este concepto alude la competencia del suelo para actuar dentro de las fronteras del ecosistema con el que se interrelaciona y del cual forma parte (Bautista Cruz *et al.*, 2004).

A pesar de ser conceptos muy similares, la calidad del suelo es un término más integral aún que el que se refiere a su salud, y se enfoca en lo productivo y en la utilidad, mientras que la salud tiene un enfoque más geográfico y ecológico.

PROPUESTAS PARA RECUPERAR LA SALUD DEL SUELO

Los sistemas agroforestales tradicionales y los sistemas de agricultura de conservación son métodos que se sugieren para un manejo óptimo que ayude a mejorar la salud de los suelos.

Estas enmiendas los reparan por medio del aumento del contenido de carbono, la preservación de la humedad de los suelos, la eficiencia en el uso de agua, la reducción de la erosión de suelos, el control de malezas y el incremento de la fauna que habita el suelo. En las zonas rurales con escasa posibilidad de inversión, poca capacitación y condiciones marginales, estos cambios son difíciles de obtener sin una política transversal e integral (Cotler *et al.*, 2016).

Las enmiendas ayudan a restaurar los suelos agrícolas degradados y mejoran los problemas físicoquímicos que poseen. Una de sus desventajas, en comparación con los fertilizantes químicos, es que se requiere más volumen en toneladas por hectárea para preparar los suelos antes de la siembra de algún cultivo. Esto puede ser un factor limitante si no se dispone de suficientes insumos, además de que en algunos casos puede implicar costos económicos mayores para el agricultor promedio (Martínez Robles, 2022).

Para que una enmienda de suelo se considere orgánica, necesita estar constituida por nutrientes derivados de los residuos o subproductos de lo que fueron alguna vez organismos vivos. Regularmente, estos contienen concentraciones bajas de nutrientes, pero proveen a los cultivos durante largos periodos en un proceso de liberación más lento.

Las enmiendas orgánicas contienen también moléculas más complejas, como aminoácidos y carbohidratos, que son fuente de alimentación de microorganismos presentes en el suelo que descomponen y desdoblan los componentes complejos (ligninas, proteínas, etc.) contenidos en los mejoradores (Antonious, 2016).

Consecuentemente, al referirnos a enmiendas orgánicas con cargas microbiológicas significativas podemos encontrar al *frass*. Este es un subproducto de la producción de insectos a gran escala,

compuesto por una mezcla de excretas, exoesqueletos y alimento residual, con una carga microbiana que induce a la fermentación.

Al dejar fermentar este subproducto, se llega a un material compostado al que se han reportado respuestas favorables en investigaciones sobre el mejoramiento de los suelos agrícolas, lo cual está permitiendo que se revaloricen muchos residuos agroindustriales de una manera más efectiva (Basri *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

El suelo es uno de los recursos indispensables para la salud humana porque, como se mencionó, en este recurso finito se producen muchas de las materias primas que utilizamos. Entre todas, la primordial son los alimentos, lo que nos lleva a discutir el impacto de la salud del suelo en la seguridad alimentaria.

Necesitamos, pues, que el suelo esté saludable, que haya suficiente y tenga la capacidad de producción necesaria en función de su fertilidad, ya sea de forma natural o mediante el uso de alguna tecnología, para que exista una mayor disponibilidad de alimentos. Es por ello que debe adoptarse una estrategia de salud pública y seguridad alimentaria que atienda la problemática interna de este recurso y reconozca su importancia social, económica y ecológica (Torres y Rojas, 2018).

Aunque la salud del suelo es un tema que está siendo estudiado por la comunidad científica, hace falta que estos estudios y la información valiosa que producen sean más y mejor divulgados. Algunos técnicos desactualizados y la mayoría de los campesinos y pequeños agricultores en nuestro país desconocen aún los problemas que conlleva la degradación sistemática del suelo.

Así se va creando un estado de inconsciencia en que un suelo se valora más cuanto más produce económicamente, lo que tiene como consecuencia que se siga explotando el recurso de manera indiscriminada sin pensar en su bienestar; es decir, se está dejando de lado la necesidad, ya urgente,



© Enrique Soto. Palomas, Veracruz, Veracruz, ca. 1994.

de sanear los suelos en nuestro país para que los recursos que nos proveen sean de una mejor calidad, y que su degradación no repercuta a largo plazo en la salud de quienes lo trabajan o de quienes consumen los beneficios que el suelo proporciona para nuestra subsistencia.

REFERENCIAS

- Antonious GF (2016). Soil amendments for agricultural production. Intech (Ed.), *Organic fertilizers-from basic concepts to applied outcomes* (pp. 157-187). Rijeka, Croatia.
- Bautista Cruz A, Etchevers Barra E, del Castillo RF y Gutiérrez C (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13(2):90-97.
- Cotler H, Martínez M y Etchevers JD (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. *Terra Latinoamericana* 34(1):125-138.
- Food and Agriculture Organization (2024). Portal de Suelos de la FAO. Recuperado de: <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>.
- Hernando Amado S, Coque TM, Baquero F and Martínez JL (2019). Defining and combating antibiotic resistance from One Health and Global Health perspectives. *Nature microbiology* 4(9):1432-1442.
- Idowu J, Ghimire R, Flynn R and Ganguli A (2019). *Soil Health: Importance, Assessment and Management*. New Mexico State University Cooperative Extension Service: Las Cruces, NM, USA.
- Lal R, Bouma J, Brevik E, Dawson L, Field DJ, Glaser B and Zhang J (2021). Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional* 25:e00398.
- Mandal A, Sarkar B, Mandal S, Vithanage M, Patra A K and Manna M C (2020). Impact of agrochemicals on soil health. En Elsevier (Ed.). *Agrochemicals detection, treatment and remediation* (pp. 161-187). Butterworth-Heinemann.
- Martínez Robles J (2022). *Factores biológicos y químicos de fertilizantes nitrogenados y fosfatados en suelos agrícolas y sus posibles estrategias de recuperación en México*. Universidad Autónoma Metropolitana. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Departamento De Producción Agrícola y Animal.
- Torres F y Rojas A (2018). Suelo agrícola en México: retrospectiva y prospectiva para la seguridad alimentaria. *Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía* 9(3):137-155.

Natalia Solís Pérez
Juan Fernando García Trejo
Maestría en Ingeniería de Biosistemas
Universidad Autónoma de Querétaro
Campus Amazcala
nsolis04@alumnos.uaq.mx



© Enrique Soto. *Pajarero*, Tzicatlacoyan, Puebla, ca. 1995.



© Enrique Soto. *Organillero*, México, DF, 2015.

Ensayos de germinación: tres ejemplos

Roberto Villagrán Torres

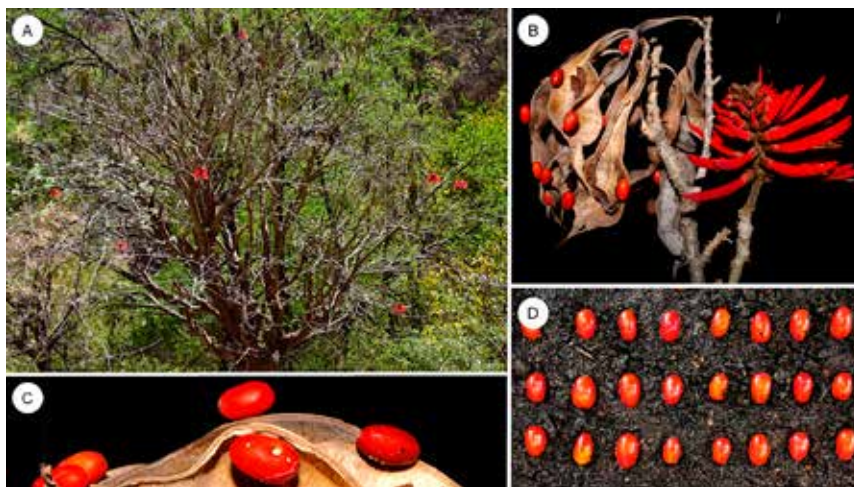
La germinación de las semillas es un proceso fisiológicamente demandante y de alta mortalidad para las plantas, comprenderla es indispensable para manejar la germinación con el mayor rendimiento posible. Una de las herramientas que otorga la ciencia son los ensayos de germinación (Rodríguez *et al.*, 2009; González-Zertuche y Orozco-Segovia, 1996).

¿QUÉ ES LA GERMINACIÓN?

La germinación es un proceso fisiológico que comienza con el reinicio del crecimiento del embrión y termina cuando la raíz emerge de la semilla, dando paso al nacimiento de un nuevo organismo que es resultado de la recombinación de los genes de sus progenitores (González-Zertuche y Orozco-Segovia, 1996; Bareke, 2018).

La recombinación genética es importante porque enriquece el acervo genético de las especies, otorgándoles posibilidades de adaptación al ambiente, lo que puede incidir en la supervivencia de la especie, su dispersión, el comportamiento de sus poblaciones y la obtención de nuevas características morfológicas o fisiológicas, entre otros aspectos (Bareke, 2018). Esto no sucede cuando la propagación de las especies se realiza a través de propagaciones asexuales (por ejemplo, fragmentación, que consiste en dividir al organismo en dos o más esquejes, los cuales resultan en clones del progenitor) (Rodríguez *et al.*, 2009).

Figura 1. A) Ejemplar silvestre de *Erythrina americana*; B) Estructuras reproductivas; C) Perforación de la testa realizada por un escarabajo (ejemplo de escarificación mecánica); D) Ensayo de germinación de *Erythrina americana*.



La germinación es regulada por factores biológicos, como la forma de la semilla; y factores ambientales, como la humedad, la temperatura y la luz. La semilla responderá con el inicio de la germinación cuando se vea sometida a las condiciones ideales de germinación para esa especie (Bareke, 2018). No obstante, un lote de semillas de una misma especie presentará variabilidad en su comportamiento germinativo, por lo que algunas características registradas para su entendimiento son: porcentaje de germinación (capacidad germinativa), inicio de la germinación (primera semilla), distribución de la germinación en el tiempo (tasa y velocidad de germinación) y tiempo promedio de germinación. Estos datos se vuelven relevantes al realizar comparaciones entre ensayos de germinación (González-Zertuche y Orozco-Segovia, 1996).

¿QUÉ ES UN ENSAYO DE GERMINACIÓN?

Los ensayos de germinación son pruebas realizadas desde el método científico que buscan establecer los parámetros necesarios para la germinación, por medio de experimentos que evalúen la capacidad germinativa de las plantas utilizando variables como el tiempo de almacenaje, la humedad, el fotoperiodo o la temperatura, mediante la medición del efecto de tratamientos físicos y químicos realizados en las semillas previamente a la germinación. Cuando los ensayos de germinación concluyen con éxito y son

representativos de una especie o variedad (“raza”), se genera la oportunidad de establecer protocolos de germinación que permitan el máximo rendimiento al germinar (González-Zertuche y Orozco-Segovia, 1996; Rodríguez *et al.*, 2009). Entender la germinación mediante ensayos permite satisfacer de manera sustentable la demanda de especies en proyectos productivos con fines ornamentales, alimenticios, de restauración ecológica o conservación de especies (Rodríguez *et al.*, 2009).

GERMINACIÓN CON FINES DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

La restauración ecológica con especies vegetales en áreas impactadas hace referencia al uso de plantas con la capacidad de recuperar la estructura y funcionalidad del ecosistema para dar paso al establecimiento de comunidades vegetales (Rodríguez *et al.*, 2009).

Erythrina americana Mill. (Figura 1, A) es una especie popular por sus múltiples usos, entre los que destaca su potencial restaurador del suelo. Esta característica se debe a la asociación simbiótica, a nivel de la raíz, con microorganismos fijadores de nitrógeno, lo que le atribuye al árbol la capacidad de acelerar la recuperación de la fertilidad del suelo y permitir el establecimiento de otras especies vegetales (Fehling-Fraser y Ceccon, 2015).

Sin embargo, la germinación de las semillas ha sido una limitante para los interesados en ella debido a las características físicas que poseen las semillas (Figura 1, B). Se ha determinado que la dureza y



Figura 2. A) Cerro Zapotecas, San Andrés Cholula, Puebla, México; B) Ensayo de germinación con *Thompsonella minutiflora*.

serosidad de las semillas de *E. americana* provocan un estado de latencia (reposo) que permite que solo una de cada 10 semillas germine en condiciones naturales, debido a que la testa de la semilla debe escarificarse (es decir, dañarse) para permitir el ingreso de humedad que reactive el desarrollo del embrión (Guadarrama *et al.*, 2019).

Se ha reportado que algunos insectos pueden realizar la escarificación de la semilla de colorín en condiciones naturales, aumentando significativamente la germinación de lotes de semillas (Figura 1, C). Los ensayos de germinación para *Erythrina americana* (Figura 1, D) se han centrado en determinar las maneras ideales para escarificar la testa de la semilla. Algunos de los métodos evaluados son: por escarificación mecánica, al raspar la semilla con lijas; al utilizar un cautín; al sumergir en agua caliente; y también se han evaluado métodos de escarificación química que consisten en sumergir a las semillas en ácido sulfúrico. Según lo publicado, sumergir las semillas en agua caliente o en ácido sulfúrico son los métodos más efectivos (Guadarrama *et al.*, 2019).

GERMINACIÓN CON FINES DE CONSERVACIÓN DE ESPECIES

La conservación de las especies vegetales se basa en la selección de especies bajo categorías de riesgo, grado que puede ser determinado por el riesgo de extinción de una especie y las amenazas que generan la pérdida de su hábitat (Rodríguez, 2009; Herrera, 2012).

El género *Thompsonella* es un grupo de especies de plantas suculentas endémicas del centro y sur de México que cuenta con ocho especies, la mayoría restringidas a pequeñas poblaciones en limitadas zonas de distribución, lo que las vuelve especies vulnerables (Carrillo-Reyes y Pérez-Calix, 2008; Herrera, 2012).

En San Andrés Cholula, Puebla, la especie *Thompsonella minutiflora* (Rose) Britton & Rose ha sido registrada por locatarios y la Red Naturalista en el Cerro Zapoteco (Figura 2, A), un sitio de interés con planes de conservación y restauración que se considera un pulmón de la zona urbana. —El desarrollo de protocolos de germinación es clave en la conservación de las especies debido a que permite la germinación fuera de hábitat y optimiza los procesos de germinación frente a la escasez de semillas (Rodríguez *et al.*, 2009; Martínez-Villegas, *et al.*, 2012).

Sin embargo, en casos en que no existen protocolos de germinación para *Thompsonella*, es necesario sustentar la investigación con ensayos de germinación realizados previamente en especies cercanas al género, gracias a las similitudes biológicas que presentan (Carrillo-Reyes y Pérez-Calix, 2008).

Algunos autores han reportado que las semillas de géneros de la familia Crassulaceae presentan latencia regulada por su fisiología que termina con el paso de cierto tiempo, probablemente para dar oportunidad a que las semillas se dispersen a sitios con las condiciones ideales para germinar; debido

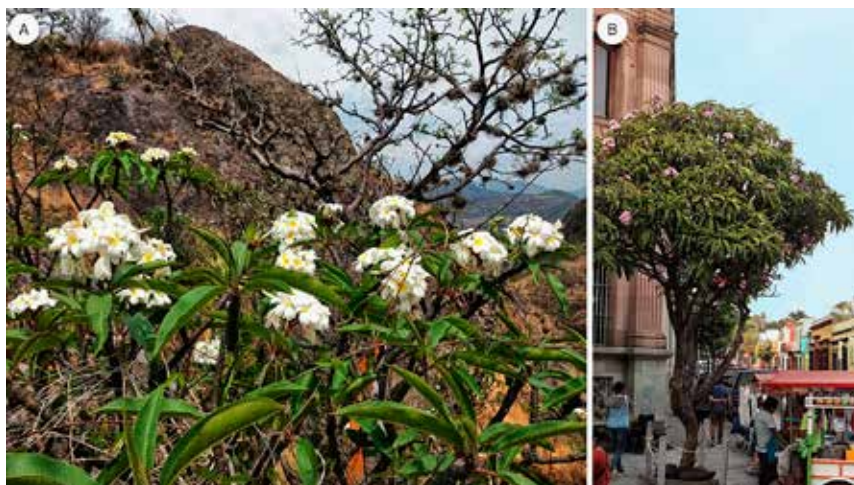


Figura 3. A) Ejemplar silvestre de *Plumeria*; B) Uso ornamental de *Plumeria*.

a esto, uno de los enfoques de los ensayos de germinación es conocer el tiempo en el que se rompe la latencia. Los ensayos consisten en resguardar las semillas durante tiempos determinados, y luego evaluar la capacidad germinativa de los lotes de semillas (Martínez-Villegas, *et al.*, 2012).

GERMINACIÓN CON FINES ORNAMENTALES

El uso ornamental de las plantas ha crecido en las sociedades y, en consecuencia, la demanda de algunas especies se ha visto superada por la oferta. Sin embargo, la germinación de especies con fines ornamentales es una práctica viable para ofertar plantas provenientes de una producción sustentable y proveer a las ciudades de plantas adaptadas a condiciones de ornato (Rodríguez *et al.*, 2009).

Los representantes del género *Plumeria* (Figura 3, A) son plantas nativas de México que han resultado ser óptimas para el arbolado urbano gracias a que crecen rápidamente y han demostrado ser resistentes a enfermedades. Sin embargo, la vigorosidad y resistencia de las plantas de *Plumeria* disminuyen en las propagaciones asexuales (por ejemplo, esquejes) (Concha, 2012). Debido a las condiciones ambientales del hábitat donde crecen, los ensayos de germinación realizados para *Plumeria* han puesto a prueba la germinación de las semillas a distintas temperaturas y poca humedad en el sustrato; se han obtenido así

porcentajes de germinación de hasta un 90 %. Sin embargo, periodos de altas temperaturas con caídas drásticas han generado porcentajes de germinación menores (30 %), que pueden ser explicados como un mecanismo de dormancia (letargo) que se activa por la variación de temperaturas que ocurre en el cambio de estación del hábitat, con el objetivo de evitar la germinación en condiciones ambientales estacionales desfavorables (Maciel y Mendoza, 2007). Por lo anterior, se ha mencionado que algunas especies de *Plumeria* germinan bien en condiciones de humedad relativamente bajas y tienen rangos amplios de tolerancia a la temperatura, lo que las hace plantas ornamentales accesibles por su fácil germinación en viveros (Maciel y Mendoza, 2007; Concha, 2012).

LIMITANTES EN LOS ENSAYOS DE GERMINACIÓN

Si bien es cierto que los ensayos de germinación son relevantes para entender el proceso de germinación de las plantas, una limitante en las investigaciones es la falta de semillas disponibles. Dicha carencia suele derivarse en que los resultados de distintos estudios hechos a una misma especie presenten variabilidad.

Por esto, para desarrollar un ensayo de germinación que represente significativamente a una especie, es importante planificar una recolecta que reúna una buena cantidad de semillas provenientes de un número grande de individuos. No obstante, la recolecta de semillas se puede complicar porque existen especies difíciles de localizar en la naturaleza, que producen

pocas semillas o cuyas etapas reproductivas y biológicas no se conocen (Rodríguez *et al.*, 2009).

CONCLUSIÓN

Los ensayos de germinación son una herramienta importante en la cadena de producción de las plantas que permite generar estrategias sustentables que atiendan la demanda de plantas sin perjudicar al ecosistema. Contribuyen también a conservar y enriquecer la diversidad genética de las especies vegetales útiles, y son indispensables para las estrategias de conservación de especies endémicas y en peligro de extinción. Sin embargo, la disponibilidad de semillas es un factor que limita el desarrollo de ensayos de germinación en una gran cantidad de especies.

AGRADECIMIENTOS

Al doctor Carlos Ruiz-Jiménez, por el conocimiento compartido en el Laboratorio de Restauración de Ecosistemas Acuáticos y Terrestres de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

REFERENCIAS

Bareke T (2018). Biology of seed development and germination physiology. *Advances in Plants & Agriculture Research* 8(4):336-46.

Carrillo-Reyes P y Pérez-Calix E (2008). Una especie nueva de *Thompsonella* (Crassulaceae) del estado de Michoacán, México. *Novon: A Journal for Botanical Nomenclature* 16(3):320-323.

Concha F (2012). *Plumeria rubra* o Flor de Mayo, una embajadora parcial. *Herbario CICY* 4:58-60.

Fehling-Fraser T y Ceccon E (2015). Macropropagación de *Erythrina americana* en invernadero: una herramienta potencial para la restauración de bosques tropicales estacionalmente secos. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 21(1):5-16.

González-Zertuche L y Orozco-Segovia A (1996). Métodos de análisis de datos en la germinación de semillas, un ejemplo: *Manfreda brachystachya*. *Botanical Sciences* 58:15-30.

Guadarrama H, Trejo J, Cruz R y Pérez A (2019). Efecto del método de escarificación sobre el porcentaje de germinación en semillas (*Erythrina americana* Miller). *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología* 2(3):12-21.

Herrera Ó (2012). *Propuesta de lista de especies prioritarias para la conservación en México*. México: CONABIO.

Martínez-Villegas J, Orozco-Segovia A, Sánchez-Coronado M and Pisanty I (2012). Germination of *Sedum oxypetalum* (Crassulaceae) in a primary lava-field shrubland. *Plant Ecology* 213(5):871-881.

Maciel N y Mendoza A (2007). Propagación por semilla y crecimiento en vivero de *Plumeria pudica* Jacq. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia* 24:95-100.

Rodríguez S, Vergara-Tenorio M, Ramos-Prado J y Sainz-Campillo C (2009). *Germinación y manejo de especies forestales tropicales*. México: CONAFORT-CONACYT.

Roberto Villagrán Torres
Facultad de Ciencias Biológicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
robertovt16@gmail.com

© Enrique Soto. *Sin título*, San Salvador El Seco, Puebla, 2005.



© Enrique Soto. *En camino*, Calpan, Puebla, ca. 1980..





© Enrique Soto. *Sin título*, Calpan, Puebla, ca. 1980..

¿Podemos producir lo mismo con menos?

Jesús Antonio **Angole Tierrablanca**
Ramón Gerardo **Guevara González**

El famoso proverbio “lo que no te mata, te fortalece” podría considerarse una analogía de un fenómeno conocido como hormesis, que describe la interacción entre un ser vivo y un agente, el cual usualmente podría considerarse como dañino e incluso tóxico.

Según la toxicología, cualquier sustancia puede ser dañina dependiendo de la dosis. La hormesis juega con este concepto para encontrar un punto medio útil en beneficio de las plantas y, en consecuencia, para el ser humano (Calabrese, 2004). Según la dosis aplicada del “veneno” será la respuesta que obtendremos, desde la inocua, hasta la letal. Lo interesante es descubrir si existe alguna dosis con la cual tengamos un efecto benéfico para el organismo (Agathokleous y Calabrese, 2019).

PROBLEMAS ACTUALES EN LA AGRICULTURA

La agricultura utiliza principalmente agua y suelo para la producción de alimentos. Anualmente, el sector agrícola consume grandes cantidades de estos recursos debido a malas prácticas agrícolas e ideas antiguas; por ejemplo, la premisa de que “más es mejor”, refiriéndose al uso de agroquímicos y fertilizantes empleados de forma desmedida. Esta creencia puede ser contraproducente para el equilibrio ecológico en el ecosistema y, de hecho, ha sido dañina para los cultivos, ya que promueve la aparición de plagas y patógenos más resistentes que crecen sin la competencia

de otros depredadores. Actualmente se buscan estrategias que ayuden a mitigar los efectos derivados de décadas de malas prácticas. Entre ellas están la remediación del suelo, la introducción de microorganismos benéficos, el mejoramiento de los sistemas de riego, etcétera. Sin embargo, la humanidad requiere de alimentos en grandes cantidades, y dicha demanda se incrementará aún más con el paso del tiempo. La producción de alimentos de manera sustentable es un reto extremadamente complejo. Una estrategia para resolver esta problemática es el mejoramiento de los cultivos; es decir, contar con variedades de cultivos que puedan adaptarse a condiciones adversas. Esto se puede lograr modificando su metabolismo y fisiología para garantizar su crecimiento. A través de esta estrategia, las variedades se adaptan aun cuando se encuentren en condiciones que les produzca estrés, como el cambio climático (Gupta *et al.*, 2020)

AGENTES ESTRESORES

Cuando pensamos en la producción de alimentos (frutas, hortalizas, semillas, etc.), nos imaginamos muchas hectáreas de terreno, o bien, invernaderos sumamente controlados para producir grandes cantidades y reducir las pérdidas. Pese a los sistemas de control, las plantas están en un constante cambio de las condiciones del medio; estos cambios generan cierta cantidad de estrés, al cual la planta debe aprender a adaptarse modulando sus mecanismos fisiológicos para asegurar su supervivencia. Tales cambios constantes en el entorno se explican con el fenómeno de la alostasis, que se adapta y complementa con el concepto de homeostasis, que tradicionalmente ha considerado que los organismos mantienen un estado basal de equilibrio interno en el que no experimentan estrés, y que cualquier perturbación externa rompería dicho equilibrio. Sin embargo, en la naturaleza, la homeostasis es un proceso dinámico y continuo que implica una regulación constante de las condiciones internas, permitiendo que los organismos se adapten a los cambios ambientales de manera eficiente, sin un estado fijo de reposo absoluto (Lemos, 2015).

Para entender el concepto de la hormesis, debemos decir que existen muchos tipos de agentes estresores para los cultivos, por ejemplo, ciertos tipos de radiación ultravioleta, el sonido, los cambios de temperatura, la salinidad del suelo, la presencia de patógenos o plagas, la falta o exceso de agua y nutrientes, etcétera; muchos de estos fenómenos ocurren todos los días y no tenemos un control estricto sobre ellos, al menos no de forma inmediata (Caicedo-López *et al.*, 2021). Cuando estos estresores entran en contacto con los organismos tienden a promover la producción de radicales libres, formados por las especies reactivas de oxígeno (EROs) como O_2^- , H_2O_2 y OH . Estos compuestos están asociados a procesos muy importantes como la diferenciación celular (a qué función se va a dedicar esa célula), la apoptosis (muerte celular programada) y la necrosis (muerte celular). Sin embargo, los radicales libres en grandes cantidades son muy peligrosos debido a su alta reactividad y a su facilidad para desestabilizar ciertas estructuras celulares, lo cual podría llevar a la muerte de la planta (Figura 1) (Jomova *et al.*, 2023).

ELICITACIÓN

Recordando el concepto de alostasis podemos considerar que la planta buscará algún mecanismo para defenderse ante condiciones adversas; esto lo hará mediante la activación de su sistema inmunitario de forma similar a como lo hace el ser humano. Lo primero que hará la planta es defenderse mediante enzimas antioxidantes (superóxido dismutasa, glutatión peroxidasa y catalasa) que intentarán convertir los radicales libres generados por el estrés en moléculas estables como el agua, que no representan un peligro para la planta. Pero esta defensa no es cien por ciento efectiva.

Existe otro mecanismo de defensa: la producción de metabolitos secundarios con capacidad antioxidante (fenoles y flavonoides). Los metabolitos también ayudan en la captura y estabilización de moléculas peligrosas. A la activación del sistema inmunitario por efecto de algún agente estresor (elicitador) se le conoce como elicitación (Figura 1) (Godínez-Mendoza *et al.*, 2023; Jomova *et al.*, 2023).

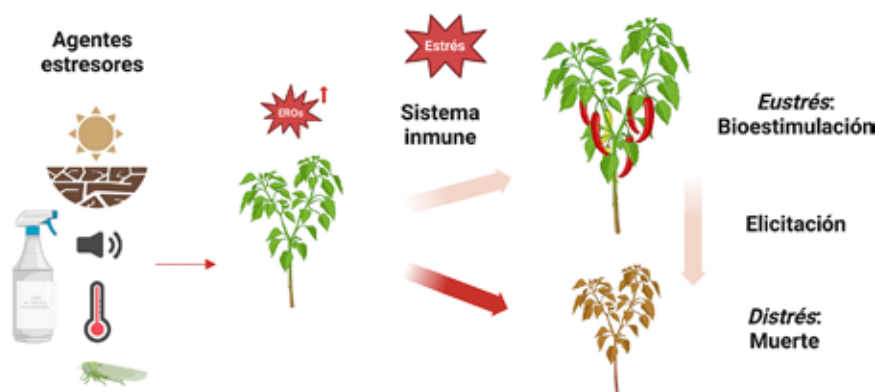


Figura 1. Posibles respuestas de la planta frente a un agente estresor que incrementa el estrés oxidativo mediante la producción de especies reactivas de oxígeno (EROs), y la activación del sistema inmunitario. Estas respuestas pueden derivar en eustrés o distrés, dependiendo de la magnitud del estrés inducido. Basado en Godínez-Mendoza *et al.* (2023) y creado en BioRender.

Muchos de los metabolitos secundarios son de interés a nivel nutricional, como el licopeno en el jitomate y la capsaicina en el chile. Sin embargo, hay que recordar que la función principal del sistema inmunitario es asegurar la supervivencia de la planta ante condiciones desfavorables, como el estrés hídrico, aun cuando la planta deba sacrificar su crecimiento. Una de las respuestas de supervivencia es la síntesis de algunos azúcares altamente solubles en agua (osmolitos); los osmolitos, bajo condiciones de estrés hídrico, retienen la poca cantidad de agua que ingresa a través de la raíz y que se distribuye por toda la planta (Moreno, 2009).

BIOESTIMULACIÓN

Otro fenómeno relacionado con la hormesis es el de bioestimulación, que implica una respuesta benéfica para la planta ante algún agente promotor del crecimiento. Usualmente, los agentes bioestimulantes logran que las plantas se desarrollen de mejor manera, incrementen su área foliar e incluso generen frutos más grandes (Figura 1). Muchos de estos promotores del crecimiento pueden ser de origen no biológico, por ejemplo, el sonido y la luz; algunos otros promotores pueden ser organismos vivos como bacterias y hongos benéficos. Además, existen algunos promotores que son producto del metabolismo de las plantas, como el ácido salicílico e incluso el peróxido de hidrógeno (H_2O_2); estos son considerados dentro del grupo de las hormonas vegetales. Los promotores del crecimiento (elicitores) han sido calificados como estimulantes del sistema inmunitario de la planta,

así como la activación de genes asociados a ciertos tipos de estrés. Un ejemplo de esto es el H_2O_2 , cuya implicación en la expresión de genes asociados al estrés hídrico (falta o exceso de agua) está demostrada. (Caicedo-López *et al.*, 2021).

HORMESIS: LA DOSIS PERFECTA

Con base en la presentación de los conceptos de elicitación y bioestimulación se abordará ahora la hormesis, qué es y cómo manejarla para nuestro beneficio.

Coloquialmente, se dice que nada es bueno o malo *per se*, todo depende de la dosis. Como hemos aprendido, las plantas, y en general todos los organismos vivos, buscarán la supervivencia, aun si deben modificar algo en su estructura o en su metabolismo (Calabrese, 2004). Pero, ¿cómo algo tóxico o dañino puede hacer bien a los cultivos? Como se mencionó, existen diferentes tipos de estresores, los cuales pueden ser físicos (luz, sonido, alta o baja temperatura, sequía), biológicos (insectos, microorganismos, fragmentos de moléculas o productos de su metabolismo), químicos (sustancias químicas de origen no biológico y elementos tóxicos). Se ha demostrado que la aplicación de algunos agentes, como nanopartículas de dióxido de titanio en concentraciones de 25 a 100 partes por millón, inducen en plantas como el maíz y el tomate la activación de su sistema inmunitario o la modificación de ciertas estructuras para defenderse del estrés (Trela-Makowej *et al.*, 2023). En ocasiones, esta respuesta permite que el organismo se adapte a

Típica Respuesta Hormética Dosis-Respuesta

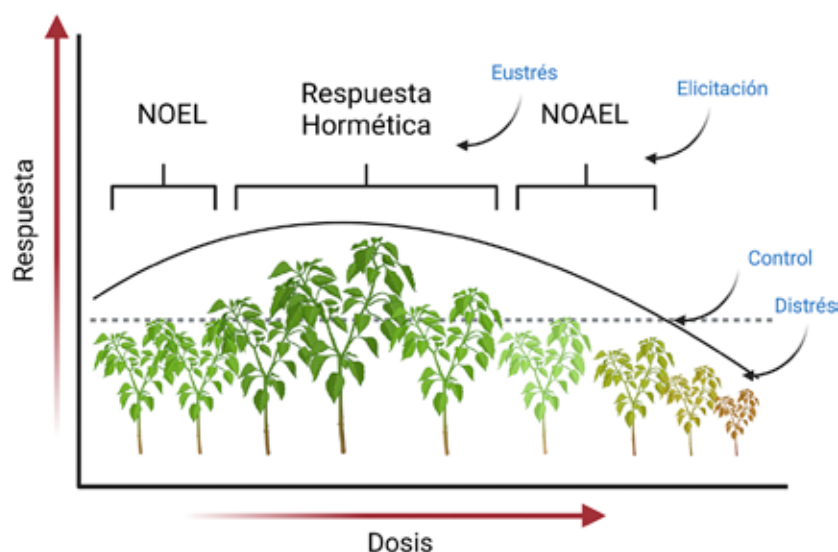


Figura 2. Típica respuesta hormética de la planta al incremento de la dosis de un agente estresor; obsérvense las cuatro principales fases de la hormesis. Basado en Agathokleous *et al.* (2018) y creado en BioRender.

las nuevas condiciones, lo que incluye un aumento del área foliar, raíces más fuertes e incluso una mayor producción de antioxidantes. Este fenómeno, conocido como *eustrés* o estrés beneficioso, está estrechamente vinculado al concepto de hormesis. Ahora bien, la hormesis consta de cuatro fases principales. La primera de ellas es NOEL, por sus siglas en inglés, que significa sin efecto observado; en esta etapa, las plantas no sufren daño o cambio significativos después de la aplicación del agente estresor. Cuando incrementamos la dosis podemos encontrar la zona de bioestimulación en la cual las plantas se desarrollan de mejor manera, forman estructuras más resistentes, producen más frutos, etcétera. Sin embargo, si se continúa incrementando la dosis del estresor llegará a un punto en que la respuesta hormética se detenga y comience la toxicidad; aquí, la planta entra en la fase conocida como NOAEL (efectos adversos no observados). Muchas veces esta fase está vinculada a la síntesis de metabolitos secundarios como respuesta al estrés (elicitación) (Agathokleous *et al.*, 2018). Sin embargo, se debe tener en cuenta que no todas las plantas funcionan de la misma manera; esto significa que lo que para alguna planta es beneficioso, para otra podría ser mortal. Esta última condición se conoce como *distrés*, debido a que la planta sufre

tanto estrés y la respuesta de defensa de la planta se incrementa a tal nivel que simplemente decae el crecimiento e incluso muere (Figura 2) (Agathokleous y Calabrese, 2019; Godínez-Mendoza *et al.*, 2023).

Recientemente se ha investigado el uso de ciertos agentes que suelen generar “toxicidad” para utilizarlos como promotores del crecimiento; algunos de estos agentes incluyen el uso de nanopartículas con metales pesados, la irradiación con luz ultravioleta, la aplicación de compuestos altamente reactivos como el peróxido de hidrógeno, e incluso agentes patógenos, o parte de ellos, como alternativa a ciertos agroquímicos (Trela-Makowej *et al.*, 2023). Este comportamiento se ha observado en plantas de jitomate, chile, lechuga, pepino, brócoli, maíz, arroz, tabaco e inclusive en plantas ornamentales. Lo anterior sugiere que quizás se pueda manipular el comportamiento hormético de las plantas para obtener rendimientos similares a los actuales, pero con el uso de menos recursos debido a que estas plantas, previamente estresadas, buscarán la optimización de los recursos para su desarrollo y supervivencia, y generarán una adaptación al medio (Godínez-Mendoza *et al.*, 2023).

CONCLUSIÓN

El estudio y manejo de la hormesis en la producción agrícola es una alternativa ante la situación climática



© Enrique Soto. Sin título, Pátzcuaro, Michoacán, ca. 1981.



© Enrique Soto. Sin título, Pátzcuaro, Michoacán, ca. 1981.

actual. El conocimiento de los fundamentos básicos de respuesta ante un agente estresor (biótico o abiótico) permitiría generar plantas con capacidad de adaptación a condiciones adversas. Si se aplica de manera intencional un agente estresor en bajas concentraciones, se puede inducir el desarrollo de mecanismos de defensa (posiblemente heredables); estos mecanismos le permitirán a la planta adaptarse a condiciones como la sequía, los suelos salinos o las altas y bajas temperaturas. Con la aplicación intencional de algún agente estresante es posible simular un ambiente hostil; es decir, inducir a la planta para que busque optimizar recursos (agua y nutrientes).

Así, es posible que los cultivos tengan un desarrollo normal a pesar de una disminución en los recursos disponibles; o, por el contrario, que incrementen el desarrollo y producción de plantas que utilicen eficazmente los recursos que le son suministrados. Entonces, se puede decir que mediante el manejo de la hormesis en los cultivos, bajo ciertas condiciones, menos puede ser más, y que se abre ante nosotros una perspectiva diferente de la agricultura sostenible.

AGRADECIMIENTOS

A CONAHCYT, por el apoyo para estudiar la Maestría en Biosistemas. A la Universidad Autónoma de Querétaro, por el respaldo durante esta trayectoria.

REFERENCIAS

Agathokleous E and Calabrese EJ (2019). Hormesis: The dose response for the 21st century: The future has arrived. *Toxicology* 425:152249.

Agathokleous E, Kitao M and Calabrese EJ (2018). Environmental hormesis and its fundamental biological basis: Rewriting the history of toxicology. *Environmental Research* 165:274-278.

Caicedo-López LH, Aranda ALV, Gómez CEZ, Márquez EE y Zepe-da HR (2021). Elictores: implicaciones bioéticas para la agricultura y la salud humana. *Revista Bioética* 29:76-86.

Calabrese EJ (2004). Hormesis: from marginalization to mainstream: a case for hormesis as the default dose-response model in risk assessment. *Toxicology and applied pharmacology* 197(2):125-136.

Godínez-Mendoza PL, Rico-Chávez AK, Ferrusquía-Jiménez NI, Carbajal-Valenzuela IA, Villagómez-Aranda AL, Torres-Pacheco I and Guevara-González RG (2023). Plant hormesis: Revising of the concepts of biostimulation, elicitation and their application in a sustainable agricultural production. *Science of The Total Environment* 164883.

Gupta A, Rico-Medina A and Caño-Delgado AI (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science* 368(6488):266-269.

Jomova K, Raptova R, Alomar SY, Alwasel SH, Nepovimova E, Kuca K and Valko M (2023). Reactive oxygen species, toxicity, oxidative stress, and antioxidants: Chronic diseases and aging. *Archives of toxicology* 97(10):2499-2574.

Lemos M (2015). La teoría de la alóstatas como mecanismo explicativo entre los apegos inseguros y la vulnerabilidad a enfermedades crónicas. *Anales de Psicología/Annals of Psychology* 31(2):452-461.

Moreno LP (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía colombiana* 27(2):179-191.

Trela-Makowej A, Orzechowska A, Szymańska R (2023). Less is more: The hormetic effect of titanium dioxide nanoparticles on plants. *Science of The Total Environment* 168669.

Jesús Antonio Angole Tierrablanca
Ramón Gerardo Guevara González
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Campus Amazcala
jesus.a.angole.t@gmail.com



© **Enrique Soto.** *Sin título*, Pátzcuaro, Michoacán, ca. 1981.



© **Enrique Soto.** *Sin título*, Puerto de Veracruz, ca. 1978.

Vida campesina, tianguis y territorios

María Cristina **Chávez Mejía**
Noemí **Guadarrama Martínez**

México es un país biodiverso con una gran riqueza cultural representada por sus 68 grupos indígenas y sus respectivas lenguas originarias, sus técnicas agropecuarias tradicionales, saberes ambientales y sistemas socioculturales. Ante la crisis ambiental y el impacto del cambio climático en la producción de alimentos, es urgente revalorar y rescatar métodos agropecuarios tradicionales y fomentar cadenas cortas de comercialización como los tianguis indígenas y campesinos. El término tianguis proviene del náhuatl *tianguiztli*, que significa mercado. El tianguis existe en México desde la época prehispánica como mecanismo económico destinado al comercio de mercancías, bienes y servicios (INA, 2022). Los tianguis prevalecen porque representan las tradiciones alimentarias locales y regionales, por la costumbre mexicana profundamente arraigada de acudir al mercado para adquirir alimentos diversos y frescos (Denham, 2021).

Los tianguis también son atractivos por los colores, olores, formas y sabores de los numerosos productos agropecuarios, de pesca y de recolección. Es importante contribuir a entender su complejidad y su relevancia para aspirar a una soberanía alimentaria, simplemente con observar el origen de los alimentos que se ofertan y su relación con la vida campesina y su territorio. La investigación se llevó a cabo en el tianguis municipal de Ixtlahuaca,

EL TIANGUIS DE IXTLAHUACA

En el municipio se hablan varias lenguas indígenas, las más habladas en el 2020 fueron mazahua (22,002 habitantes), otomí (179 habitantes) y náhuatl (99 habitantes) (Gobierno de México s/f).

económicas más importantes de la región; actualmente se establece en la explanada sur del mercado de nombre Plaza Nueva Primero de Septiembre, Ixtlahuaca de Rayón, se considera uno de los más importantes del Estado de México (López, 2020); se ofertan un sinnúmero de productos, sobre todo agropecuarios.

La importancia agropecuaria de Ixtlahuaca es tal que, además del tianguis de los lunes, hay otro que se establece de martes a domingo en un horario de 3 a. m. a 10 a. m.; a este se le conoce localmente como la plaza o la placita o tianguis, y es como un mercado campesino porque hombres y mujeres campesinos y recolectores, ofertan productos agropecuarios, de pesca y de recolección; además, venden alimentos tradicionales preparados con lo que cultivan, pescan, crían y recolectan.

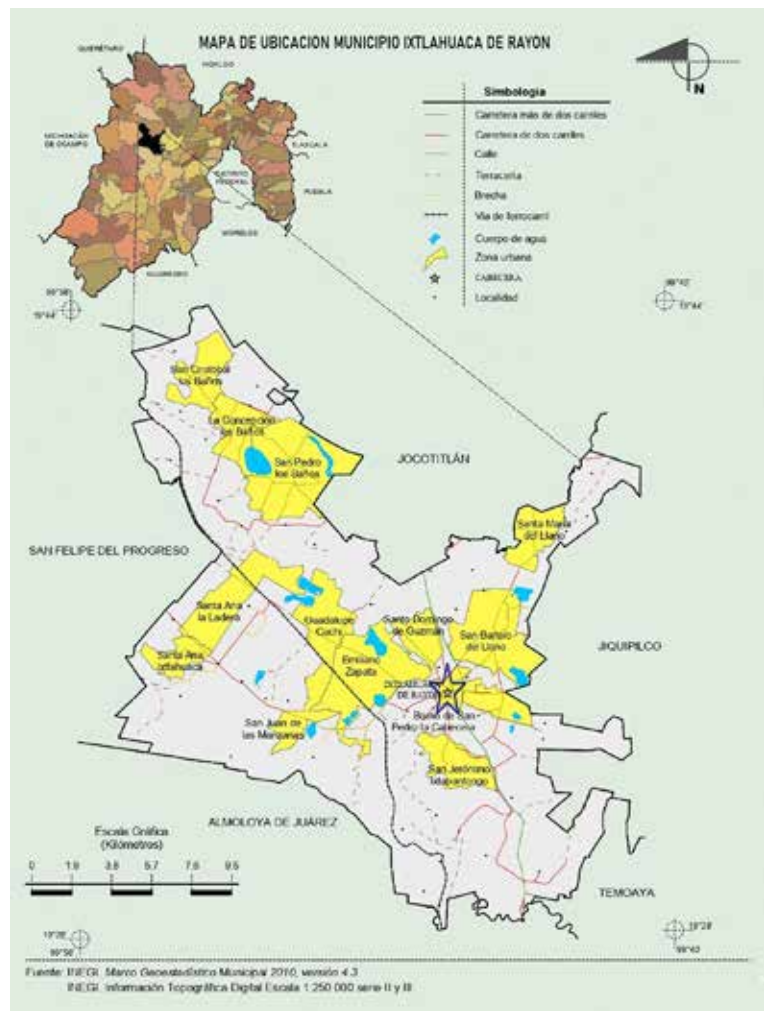


Figura 1. Ubicación del municipio de Ixtlahuaca de Rayón, Estado de México. Fuente: Compendio de información geográfica municipal (INEGI, 2010).



Figura 2. Formas de comercialización. Fuente: trabajo de campo.

Durante el periodo de la presente investigación se identificaron oferentes de once comunidades de Ixtlahuaca: Santa Ana Ixtlahuaca, San Bartolomé del Llano, Emiliano Zapata, San Francisco, San Lorenzo Toxico, Santo Domingo Huerejé, Santo Domingo del Llano, San Mateo, San Jerónimo Ixtapantongo, San Joaquín El Junco, San Ildefonso; y de municipios vecinos de Jiquipilco, Jocotitlán, San Felipe del Progreso.

También se abastecen revendedores de la ciudad de Toluca y de la Ciudad de México.

Los comerciantes pagan una cuota por puesto, y los ambulantes también.

En caso de que no vendan lo esperado, los mercaderes de puesto fijo deambulan por el tianguis ofreciendo sus productos y, en algunos casos, venden sus productos muy baratos, ya que de no hacerlo se podrían echar a perder y no habría ninguna ganancia.

[...] ya no podemos vender después de las diez de la mañana, porque no lo tenemos permitido. Estas son palmitas, están de a cinco el manojo, las puede hacer en ensalada o comer como el pápalo, las recogemos de zanjas donde corre el agua, pero se come, llévelo. (Nazaria, 40 años, Santa María del Llano.)

Compre al menos una bolsita, no he vendido, mire, vamos al monte por las flores, es difícil bajarlas, jalamos el qurote con una cuerda y cortamos las flores, son muy sabrosas, pero hay que saber prepararlas, estas ya están limpias, llévelas. (Silvia, 28 años de edad, Santa Ana Ixtlahuaca.)

Como parte de sus estrategias de venta está el remarcar que lo que venden son productos criollos, frescos y libres de agroquímicos; dan pruebas y regalan, o dan pilón de lo que venden y también se practica el regateo.

Lleve quintoniles o verdolagas o los dos, son criollos, están limpios, los lavo con agua limpia, crecen solitos entre el nabo, el tomate y la calabacita, no les ponemos químicos, los junté temprano, están frescos. (Teresa, 45 años, Santo Domingo del Llano.)

Traigo todo de San Bartolo, no regamos con aguas negras, todo es agua limpia, lléveselas, sí, sí, señorita, lo que quiera, estos nabos son recolectados, nosotros no cultivamos, ya no saben igual, llévase el manojo en quince pesitos. (Susana, 52 años, Santo Domingo Huerejé.)

Estos nopales tienen más espinas porque son criollos, estos son de monte, verdes y moraditos, están bien tiernitos, aquí los vendemos y en el pueblo, con la familia, nos gusta mucho ir al monte a juntar nopalitos, son muy sabrosos, vamos cuatro o cinco veces al año, pues también juntamos capulines, tejocotes, medicina, hongos... (Mateo, 50 años, San Lorenzo Toxico.)

Se identificaron las siguientes formas de comercialización (Figura 2): los quelites en brazada, montón,

manejo, bolsa de 1 kilo, cubetas grandes y pequeñas (2 y 5 litros), bote (19 litros), docenas, ayates; fruta en cubeta (10 litros); las plantas medicinales en manojo, por pieza, montón (malva); las ornamentales en maceta, por esqueje o en pequeñas bolsitas; semillas de maíz, frijol, haba (cuartillo, bote o litro), calabaza, semillas de hortalizas y plantas ornamentales en bolsas pequeñas de 20 a 100 gramos, dependiendo del tipo de semilla; plántulas de hortalizas, entre otros.

[...] Lleve maíz negrito, blanco, rosado o este anaranjado, todos son criollos, lleve un litro de todos, hay que comer de lo bueno, si no para qué trabajamos. (Martina, 55 años, Santa Ana Ixtlahuaca.)

Ya tengo muchos años que vendo aquí, llega mucha gente a comprar de todos lados, se llevan todo hasta México, a la central de Toluca, se van para Atlacomulco y se llevan las cosas por cajas y manojos grandes, ya después solo nos quedamos las que vendemos poquito, así como yo que traigo habas, dos costales, y unas malvas que colecto y vendo así en bolsas. (Remedios, 48 años, San Francisco.)

Se venden también gallinas criollas limpias de plumas; huevo de gallinas, por kilo o por pieza, para comer o para empollar. De los cuerpos de agua se venden carpas frescas por kilo y acociles por platitos.

Entre los alimentos preparados hay tortillas blancas, azules, rosas, blancas con trigo; tamales dulces y de salsa, atoles, pinole, nopales en guisos o ensaladas, pozole de trigo, habas hervidas y tostadas, semillas de calabaza tostadas con sal y tamales de charales.

TIANGUIS Y TERRITORIOS

La diversidad de productos agropecuarios, de pesca y de recolección se relaciona con la actividad campesina de hombres y mujeres con base en el acceso a la tierra y a otros recursos naturales. En las parcelas agrícolas y solares familiares de su propiedad deciden qué cultivar y bajo qué sistemas de cultivo, que generalmente es la milpa en diferentes arreglos, y desde hace aproximadamente 15 años, mediante programas gubernamentales, en invernaderos o microtúneles.

Cultivan maíces nativos de color amarillo, azul, blanco, pinto y rosado, en sus diversas tonalidades y formas; calabazas, chilacayotes, frijol y haba; hortalizas y frutillas (principalmente en invernaderos), entre otros, además recolectan quelites, hongos, nopales y flores de maguey. Antes de la siembra se riega con agua de bordos o de los ríos.

En los solares familiares (Figura 3) las mujeres crían pollos, gallinas, guajolotes, borregos, patos y conejos y los hombres cuidan a los équidos (caballos, burros machos y mulas) y a las vacas y toros.





Figura 4. Comercialización de productos agropecuarios, pesca y recolección. Fuente: trabajo de campo.

Aunque existe división de responsabilidades por género para la cría de estos animales, entre ambos, hombres y mujeres, se apoyan para cuidarlos.

Los recursos de uso común son bosques y pastizales, a los cuales tienen acceso los habitantes de las comunidades con base a normas locales (derecho consuetudinario), como el observar el aprovechamiento sustentable de los recursos en los cuales se recolectan plantas alimenticias, medicinales, ornamentales, rituales y hongos comestibles; de los alrededores de los cuerpos de agua como presas y bordos, arroyos y ríos recolectan plantas alimenticias, medicinales y rituales; de presas y bordos pescan carpas, acociles y charales.

La comercialización de los productos agropecuarios, de pesca y de recolección (Figura 4) es posible, por una parte, por los conocimientos de campesinos y campesinas para cultivar la tierra, para criar animales y aprovechar los recursos de recolección y acuáticos, y por otra, por la posesión privada de la tierra y la existencia de la propiedad social de esta, mediante la figura de ejidos, lo que posibilitan el aprovechamiento de recursos en espacios de uso común como bosques y pastizales.

Las actividades en los espacios familiares y comunitarios permiten la transmisión de conocimientos a las generaciones jóvenes; mediante la práctica, se aprende cómo cultivar la tierra bajos diversos sistemas de cultivo; se aprende a nombrar los recursos de pastizales, bosques y cuerpos de agua;

particularmente, las mujeres transmiten y aprenden cómo preparar alimentos tradicionales.

La constante interacción con la familia y la comunidad, mediante las actividades agropecuarias, pesca y recolección, resulta en la apropiación material y simbólica del territorio (López, 2018), los recursos naturales en Ixtlahuaca tienen un significado para la obtención de bienes para la familia y para la venta; detrás de los bienes que se venden está el trabajo de la gente en parcelas agrícolas, cuerpos de agua y bosques, además su aprovechamiento en las cocinas locales, refleja parte de la bioculturalidad del municipio, por lo que, como lo señala Sergio Moctezuma, los tianguis son repositorios culturales, económicos y ecológicos (Moctezuma, 2021).

De aquí la importancia de la compra en mercados y tianguis campesinos, donde se apoya a la economía local y permite el arraigo territorial, la continuidad de la actividad agropecuaria, de sus prácticas culturales y la protección de los territorios campesinos.

CONCLUSIÓN

El identificar el origen de los alimentos en el tianguis de Ixtlahuaca y su relación con la vida campesina y su territorio, contribuye a entender la complejidad que hace posible la disponibilidad de alimentos; todavía queda



© Enrique Soto. *Jugando en la playa*, San Agustínillo, Oaxaca, 2013.

por observar la contribución de la venta de productos a la economía familiar, el aporte nutricional de los alimentos locales a la salud familiar, los recursos que se aprovechan por tipo de bosque y cuerpos de agua, así como identificar riesgos para su conservación.

El entramado entre los tianguis campesinos y las actividades de mujeres y hombres en su territorio, forma parte de las cadenas cortas de comercialización a tomar en cuenta en políticas públicas para la preservar la biodiversidad en general y la agrobiodiversidad en particular, los conocimientos tradicionales y las cocinas locales, como parte de la soberanía alimentaria.

REFERENCIAS

Ayuntamiento de Ixtlahuaca (2022-2024). *Monografía*. Recuperado de: <https://www.ixtlahuaca.gob.mx/pages/ixtlahuaca/monografia>.

Denham D (2021). El tianguis en la era del supermercado. En Moctezuma S y Sandoval D (Comp.), *Mercados y tianguis en el siglo XXI. Repensando sus problemáticas* (pp. 347-370). Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

Gobierno de México (s/f). *Ixtlahuaca, municipio*. Recuperado de: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/ixtlahuaca>.

INA (2022). Glifo tianquiztli: el mercado como lugar sagrado. Recuperado de: <https://inah.gob.mx/foto-del-dia/glifo-tianquiztli-el-mercado-como-lugar-sagrado>.

INEGI (2010). *Compendio de Información Geográfica Municipal 2010*, Ixtlahuaca México. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15042.pdf.

INEGI (2020). Google Maps. Ubicación municipio de Ixtlahuaca, Estado de México. Recuperado de: https://www.google.com.mx/maps/place/Tianguis/@19.5646017,-99.7679246,17z/data=!3m1!4m6!3m5!1s0x85d2653eed5d58c7:0x77367fb138e6e622!8m2!3d19.5646017!4d-99.7653497!16s%2Fg%2F11v68mpkzy?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MDgyMS4wLWIKXMDSoASAFQAw%3D%3D.

López J (2018). La apropiación simbólica del territorio. Una tradición actualizada desde la nueva geografía cultural. *Revista Geográfica Venezolana* 59(2):434-447. <https://www.redalyc.org/journal/3477/347760473010/347760473010.pdf>.

López S (2020). El tianguis de Ixtlahuaca, una explicación histórica-social y económica y cultural. Ixtlahuaca, Gobierno Municipal 2019-2021. Recuperado de: https://ixtlahuaca.gob.mx/build/docs/comunicacion/revista/2020/02_febrero-marzo_2020.pdf.

Moctezuma P (2021). Repensando los aportes del estudio del sistema tianguis y mercado. En Moctezuma PS y Sandoval GD (Comp.), *Mercados y tianguis en el siglo XXI. Repensando sus problemáticas* (pp. 21-30). Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.

Secretaría del Campo (2020). Primeros Lugares de Producción Agrícola del Estado de México 2020. Recuperado de: https://secampo.edomex.gob.mx/sites/secampo.edomex.gob.mx/files/files/Produccion/Primeros_Lugares_Agricola.pdf.

María Cristina Chávez Mejía
Noemí Guadarrama Martínez
Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales
Universidad Autónoma del Estado de México
cchavezm@uaemex.mx



BUAP



EN LA PREVENCIÓN DEL SUICIDIO



EL SUICIDIO SE PUEDE PREVENIR

Pedir ayuda te fortalece y tú puedes

ayudarte y ayudar

- Caminar diariamente 10 minutos, en lugares donde haya plantas.
- Ordenar tus horarios (dormir, comer, estudiar o trabajar, distraerte).
- Escribir tus problemas y darle un orden.
- Concentrarte en el que más te preocupa, compartirlo con alguien.
- Organizar tus días.
- Arreglarte para ti.
- Recordar que, lo que estás viviendo y te perturba, con el tiempo se verá de manera diferente.
- Identificar tus cualidades, escribirlas y leerlas diariamente.



Imagen de arte Huichol



Escanear para
más información

¿Qué se puede hacer?

- Evitar dejar sola a la persona.
- Hablar directamente acerca del suicidio.
- Escuchar atentamente.
- Entender sus opiniones e ideas.
- Permitir expresar sus emociones.
- Dar la importancia requerida a su problema.
- Brindar compañía y comprensión.
- Buscar apoyo en personas significativas y de confianza.
- Priorizar las dificultades y problemas que enfrenta.
- Buscar ayuda profesional.



Imagen de arte Huichol

Fuente: Organización Mundial de la Salud
Elaboración: Cuerpo Académico Psicología y Salud.
BUAP CA - 208
Facultad de Psicología
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

BUAP

Vicerrectoría de Investigación
y Estudios de Posgrado

En México el suicidio es una de las principales causas de muerte

- Según la Organización Mundial de la Salud, cerca de 800,000 personas en el mundo se suicidan cada año.
- Equivale a un suicidio cada 40 segundos.
- Intentan suicidarse un mayor número de mujeres que de hombres.
- Se suicida un mayor número de hombres que de mujeres.
- La persona suicida desea vivir y morir, da señales a su alrededor que indican el deseo de matarse.



Imágenes de arte Huichol

El suicidio es una tragedia que afecta a la familia y amigos

No se pueden evitar todos los suicidios **pero sí la mayoría**

Posibles causas de ideas suicidas:

- Haber sufrido abuso sexual o violación.
- Estar desempleado o buscando trabajo.
- Pobreza extrema.
- La muerte de un ser querido.
- Vivir un divorcio.
- Tener una enfermedad terminal.
- Consumo excesivo de alcohol o drogas.
- Tener conflictos de pareja.
- Sufrir violencia escolar (bullying).
- Tener una desilusión amorosa.
- Violencia en la pareja.
- Ser discriminada/o.
- Depresión, ansiedad y miedo.
- Sufrir catástrofes naturales.
- Enfrentar acoso laboral (moobing).
- Sufrir estrés laboral (burnout).
- Aislamiento social.

Señales de ideas suicidas:

- Alteración en el comer o en el dormir.
- Bajo rendimiento escolar o en el ritmo de trabajo.
- Buscar situaciones de riesgo y tener accidentes.
- Emplear frases que expresan poco interés por la vida como: *"Quisiera estar muerta/o"*, *"Quisiera estar sola/o"*, *"Nadie me entiende"*.
- Tener ánimo constantemente deprimido desesperado.
- Descuidar la apariencia personal.

Señales de alarma:

- Hablar de la muerte como una forma de evitar el sufrimiento.
- Regalar sus cosas favoritas o dejar en orden papeles personales.
- Investigar sobre sustancias tóxicas y armas.
- Despedirse de los seres queridos y amigos.
- Tener fantasías sobre su propia muerte.



Imagen de arte Huichol

BUAP

