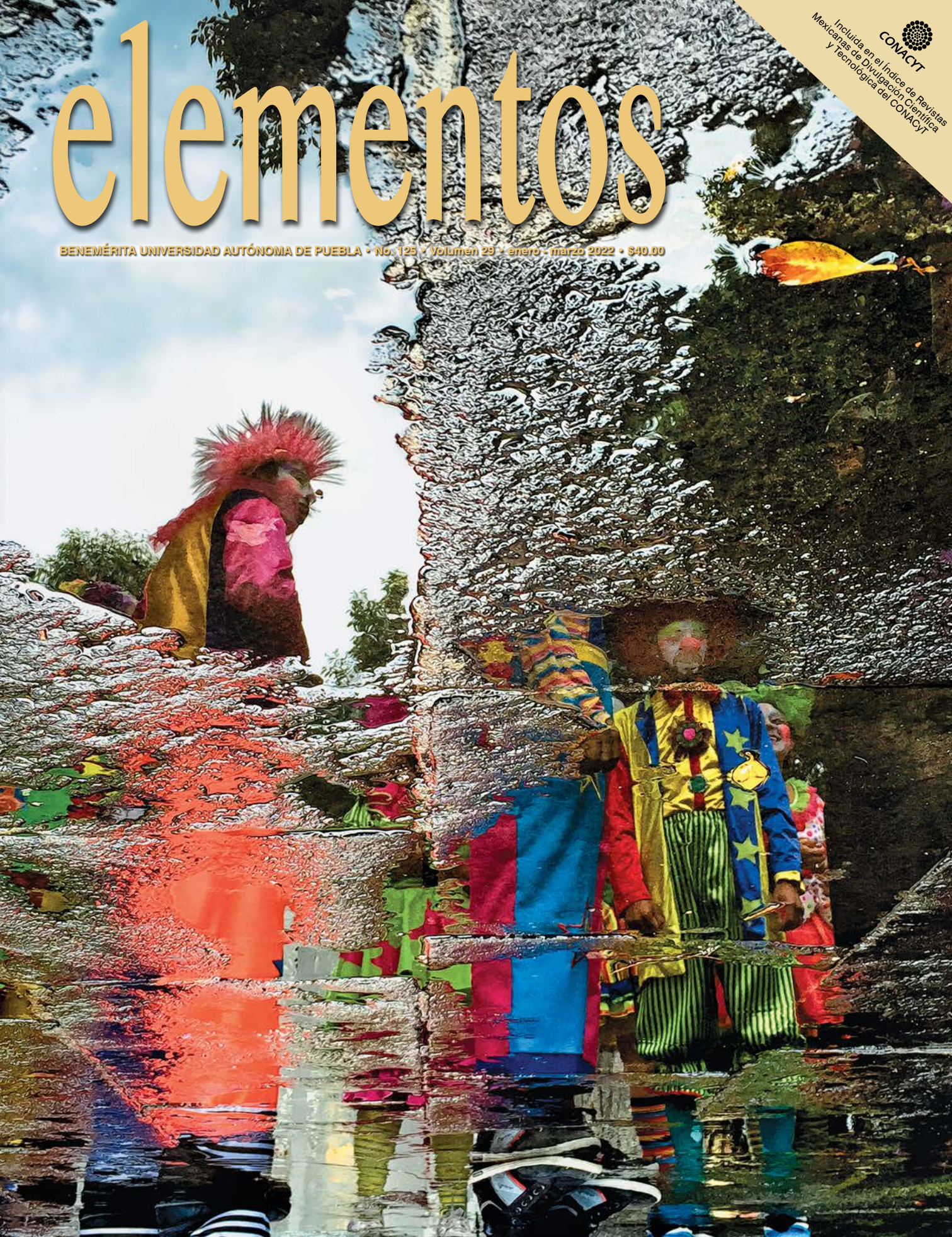


elementos

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA • No. 125 • Volumen 29 • enero - marzo 2022 • \$40.00

CONACYT
Incluida en el Índice de Revistas
Mexicanas de Investigación Científica
y Tecnológica del CONACYT



EXHIBIR HASTA EL 31-MARZO-2022

La poesía y el cerebro: ¿es viable una neuropoética? | La separación ciencia-neutralidad... | Biología cuántica en el transporte de iones a través de membranas celulares | El Premio Nobel de Fisiología y Medicina 2021 | Consumo de opioides y pérdida de la audición | Robots en la medicina actual | Sensores micrométricos para el monitoreo de variables electroquímicas y biológicas | *Homo imperfectus* | Retos del sector eólico en México | Cuadernos de *Elementos* número 10. De Cholollan a Cholula... | Obra fotográfica: Carlos Mario Delacruz



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 125, volumen 29, enero-marzo de 2022

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 (CONACYT), 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, © Carlos Mario Delacruz
 De la serie *El espejo onírico*

CINTILLO LEGAL

ELEMENTOS, Año 37, No. 125. Enero a marzo de 2022, 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. Número de Certificado de Licitud de Título y Contenido (en trámite) en la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa en FD Servicios Integrales S.A. de C.V. contacto@fdimpres.com. Cerrada de la 5 Oriente, No. 2, Col. Guadalupe Tlatelapa, San Francisco Totimehuacán, Puebla, C. P. 72960, Tel 2222 8123 33. Este número se terminó de imprimir en diciembre de 2021 con un tiraje de 1000 ejemplares. Costo del ejemplar \$40.00. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
 CONACYT DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



La poesía y el cerebro: ¿es viable una neuropoética? **3**

Elisa Díaz Castelo, José Luis Díaz Gómez

La separación ciencia-neutralidad: las grandes narrativas de la demarcación científica moderna versus su legitimación postmoderna **9**

Víctor Emmanuel Rojas Mendoza

Biología cuántica en el transporte de iones a través de membranas celulares **17**

Maricruz Rangel-Galván, Violeta Rangel-Galván,

Alejandro Rangel-Huerta

Obra fotográfica **23**

Carlos Mario Delacruz

El Premio Nobel de Fisiología y Medicina 2021 **27**

Francisco Mercado, Angélica Almanza

Consumo de opioides y pérdida de la audición **33**

Enrique Soto, Teresa Ramírez, Rosario Vega

Robots en la medicina actual **37**

Carlos Arroyo

Sensores micrométricos para el monitoreo de variables electroquímicas y biológicas **43**

Rosa María Woo García, Leandro García-González,

Francisco López Huerta

Homo imperfectus **49**

José Antonio González Oreja

Retos del sector eólico en México **57**

Eduardo Martínez Mendoza

Cuadernos de *Elementos* número 10 **63**
 De Cholollan a Cholula:

las reflexiones de una antropóloga

Anamaría Ashwell Mallorquín



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

La poesía y el cerebro: ¿es viable una neuropoética?

Elisa **Díaz Castelo**
José Luis **Díaz Gómez**

El 26 de marzo de 1892 murió el gran poeta neoyorkino Walt Whitman y, en conformidad con sus deseos, su cerebro fue extraído por autopsia y donado al “Brain Club” de la Universidad de Pennsylvania. En compañía de otros cerebros célebres, el de Whitman iba a ser estudiado con base en principios frenológicos, una teoría en gran medida desacreditada.

Sin embargo, justo cuando ese cerebro, que alguna vez urdió el verso “y tu misma carne será un gran poema”, iba a ser diseccionado, un bizarro accidente se interpuso: un encargado lo dejó caer al suelo y quedó inservible para su estudio. ¿Escondía ese órgano gelatinoso y corrugado el secreto de la creatividad poética? ¿Se perdió la posibilidad de estudiar el correlato fisiológico del conmovedor *Canto de mí mismo*?

Es posible que Emily Dickinson hubiera respondido afirmativamente a esta pregunta. La gran poeta contemporánea y coterránea de Whitman celebró en sus versos el amplio poderío del cerebro:

The Brain –is wider than the Sky–
For –put them side by side–
The one the other will contain
With ease –and you–beside–

El cerebro –es más amplio que el cielo–
colócalos juntos–
contendrá uno al otro
holgadamente –y a ti– también

(Traducción de Silvina Ocampo)

En otro momento, Dickinson atentó contra la alondra, uno de los símbolos de la poesía inglesa, planteando una disección brutal y no desprovista de ironía:

Divide a la alondra y encontrarás la música
bulbo tras bulbo, enrollados en plata
escasamente dada a la mañana de verano
guardada para tu oído cuando el laúd sea viejo.

(Traducción de Marcelo Dos Santos)

Más allá de las asociaciones líricas o filosóficas que pueda evocar esta cruenta y brillante imagen, un neurocientífico temerario podría frasearla así: “diseca el cerebro y encontrarás la conciencia”. Un geólogo desorientado podría aplicarla a su tema de estudio: “hurga en la tierra y encontrarás la gravedad.” Estas dos afirmaciones son, desde luego, muy diferentes.

La primera puede parecer verosímil dado que hoy día muchos apuestan que el cerebro genera conciencia, sin que sepan aún cómo lo hace, pero la segunda implica errores de dimensión, método y concepto, porque la gravedad es resultado de la masa del planeta. Un neurocientífico holista podrá acotar que la conciencia debe ser una función del encéfalo completo en relación con el resto del cuerpo y con el mundo, por lo que no se podrá encontrar disecando o registrando la actividad de sus partes. Sin embargo, su colega temerario y reduccionista dirá que el conocimiento de las partes y su ensamblaje es el camino más factible, favorable y evidente para resolver el problema mente-cerebro. Quizá Oscar Wilde tenía algo de neurocientífico reduccionista pues, en la siguiente

cita, donde vuelve a surgir la alondra, propone un monismo contundente:

En Dorian Gray dije que los grandes pecados
del mundo ocurren en el cerebro; pero es en el
cerebro que todo ocurre. Es en el cerebro que
la amapola es roja, la manzana olorosa, que la
alondra canta.

Si en verdad las cualidades sensoriales acontecen en el cerebro, el canto de la alondra podría hallarse al disecar o registrar el sensible órgano, aunque no hay neurocientífico que sepa cómo lograr tal hazaña.

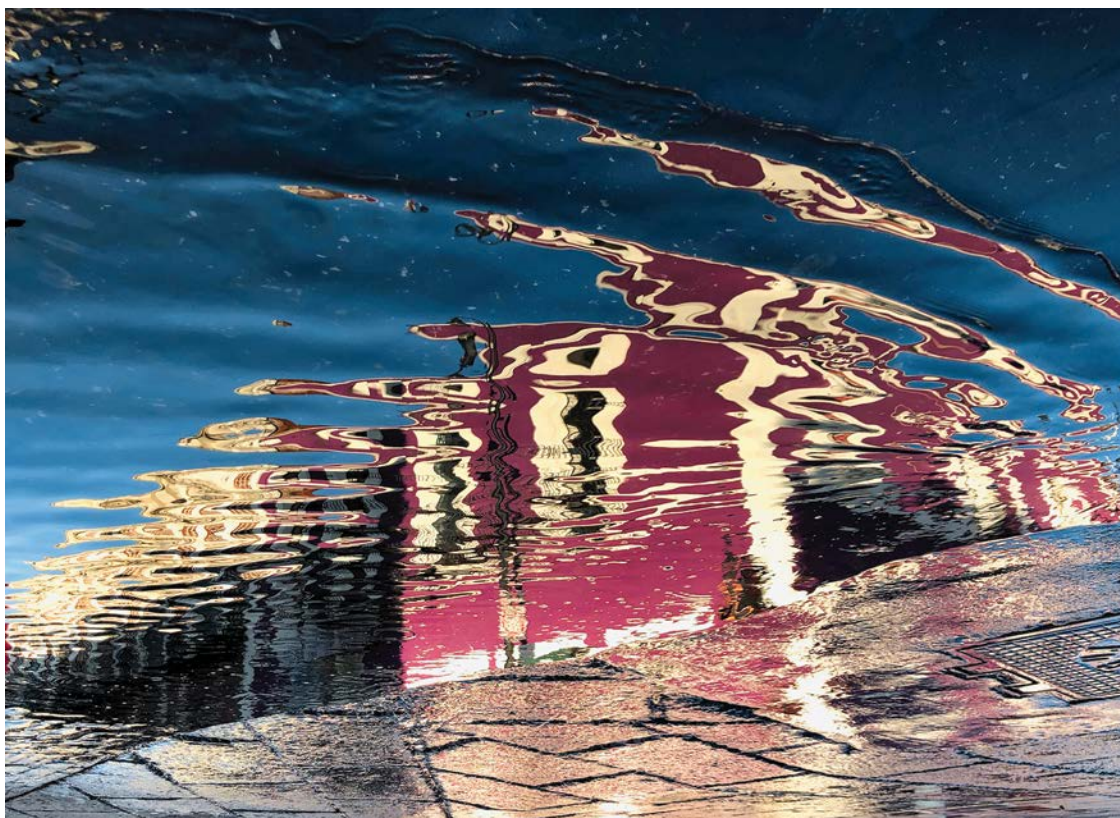
En la poesía hispánica encontramos distintas aproximaciones al cerebro, quizá no tan reduccionistas. Rubén Darío, por ejemplo, describe al cerebro como una habitación ocupada por los ritmos enfebrecidos y los endecasílabos de los difuntos:

¡Cómo bailan en ronda y remolino,
por las cuatro paredes del cerebro
repicando a compás sus consonantes,
mil endiablados versos
que imitan, en sus cláusulas y ritmos,
las músicas macabras de los muertos!

En uno de sus poemas eróticos, Delmira Agustini subraya la interrelación entre los estímulos externos (las venas azules de su amante) y el cerebro del yo-lírico: “Las culebras azules en sus venas / se nutren del milagro en mi cerebro”. De ese modo, la imagen desdibuja los límites entre cerebro y mundo exterior pues ambos parecen pertenecer a un mismo ámbito.

El diálogo entre el cerebro y el resto del cuerpo también se explora en poemas de César Vallejo. Sin embargo, en lugar de atribuirle un peso ontológico decisivo, el poeta se aproxima irónicamente al encéfalo como una parte más del cuerpo humano:

[...] está, al fin
de mi sombrero, este pobre cerebro mal peinado,
y, último vaso de humo, en su papel dramático,
yace este sueño práctico del alma.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

La vecindad anatómica y sonora del sombrero con el cerebro, así como el adjetivo *despeinado*, desacralizan al órgano que se considera recipiente mismo de la identidad. De esta y otras formas, algunos poetas de la tradición hispana parecen subrayar la interrelación entre la conciencia y el entorno.

Esta aproximación porosa y líquida a la conciencia resulta más útil para describir la actividad poética que la posibilidad de encontrar en el seso el canto de la alondra, pues la poesía es el resultado de un ir y venir entre ideas, emociones o sensaciones y su contraparte física, material y maleable: el lenguaje.

Una neuropoética verosímil debe partir del artefacto verbal del poema para analizar las áreas y funciones cerebrales involucradas en el acto de su escritura o lectura. De esta forma, un proyecto neuropoético –o una poética neurocognitiva, como prefiere llamarle el profesor Arthur Jacobs de la Universidad de Berlín– no reducirá la poesía a la neurofisiología. Por el contrario, enriquecerá tanto la lírica como a las ciencias del cerebro al proveer

formas de abordar cada una de estas actividades con los recursos y los términos de la otra.

En los últimos lustros ha campeado la neurociencia cognitiva como la transdisciplina que estudia los fundamentos cerebrales de diversas tareas. Se estudian, por ejemplo, las zonas del cerebro que se encienden cuando un sujeto escucha su música favorita, observa una fotografía cruenta, toma una decisión moral o piensa sobre sí mismo. Este tipo de actividades se denominan “de alto nivel de integración” pues involucran varias partes del cerebro y establecen redes neuronales complejas. La *neuropoética* ya ha emprendido esta misma ruta para abordar las elusivas operaciones de la escritura y lectura de poesía con herramientas de la neurociencia.

Se conoce por estudios con imágenes cerebrales que crear o leer poesía involucra regiones y redes del cerebro implicadas en una decodificación de significados que no es automática, pues

la experiencia requiere que el poeta o el lector voluntariamente reflexionen en torno al texto para establecer una red de nuevos sentidos.

También se ha detectado que el hallazgo de posibles significados activa la red cerebral de recompensa, la misma que se enciende al engullir tacos al pastor, fumar marihuana, experimentar un escalofrío musical o tener un orgasmo: la búsqueda y el encuentro de nuevos significados constituye un acto profundamente placentero (Wassiliwizky *et al.*, 2017).

Se activa también la red cerebral llamada *default network* o red basal, lo cual usualmente acontece cuando el sujeto se desengancha del medio y divaga en una autorreflexión sobre las propias emociones, pensamientos o relaciones con otros. Al obtener imágenes cerebrales de sujetos enfrascados en labores creativas de varios tipos, incluyendo la elaboración de textos poéticos, se ha encontrado que la red basal y la red ejecutiva (la responsable de tomar decisiones y ejecutar comportamientos para cumplirlas), que usualmente funcionan con exclusión mutua, se ensamblan y cooperan (Beauty *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2015).

Más allá de los datos cerebrales y cognitivos, está el trascendental asunto del método. Como sucede con el científico o la filósofa, el/la poeta tiene una pregunta, muchas veces desdibujada, a la que quizás se haya dado alguna respuesta, pero que no le satisface plenamente: tiene una preocupación. Pero, a diferencia de la ciencia, que según el inmunólogo y premio Nobel Peter Medawar es el arte de lo soluble, la poesía es, en palabras del poeta Claude Esteban, la interrogación de lo posible. Ubicada la incógnita y presa del enigma, la poeta baraja caminos léxicos y semánticos, remonta algunos, desanda otros y elabora su verso no por el camino sistemático del método científico o el lógico de la filosofía, sino a campo traviesa, por la espesura y sirviéndose de ecos para encontrar atajos o desvíos valiosos. Está lógica alterna crea un discurso inesperado, mucho menos predecible que el cotidiano.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

De esta manera, el poema instaura nuevos sentidos a los signos verbales y descubre formas de ver que tangencial o indirectamente iluminan el objeto de la preocupación con una luz inesperada. Varios estudios comprueban que el lenguaje poético, en especial el uso de metáforas, involucra de forma más activa el hemisferio derecho del cerebro, apto en descifrar relaciones semánticas finas y distantes (Anaki *et al.*, 1998; Bottini *et al.*, 1994).

Ahora bien, dado que el/la poeta manipula un lenguaje simbólico y figurado, su verso no es expresión inmediata y directa de sus estados internos, sino que ocurre a través de una mediación verbal implícita que se conoce como *voz poética*. Para expresarse, el poeta inventa o utiliza un personaje en su composición: quien habla en el poema es otro yo: el yo lírico. La poeta puertorriqueña Julia de Burgos expresó esta dicotomía a mediados del siglo XX:

Mienten, Julia de Burgos. Mienten, Julia de Burgos.
La que se alza en mis versos no es tu voz: es mi voz,
porque tú eres ropaje y la esencia soy yo;
y el más profundo abismo se tiende entre las dos.

Ahora bien, dado que el yo lírico y la voz poética son simulaciones implícitas, cabe agregar que una de las propiedades cognitivas de la función cerebral es la de construir simulaciones, lo cual es un proceso común de toda creación estética (Gallese y Sinigaglia, 2011) y de su recreación (Díaz Gómez, 2017). No sólo la escena visual es una construcción o representación de los estímulos ante los ojos, sino que la conciencia de sí es una figuración de los propios rasgos y características que configuran un yo supuestamente real. Este yo figurado es un personaje múltiple, claramente compatible con el yo lírico y la voz poética, estructuras cognitivas de alto nivel de integración que deben tener un fundamento cerebral fascinante.

El cuerpo tiene un papel destacado en el conocimiento en general, en el estético en particular y en el poético por antonomasia. El recurso de la métrica y el ritmo es un elemento clave de la poesía pues, como decía Paul Valéry, si la prosa es caminar, la poesía es bailar. La frecuencia cardíaca o respiratoria y múltiples elementos de la conducta o de la actividad eléctrica del cerebro se manifiestan en ritmos e intensidades. El cerebro parece construido para reconocer y recrear los ritmos y rimas que los poetas han usado para diferenciar la poesía de la prosa. Al unificar el pensamiento y el lenguaje, la música y la imagen, e involucrar el juego, el placer y la emoción, la poesía es de especial interés para la neurociencia porque se trata de una actividad específica –la “lira neural”– que demuestra las complejidades con las que el cerebro reconstruye y reinterpreta el mundo (Turner y Pöeppel, 1983).

Si bien es improbable que el estudio frenológico del cerebro de Walt Whitman hubiera develado los secretos de la creación poética, la *neuropoética* hoy viable enseña algo más interesante: los complejos mecanismos de la creación y la recreación poética tienen mucho que enseñar sobre el

funcionamiento del cerebro. Esta interdisciplina en ciernes muestra las posibilidades de conjugar materias que podrían considerarse en las antípodas la una de la otra, la neurociencia y la poesía, para enriquecer ambos quehaceres. (En este punto quizá sea relevante confesar que este pequeño ensayo fue urdido por una poeta aficionada a la ciencia y por su padre, un neurocientífico aficionado a la poesía.)

REFERENCIAS

- Anaki D, Faust M and Kravetz S (1998) Cerebral hemispheric asymmetries in processing lexical metaphors. *Neuropsychologia* 36:691-700.
- Beaty RE, Benedek M, Silvia PJ and Schacter DL (2016) Creative Cognition and Brain Network Dynamics. *Trends Cogn Sci.* 20(2):87-95. doi:10.1016/j.tics.2015.10.004.
- Bottini G, Corcoran R, Sterzi R, Paulesu E, Schenone P, Scarpa P and Frith CD (1994) The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language. A positron emission tomography activation study. *Brain* 117 (Pt 6), 1241-1253.
- Díaz Gómez JL (2017) Vivencia estética, recreación cerebral. Seminario (*Revista del Seminario de Cultura Mexicana*) Año 8, números 12-13, pp 55-80, enero-diciembre, 2017.
- Gallese V and Sinigaglia C (2011) What is so special about embodied simulation? *Trends Cogn Sci.* 15(11):512-519. doi:10.1016/j.tics.2011.09.003.65.
- Liu S, Erkkinen MG, Healey ML, et al. (2015) Brain activity and connectivity during poetry composition: Toward a multidimensional model of the creative process. *Hum Brain Mapp* 36(9): 3351-3372. doi:10.1002/hbm.22849
- Turner F and Pöeppel E (1983) The neural lyre: poetic meter, the brain and time. *Poet. Mag.* 12, 277-309. Schrott R and Jacobs AM (2011). Gehirn und Gedicht: Wie wir unsere Wirklichkeiten konstruieren (Brain and Poetry: How We Construct Our Realities). München: Hanser.
- Wassiliwizky E, Koelsch S, Wagner V, Jacobsen T and Menninghaus W (2017) The emotional power of poetry: neural circuitry, psychophysiology and compositional principles *Soc Cogn Affect Neurosci.* 12(8):1229-1240. doi:10.1093/scan/nsx069.

Elisa Díaz Castelo

Coordinación de Humanidades, UNAM

José Luis Díaz Gómez

Investigador titular

Departamento de Historia y Filosofía de la Medicina

Facultad de Medicina, UNAM

jldiaz43@gmail.com



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

La separación ciencia-neutralidad: las grandes narrativas de la demarcación científica moderna *versus* su legitimación postmoderna

Víctor Emmanuel **Rojas Mendoza**

Existe la idea predominante de que la ciencia es neutra e imparcial y que su objetividad es casi absoluta. Sin embargo, a partir de eventos como la Segunda Guerra Mundial, donde el estudio de la masa crítica permitió el desarrollo de la bomba atómica, surgieron diversas críticas que pusieron en tela de juicio la manera en que esta afecta a las sociedades y al entorno, y su aparente neutralidad. Este trabajo tiene por objetivo analizar los cuestionamientos axiológicos y epistemológicos propuestos por Thomas Kuhn, Imre Lakatos, Javier Echeverría, Jean-François Lyotard y Anthony Giddens para dilucidar los criterios mediante los cuales esta se legitima y se demarca en la llamada época postmoderna. Para formular una respuesta a esta interrogante, se ha construido un diálogo transdisciplinario entre las propuestas de estos autores en el cual se señala sinérgicamente que la ciencia es un producto cultural y que está condicionada por diversos factores. Por ello, en el primer apartado se analiza de manera breve la noción de ciencia, axiología y demarcación científica. Específicamente, se analizan los criterios de demarcación propuestos por Thomas Kuhn e Imre Lakatos, y las nociones de tecnociencia y axiología de Javier

Echeverría. Posteriormente, se introducen de manera general las nociones de postmodernidad y metarrelatos de Jean-François Lyotard, y la perspectiva de Anthony Giddens sobre las instituciones de la modernidad. A continuación, se expone un diálogo sinérgico entre estos autores para resaltar la convergencia intelectual en cuanto a que el conocimiento científico es un producto cultural que no es neutro y que está cargado de valores. Finalmente, se ofrecen las conclusiones, donde se expone que, a pesar de que estos autores son de especialidades distintas, existe un consenso en cuanto a que la construcción y la legitimación de la institución científica se sustenta en diversos valores, estando los intereses humanos al mismo nivel que los argumentos lógicos y epistemológicos.

CIENCIA, LEGITIMACIÓN Y AXIOLOGÍA

En esta propuesta se habla de ciencia y sus criterios de legitimación, por tanto, el punto de partida es elucidar en qué consisten estos conceptos. ¿Qué se puede entender por ciencia? Es casi imposible dar una definición rigurosa e inmutable de este concepto porque, entre otros motivos, la ciencia es una actividad humana y como tal está sometida a cambios históricos (Diéguez, 2010). Esto significa que, incluso si existiese una definición permanente entre lo que ha sido y lo que es ciencia, nada podría garantizar que en un futuro dicha concepción no cambiara (Diéguez, 2010). A manera de aproximación, se puede entender como ciencia a un conjunto de conocimientos susceptibles de ser probados pero, al mismo tiempo, a una actividad humana (Chalmers, 2001). La noción de ciencia hace alusión tanto a una actividad humana como a su producto, el conocimiento científico (Diéguez, 2010). En lo que respecta a la ciencia como forma de conocimiento, dichas formas probatorias recaen en un marco epistemológico determinado y condicionado por su época. En cuanto a la ciencia como actividad humana, su validez también recae en la aceptación social, específicamente en la aceptación

de las comunidades científicas. La ciencia tiene un valor provisional que atiende no solo a su lógica interna, sino a los intereses del entorno social en el cual se produce (Diéguez, 2010). No hay una respuesta última en cuanto a una definición de lo que es ciencia, la ciencia es un producto en construcción continua y una determinada concepción estaría limitada a su época y a su cosmovisión (Diéguez, 2010). Así mismo, hablar de ciencia tiene la implicación de hacer referencia a una vasta variedad de disciplinas integradas bajo un mismo concepto. A partir de ahora, cuando se use la palabra ciencia, debe entenderse que se habla en sentido plural, es decir, se hace referencia al conjunto de disciplinas unificadas bajo ese mismo nombre.

La ciencia ha tenido un proceso de legitimación a través de la historia; el concepto que alude específicamente a esta cuestión es el llamado problema de la demarcación. A grandes rasgos, el problema de la demarcación consiste en distinguir ciencia de lo que no lo es, y ha sido un objeto de estudio propio de la filosofía (Chalmers, 2001; Diéguez, 2010; Echeverría, 1999; Estany, 2006). Lo anterior implica que la demarcación de la ciencia consiste en legitimar y establecer criterios para diferenciar ciencia de pseudociencia, aquello que pretende pasar por ciencia sin cumplir los criterios de serlo. En cada época han existido características que han permitido distinguir y legitimar ciencia de lo que no lo es. De la época más antigua a la más reciente, estos criterios han sido la verificabilidad, la falsabilidad –propuesta por Popper–, la progresividad de los programas de investigación –señalada por Lakatos– y los cambios en los paradigmas científicos –analizados por Kuhn– (Chalmers, 2001; Diéguez, 2010). De manera simple, se puede decir que la verificabilidad consiste en buscar elementos que confirmen una teoría científica y, en contraparte, la falsabilidad consiste en que debe existir la posibilidad de encontrar evidencias que la refuten (Chalmers, 2001; Diéguez, 2010; Estany, 2006). De aquí que, desde la perspectiva de estos dos criterios, una teoría científica es, si y solo si hay elementos que la verifiquen y logra superar las pruebas de falsabilidad. Por otra parte, el criterio

de la progresividad en los programas de investigación consiste, a grandes rasgos, en que las teorías científicas progresan, o degeneran, en la medida en que los científicos desarrollan proyectos de investigación alineándose o desapegándose de ellas (Chalmers, 2001; Diéguez, 2010; Estany, 2006). Finalmente, el criterio de los cambios en los paradigmas científicos señala que, en términos generales, lo que distingue ciencia de lo que no lo es, es el paradigma en el cual se desarrolla una teoría y la aprobación de la comunidad científica (Chalmers, 2001; Diéguez, 2010; Estany, 2006). Una cuestión por resaltar es el hecho de que, si bien los criterios de demarcación atienden a la lógica y coherencia interna, como la verificabilidad y la falsabilidad, también están condicionados por cuestiones externas, como la progresividad en los programas de investigación y los cambios de paradigmas científicos.

Aunado a los criterios de legitimación mencionados, Javier Echeverría (2002a) contribuyó con su propuesta en traer a la luz la cuestión axiológica como objeto de análisis para comprender los criterios de aceptación de la ciencia. Propuestas como las de Kuhn y Lakatos y otras posteriores como las de Putnam, Laudan, etc., derribaron el dogma positivista de la neutralidad axiológica de la ciencia. En épocas anteriores a estas propuestas era común que en los círculos filosóficos y científicos se tratara a la ciencia como una cuestión sin repercusiones éticas y libre de juicios morales. Esta perspectiva cambió cuando Merton (1942; 1973) sostuvo que, además de métodos y conocimientos, la ciencia también envuelve un conjunto de valores y normas culturales que dirigen la actividad científica. A estos últimos los llamó *ethos* de la ciencia y los distinguió por ser tanto de carácter técnico como moral y de carácter externo. A partir de entonces se reconoce que la ciencia y la tecnología tienen tanto valores internos como externos, siendo reconocidos inicialmente los valores internos (Echeverría, 2002a). En el caso de la ciencia, esos valores internos, o también llamados epistémicos, son la verdad, la verosimilitud, la precisión, la coherencia, el rigor, la generalidad, la fecundidad, la adecuación empírica, la contrastabilidad, entre otros

(Echeverría, 2002a). Por otra parte, en cuanto a la tecnología, los valores internos son: eficiencia, eficacia, utilidad, aplicabilidad, funcionalidad, robustez, etcétera (Echeverría, 2002a). De manera simple, la axiología trata de los valores de la praxis científica, los cuales son entendidos, desde la óptica de Echeverría, como todos aquellos intereses, preferencias y conveniencias vinculadas con el quehacer científico mediante el cual se produce la ciencia.

En lo referente a los valores de la actividad científica, bien cabe hablar de un concepto muy relacionado: la tecnociencia. De acuerdo con Echeverría (2003; 2005), el concepto de tecnociencia hace alusión principalmente a dos cuestiones: un fenómeno social y una hibridación entre ciencia y tecnología, y de manera implícita a una tercera cuestión, el trabajo multidisciplinario. Con fenómeno social, Echeverría se refiere a los cambios radicales en la manera de hacer ciencia. Aparecen los megaproyectos de investigación auspiciados por la iniciativa privada y los productos tecnocientíficos son producidos en función de los valores de los implicados y a partir de una lógica de mercado. A diferencia de Merton, la propuesta axiológica de Echeverría es una axiología de la tecnociencia, la cual trata del estudio tanto de los valores internos como de los valores externos que intervienen, influyen y determinan la dirección del progreso de la tecnociencia (Echeverría, 2002b; Echeverría, 2003). Esta perspectiva axiológica señala que la ciencia no es un conocimiento puro y neutro que busca la verdad, sino una forma de conocimiento producto de la actividad humana, la cual es fruto de la cultura de su tiempo y está cargada de valores.

MODERNIDAD, POSTMODERNIDAD Y METARRELATO

Tanto la modernidad como la postmodernidad son etapas en la historia de la humanidad. Ambas épocas se encuentran influenciadas por una serie de cuestionamientos intelectuales que han configurado perspectivas y cosmovisiones filosóficas y epistemológicas muy particulares: el modernismo y el



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

postmodernismo (Baker, 2011). Se trata de perspectivas que analizan el problema de la realidad, el conocimiento y la verdad. En este sentido, el modernismo se vincula con la filosofía de la Ilustración de Rousseau y Bacon, junto con la teoría socioeconómica de Marx, Weber, Habermas, entre otros (Barker, 2011). En contraste, el postmodernismo se ha vinculado con las ideologías de Lyotard, Baudrillard, Foucault, Rorty y Bauman (Barker, 2011). De forma general, como señala Barker (2011), el pensamiento ilustrado, o moderno, busca las verdades universales, mientras que el posmodernismo, en contra parte, sigue una directriz socio-histórica y lingüística de la concepción de verdad.

Respecto al modernismo, Giddens (1994) señala que son los modos de vida y organización social surgidos en la Europa del siglo XVIII los que propiciaron el cuestionamiento crítico de los problemas derivados de la época moderna y tuvieron una repercusión a nivel mundial. Así mismo, este autor señala que las instituciones sobre las que se sostiene la modernidad son cuatro: industrialismo, supervisión, capitalismo y poder militar. Por otra parte, respecto a la noción de postmodernismo, Lyotard (1991) concibe la postmodernidad como la incredulidad ante los metarrelatos de la humanidad y arguye que es un efecto del progreso de las ciencias y de las crisis, tanto de la filosofía metafísica, como de la institución universitaria que dependía de ella. De acuerdo con Diéguez (2006:3),

[...] un metarrelato es, en la terminología de Lyotard, una gran narración con pretensiones justificatorias y explicativas de ciertas instituciones o creencias compartidas.

Lyotard (1991) Identifica cuatro grandes metarrelatos: el cristiano, el iluminista, el marxista y el capitalista. Al utilizar los términos de relato, grandes relatos y metarrelato, Lyotard (1991) se dirige a un mismo referente. Es decir, a los discursos legitimadores a nivel ideológico, social, político y científico. En palabras simples, desde la lectura de Lyotard (1991), el postmodernismo es esa condición humana que pone en duda los discursos legitimadores de las grandes instituciones sociales, incluyendo a la ciencia.

CIENCIA COMO PRODUCTO CULTURAL CONDICIONADO

Para Lyotard (1991) la postmodernidad se caracteriza por la incredulidad a las grandes narrativas legitimadoras de la sociedad, entre ellas la ciencia. En el ámbito científico y filosófico esta ruptura se dio con las propuestas de Thomas Kuhn e Imre Lakatos.

La obra *La estructura de las revoluciones científicas*, de Kuhn (1962), trajo por primera vez a la luz un giro externalista de la ciencia. En esta propuesta Kuhn se enfocó en estudiar principalmente los cambios de paradigmas científicos. En el análisis de dichos cambios dio cuenta de que la transición de un modelo científico plenamente aceptado a otro, no solo influían las cuestiones internas como la lógica, la coherencia y la precisión, sino otros aspectos ajenos a estos. A partir de estas consideraciones, se trajo a la luz el hecho de que las teorías científicas son inconmensurables. Es decir, no hay un criterio “lógico u objetivo” para contrastarlas y, por consiguiente, tampoco hay una forma de determinar la superioridad de una teoría científica con respecto a otra. Y si la hay, de acuerdo con Kuhn (1962), el criterio en el que se sustente tal presuposición es un juicio valorativo relativo a las conveniencias de los interesados en apoyar o refutar alguna teoría científica determinada. Aunque hay ciertos indicios para situar a Kuhn en el bando de los anti-realistas



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

y los relativistas (Chalmers, 2001), lo que se intenta señalar aquí es esa ruptura en la manera tradicional de entender la ciencia, la cual es precisamente esa incredulidad que Lyotard señaló, que era una visión limitada y sesgada a las cuestiones internas.

Otra forma de rechazo al metarrelato científico dominante fue la propuesta de Lakatos (1978), en la que señaló la importancia del contexto en el progreso de las teorías científicas, estableciéndose así un giro historicista en el entendimiento de la ciencia. Desde su análisis, la evaluación de las teorías y su contingente aprobación, o desaprobación, no surge de manera lógica o espontánea, está condicionada por un contexto específico. Un contexto en el cual existe una tradición de ideas y de concepciones acerca del mundo que influye el pensamiento de los que hacen ciencia. Por consiguiente, tanto los elementos internos a la ciencia, como la lógica y la precisión, como los elementos externos a ella, como el contexto histórico, influyen para que un programa de investigación progrese o degenere. Con “programa de investigación” Lakatos (1978) hace referencia a estructuras teóricas que sirven de guía para el desarrollo de futuras investigaciones. Los científicos tienden a alinearse con el programa de investigación progresivo,

es decir, aquel que aún siga recibiendo atención por parte de los investigadores, trayendo así una reinterpretación a la concepción de teoría “refutada”. Para Lakatos (1978), la refutación de una teoría científica no implica que esta no haya superado las pruebas de verificación, confirmación y falsación, las cuales son pruebas de carácter lógico, sino que, además de haber sido probada como falsa, haya sido suplantada por otra, y en todos estos procesos intervienen tanto elementos internos como externos.

De esta forma, las propuestas de Kuhn (1962) y Lakatos (1978) son un claro ejemplo de los señalamientos de Lyotard. A partir de estos planteamientos, el metarrelato realista y positivista entró en crisis. En la filosofía se ampliaron los horizontes del análisis y del escrutinio de las disciplinas científicas como objetos de estudio. El estudio de las ciencias dejó de limitarse a la reconstrucción lógica de las teorías, como en tiempos del Círculo de Viena, y se expandió considerando también el contexto y las conveniencias de los implicados, estableciéndose así dos nuevos criterios de demarcación: la aprobación de la comunidad científica

de un nuevo paradigma y la progresividad de los programas de investigación.

Retomando el tema de la legitimación, Kuhn y Lakatos no destruyeron totalmente la metanarrativa positivista de legitimación de la ciencia, sino que cambiaron radicalmente su apreciación. De un cómo se legitima la ciencia, ampliaron el panorama a quiénes legitiman la ciencia. Es en esta última cuestión donde se encuentra otro punto de inflexión entre estos autores analizados. Giddens (1993) señala que una de las cuatro instituciones de la modernidad es el capitalismo. Por su parte, Lyotard (1993:6) afirma:

El saber es y será producido para ser vendido, y es y será consumido para ser valorado en una nueva producción... Deja de ser en sí mismo su propio fin, pierde su "valor de uso".

Esto implica que el saber pasó a ser un producto y en tanto que producto de intercambio está sujeto a la lógica del mercado. Por otra parte, siguiendo la misma línea de razonamiento, Echeverría (2003; 2005) planteó que las características de la tecnociencia son precisamente la inversión privada y, en consecuencia, los intereses de los inversionistas los que dirigen el destino de los grandes proyectos de investigación. Con base en esto, se puede inferir que tanto Giddens como Lyotard y Echeverría coinciden en que la institución científica se rige por el capital y la lógica de mercado. Sin embargo, Echeverría fue más allá al plantear que son diversos los intereses y conveniencias de la actividad científica. No solo se limitó a los valores económicos, sino que incluyó valores religiosos, estéticos, jurídicos y militares. Este último también coincide con una de las instituciones de la modernidad que señaló Giddens.

De la idea de que el capital y la lógica de mercado son uno de los motores de la actividad científica contemporánea, se puede inferir que la ciencia es un producto cultural. En primera, porque la cultura es una forma humana de hacer. En segunda,



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

porque no hay ciencia sin actividad científica. La ciencia es un producto humano y en tanto que producto humano está condicionado por los intereses, deseos, conveniencias, voluntades, actitudes y cosmovisiones de todos los involucrados. Los involucrados no solo son los científicos e investigadores, sino como Lyotard y Echeverría señalan: el mercado. Esto incluye a los inversionistas y los consumidores de la tecnociencia.

Antes de finalizar con este análisis, es importante señalar que, aunque en este trabajo el interés se centró en los acuerdos implícitos que hay entre los autores analizados, hay un contraste que es necesario poner de relieve. Lyotard (1991) señala que hay una ciencia postmoderna, y arguye que la naturaleza del conocimiento ha cambiado. En contraste, lo que las propuestas de Lakatos, Kuhn y Echeverría señalan es que las cuestiones externalistas a la ciencia siempre estuvieron presentes. Es decir, cambió la forma de hacer ciencia, pero no se alteró la naturaleza del conocimiento científico. Lo que cambió fue la forma de percibirlos y los intereses implicados en su producción, los valores siempre han estado presentes en la actividad científica. Por ejemplo, la lógica capitalista no existía en tiempos de Newton o de Galileo, pero la lógica capitalista es una forma de valor, en la época de



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

estos dos personajes existieron valores distintos a los que existen en la actualidad

CONCLUSIONES

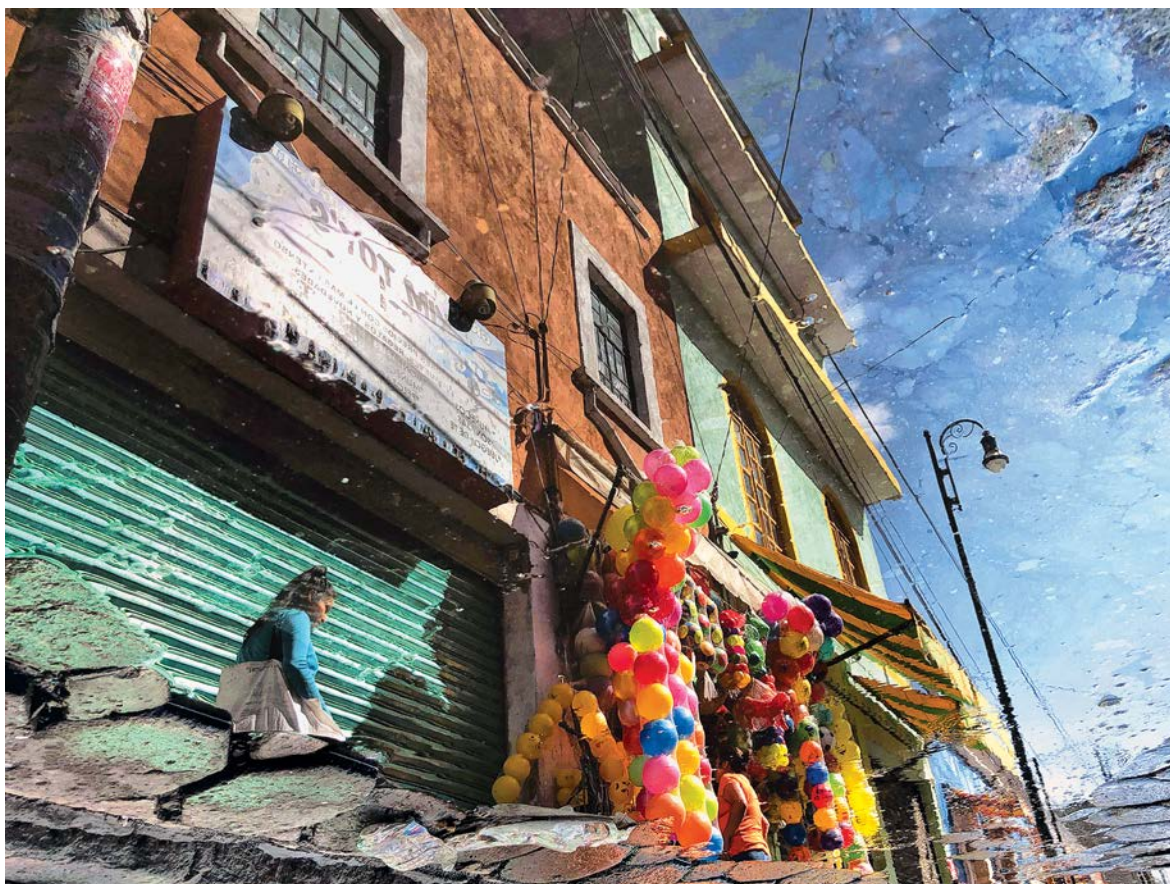
Se puede decir que lo que distingue ciencia de lo que no lo es en esta época postmoderna son tanto criterios epistemológicos como criterios axiológicos y los valores e intereses de quienes producen, financian y consumen ciencia/tecnociencia. Por lo tanto, las fuentes de legitimación del conocimiento científico son tanto la institución científica, como la institución capitalista y la lógica de mercado. Esto no implica que la ciencia sea subjetiva, irracional y antirrealista, sino que no es tan neutral como comúnmente se piensa. Es decir, está cargada de valores humanos y estos son las directrices que dirigen su legitimación. Estos contrastes entre la forma de legitimación postmoderna y la forma de legitimación de la modernidad no implican cambios en la naturaleza ontológica del conocimiento científico, sino en la manera de percibir y producir ciencia. Desde los autores analizados, se puede concluir que la ciencia es un producto humano cargado de valores e intereses y, por lo tanto, es proclive al error y los sesgos ideológicos. La legitimación de la institución científica se sustenta en diversos

valores, estando los intereses humanos al mismo nivel que los argumentos lógicos y epistemológicos. Toda pretensión científicista de neutralidad es ingenua. El conocimiento científico es válido y confiable, pero su estatus epistemológico es temporal.

REFERENCIAS

- Barker C (2011). *Enter Postmodernism*. Cultural Studies: Theory and Practice. London: Sage Publications, pp. 181-216.
- Chalmers A (2001). *¿Qué es esa cosa llamada Ciencia?* Una valoración de la naturaleza y el estatuto de la Ciencia y sus métodos. Ciudad de México: Siglo XXI.
- Diéguez A (2006). *La Ciencia desde una perspectiva postmoderna: Entre la legitimidad política y la validez epistemológica*. II Jornadas de Filosofía: Filosofía y política (Coín, Málaga 2004), Coín, Málaga: Procare, 2006, pp. 177-205.
- Diéguez A (2010). *Filosofía de la Ciencia*. Madrid: Biblioteca Nueva.
- Echeverría, J. (1999). *Introducción a la metodología de la Ciencia*. La filosofía de la Ciencia en el siglo XX. Madrid: Cátedra.
- Echeverría J (2002a). *Axiología y ontología: los valores de la Ciencia como funciones no saturadas*. Argumentos de Razón Técnica, 2002, (5):21-37.
- Echeverría J (2002b). *Ciencia y valores*. Barcelona: Destino.
- Echeverría J (2003). *La Revolución Tecnocientífica*. Fondo de Cultura Económica: Madrid.
- Echeverría J (2005). *La Revolución Tecnocientífica*. Confinés, 2, 9-15.
- Estany A (2006). *Introducción a la filosofía de la Ciencia*. Bellaterra: Servei de Publicacions.
- Giddens A (1993). *Consecuencias de la modernidad*. (1a. ed). Madrid: Alianza Editorial.
- Kuhn TS (1962). *The structure of scientific revolutions* (2 ed.). International Encyclopedia of Unified Science, vol. 2, no. 2. Chicago: The University of Chicago Press.
- Lakatos I (1978). *The Methodology of Scientific Research Programmes*: Ed by John Worrall and Gregory Currie. J. Worrall, & G. Currie (Eds.). Cambridge University Press.
- Lyotard J (1991). *La condición postmoderna*. Informe sobre el saber. Madrid: Ediciones Cátedra.
- Merton RK (1942). *A note on science and democracy*. *J Legal & Pol Soc* 1:115.
- Merton RK (1973). *The sociology of science: Theoretical and empirical investigations*. Chicago: University of Chicago Press.

Víctor Emmanuel Rojas Mendoza
Escuela de Humanidades y Educación
Tecnológico de Monterrey
Campus Monterrey, México
A00798221@itesm.mx



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

Biología cuántica en el transporte de iones a través de membranas celulares

Maricruz **Rangel-Galván**
Violeta **Rangel-Galván**
Alejandro **Rangel-Huerta**

La biología cuántica es un área multidisciplinaria que está actualmente en desarrollo, intenta descubrir si algunos fenómenos observados a nivel atómico pueden ayudar a explicar preguntas sin resolver en biología. Por ejemplo, si existe en los seres vivos una ventaja adaptativa (desde el punto de vista evolutivo) a nivel cuántico, o si los fenómenos cuánticos son despreciables en condiciones fisiológicas normales, y si su efecto se pierde por la complejidad de los procesos que ocurren en los organismos. La biología cuántica nos ha permitido plantear hipótesis para resolver diversos problemas tales como el origen fisiológico de la orientación de aves migratorias sobre el campo magnético de la Tierra, el proceso de transmisión de luz solar en la fotosíntesis, la catálisis enzimática en los organismos y el transporte de iones a través de las membranas celulares, solo por mencionar algunos casos importantes (Kim *et al.*, 2021).

Con respecto a este último problema, es decir, los efectos cuánticos en el transporte de iones a través de los canales iónicos de la membrana celular, la biología cuántica resalta algunos efectos de la física cuántica que se presentan en la biología molecular de las células. Este

análisis puede ser dividido en la mecánica cuántica de efectos cuánticos triviales y efectos cuánticos no triviales (aplicado a la biología).

ASPECTOS GENERALES DE MECÁNICA CLÁSICA Y MECÁNICA CUÁNTICA

El tema sobre mecánica cuántica constituye el paso más reciente en la investigación más vieja sobre las leyes generales que gobiernan el movimiento de la materia: Linus Pauling (1935).

Es sabido que el movimiento de la materia que ocurre a una escala macroscópica se puede explicar usando la mecánica clásica con base en las leyes de Newton. En este contexto, el estado de un sistema se define por medio de la posición y la velocidad de cada partícula en un tiempo determinado. Además, es posible saber qué fuerzas actúan y las correspondientes energías involucradas en los diferentes procesos físicos. La segunda ley de Newton permite determinar el estado actual y el movimiento futuro del sistema, esto es, se puede predecir la evolución del sistema a partir de las condiciones iniciales.

Por otra parte, el principio de incertidumbre, establecido por el físico teórico Werner Heisenberg en 1927, nos dice que es imposible determinar al mismo tiempo la posición y la velocidad exacta de una partícula microscópica. Lo que implica que no es posible predecir el movimiento futuro de un sistema cuántico. Por ello, para describir el estado de un sistema atómico molecular, se postula una función de estado, también llamada función de onda (ψ), que depende de las coordenadas de las partículas y del tiempo. La función de onda describe tanto al átomo de hidrógeno (un electrón), como estados estacionarios de átomos multieletrón. Para conocer cómo cambia el estado de un sistema microscópico, es necesario contar con una ecuación de movimiento que nos diga cómo cambia la función de onda (ψ) en el tiempo.

A escalas microscópicas, la ecuación de onda de Schrödinger, establecida en 1926, describe adecuadamente la dinámica de los electrones ligados a los núcleos atómicos moleculares bajo la acción de funciones de potencial central. En esta descripción lo más relevante es el espectro discreto de energías observadas experimentalmente.

A diferencia de la certeza que ofrece la mecánica clásica en la predicción de la posición de una partícula dada, la mecánica cuántica es probabilista: ψ^2 (el cuadrado de la función de onda), nos dice cuál es la probabilidad de encontrar la partícula dada en una región del espacio a un tiempo determinado. Entonces, la química cuántica utiliza el enfoque de la mecánica cuántica para caracterizar moléculas a nivel de las propiedades de los átomos individuales que las forman; describiendo, además, los estados moleculares de rotación y vibración (estos espectros de frecuencias pueden ser observados experimentalmente por medio de la espectroscopía) (Wilson y Pauling, 1935). Así, es

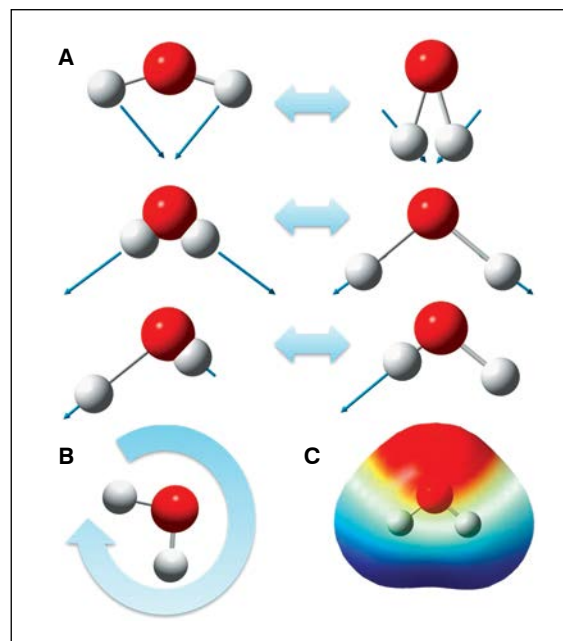


Figura 1. Ejemplo de descripción de la mecánica cuántica trivial en la molécula de agua (representada en esquema de esferas y cilindros). En A, se muestran tres modos vibracionales de la molécula del agua conocidos como vibración de flexión modo tijera y vibración de tensión simétrica y tensión asimétrica. En B, se indica la rotación del agua sobre un eje. En C, se muestra el mapa de potencial electrostático molecular representando en rojo una mayor densidad de electrones y en azul una menor densidad de electrones. La figura se construye utilizando el programa Gaussian View (Dennington *et al.*, 2016).

posible describir tanto moléculas simples como complejas, estas últimas estructuras se analizan mediante técnicas de supercómputo que se basan en teorías que van desde el tratamiento de Slater hasta métodos modernos de los orbitales moleculares, en donde los orbitales atómicos son definidos como funciones que describen la distribución de probabilidad de localizar un electrón en un átomo o en una molécula. Con estos principios, mediante procesos de optimización de estructuras de mínima energía, se describe las vibraciones de las estructuras moleculares, la reactividad química, los orbitales moleculares, la electronegatividad y otras propiedades de interés. Esta descripción es la base de la química cuántica, que al estudiar moléculas complejas en biología, constituye la mecánica cuántica trivial (ver ejemplo en la Figura 1). Este término se refiere a la metodología más directa para tratar con porciones moleculares de proteínas y otras estructuras moleculares complejas en biología (Levine, 2001).

EFFECTOS CUÁNTICOS TRIVIALES EN BIOLOGÍA CELULAR

La mecánica cuántica de los efectos cuánticos triviales describe las moléculas con base en cálculos de su estructura electrónica. La metodología incluye cálculos *ab initio* (primeros principios), o cálculos que aplican la teoría de los funcionales de la densidad (DFT) para caracterizar las propiedades moleculares. El método *ab initio* utiliza las constantes físicas y posteriormente resuelve la ecuación de onda de Schrödinger. Por otro lado, la teoría DFT considera que la densidad de probabilidad electrónica contiene toda la información del sistema. Una limitante de estas metodologías es que, debido a la complejidad de la solución de las ecuaciones planteadas, tienen la restricción del tamaño del sistema de estudio; sin embargo, actualmente es la más utilizada para caracterizar el comportamiento molecular en biología (Levine, 2001).

En este contexto de análisis, los canales iónicos de membrana celular son un sistema macroscópico con un número muy grande de elementos. Para darse una idea del tamaño de estos sistemas, un

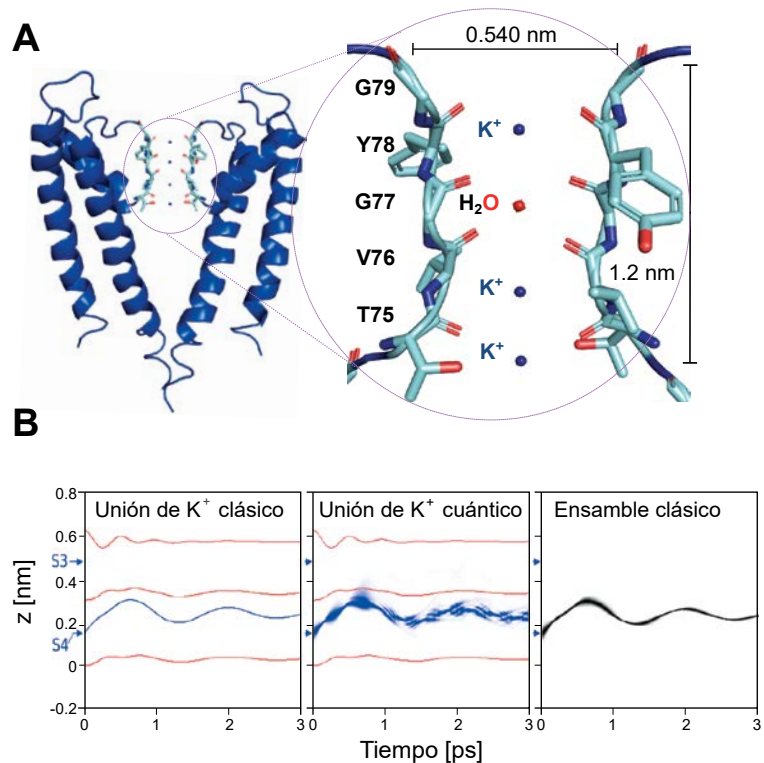
modelo de simulación molecular que contenga a un canal iónico, insertado en una porción de membrana celular en disolución, puede contener más de 200,000 átomos; lo que implica que no es posible hacer un estudio a nivel cuántico de estos sistemas. Una estrategia que se usa frecuentemente es fraccionar el sistema dejando solo algunos elementos necesarios para hacer el estudio. Por ejemplo, aquellas cadenas laterales que forman los filtros de selectividad o los segmentos que forman los poros del canal. La mecánica cuántica trivial caracteriza propiedades de los canales iónicos tales como la distribución del potencial electrostático molecular, que forman las cadenas laterales en el poro, para ver cómo afecta el transporte de los iones a través de la membrana celular (Gillespie *et al.*, 2002).

EFFECTOS CUÁNTICOS NO TRIVIALES EN BIOLOGÍA CELULAR

La mecánica cuántica de los efectos cuánticos no triviales propone que los fenómenos observados a nivel atómico, tales como el efecto túnel, la coherencia/decoherencia cuántica, el entrelazamiento cuántico y el spin, entre otros, formen parte de la explicación de fenómenos no resueltos en biología. En lo sucesivo solo vamos a utilizar los conceptos de coherencia/decoherencia cuántica y de efecto túnel que se presentan en el paso de iones a través de los poros y las compuertas de canal intracelular, respectivamente. Los estados coherentes corresponden a estados cuánticos que minimizan la incertidumbre del principio de Heisenberg. El término de estado coherente se refiere a que la función de onda casi no se deforma durante el movimiento de las partículas cuánticas, lo cual es consistente con el hecho de tener estados cuánticos de mínima incertidumbre en la posición-velocidad de las partículas cuánticas en movimiento. Mientras que la decoherencia es el proceso de pérdida de coherencia en un estado cuántico (Martín Fierro, 2004).

Por otro lado, el efecto túnel se refiere al paso de partículas a través de barreras de potencial que

Figura 2. En A, representación de una parte del canal iónico KcsA, en un acercamiento se ve el filtro de selectividad compuesto por los aminoácidos TVGYG (T75, V76, G77, T78 y G79) en donde se localizan los grupos carbonilo ($-C=O$) de las cadenas laterales de estos aminoácidos (tomado del código PDB *Protein Data Bank*: 1bl8). En B, se presentan tres gráficos que muestran una comparación del transporte del ion K^+ visto desde tres perspectivas teóricas: *izquierda*, como ion de K^+ unitario y clásico (curva azul) con una velocidad inicial de 300 m/s en el sitio 4, *en medio*, el ion de K^+ visto como un paquete de onda cuántico como función del tiempo en donde la intensidad de la línea azul representa una mayor densidad de probabilidad (basado en cálculos de mecánica cuántica), *derecha*, densidad de probabilidad clásica de encontrar un ion del ensamble de 10^4 iones en la coordenada Z como una función del tiempo. Las líneas rojas representan los átomos de oxígeno del grupo carbonilo. Las dimensiones del poro y la figura B se toman de Summhammer *et al.*, 2018.



representan un obstáculo para el movimiento y que da como resultado coeficientes de transmisión y de reflexión.

LA CONDUCCIÓN DE LOS CANALES IÓNICOS

La membrana que rodea las células se compone principalmente de carbohidratos, fosfolípidos y proteínas de membrana. Los fosfolípidos tienen una región polar y una región no polar; la región polar se orienta hacia las disoluciones que forman el ambiente extracelular e intracelular que rodea la célula. Mientras que la región no polar interacciona en sí misma evitando exponerse a las moléculas de agua. Este acomodo de los fosfolípidos forma la estructura de bicapa lipídica característica de las membranas celulares. Entre las proteínas que se expresan en la membrana plasmática, se encuentran los canales iónicos que permiten el paso de iones a través de la membrana celular.

Debido a su carga eléctrica, los iones no pueden atravesar la membrana por difusión simple y

necesitan de proteínas especializadas de transporte, los canales iónicos permiten el transporte de iones necesarios para las funciones de la célula. Los canales iónicos son transmembranales porque atraviesan la membrana completamente para formar un poro por el cual los iones pueden pasar. Además, los canales iónicos tienen la propiedad de ser selectivos, esto es, que por ellos pasan solo determinados iones como sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}) y potasio (K^+), sobre los cuales se asigna el nombre de canal (Alberts, 2010).

En 1998 se determinó la estructura del canal de potasio bacteriano KcsA de las bacterias *Streptomyces lividans*. Una de las preguntas que surgió fue la siguiente: ¿cómo es posible que los canales de potasio puedan ser tan selectivos y rápidos a la vez? Esta pregunta es inevitable debido a que los canales tienen una velocidad de conducción de 10^8 iones por segundo combinada con una eficiencia de permeabilidad de 10^4 iones de potasio por un ión de sodio. Esta capacidad de discernir sobre ambos iones es notable debido a que los iones de Na^+ son más pequeños que los iones de K^+ . La estructura del canal de potasio (obtenida a

partir de estudios hechos con rayos X) revela la presencia de los aminoácidos TVGYG que forman parte del filtro de selectividad.

Se ha observado que sobre el filtro de selectividad se acomodan iones de K^+ deshidratados en interacción con los grupos carbonilo de la cadena principal. Un modelo propuesto para explicar el flujo iónico a través de los canales KcsA es el modelo *knock on*, en el cual ocurre un movimiento simultáneo de atracción ion-canal y de repulsión ion-ion en un acomodo de fila unitaria, alternando los iones de K^+ con moléculas de agua a través del poro del canal (Roux y Schulten, 2004).

Los iones de potasio se acomodan sobre los grupos carbonilo de los aminoácidos que forman el filtro de selectividad intercalados a una distancia de 0.3 nm. Este acomodo de iones permite describir un fenómeno de superposición cuántica y tener una propagación tipo onda de los iones a través del canal. El concepto que se aplica en la conducción iónica corresponde a la coherencia cuántica considerada como un fenómeno de vida media muy corta que dura unos femtosegundos.

Sin embargo, esta duración corta puede ser necesaria debido a que la decoherencia (pérdida de coherencia cuántica) puede reforzar la direccionalidad del transporte de los iones. En la selectividad marcada que tienen los canales iónicos se propone que los iones se acomodan sobre las paredes del poro de canal en una distribución tal que se optimiza el principio de incertidumbre de Heisenberg. En esta distribución, según la mecánica cuántica no trivial, se presenta un efecto de coherencia/decoherencia cuántica sobre las funciones de onda de los iones, de tal forma que sea posible el paso de solo un tipo de ion a través del canal, es decir, que se tenga una gran selectividad para un tipo de iones aun cuando existe una variedad iónica (Figura 2).

Por otro lado, en el extremo intracelular del poro del canal, se localiza la compuerta de entrada de iones a través de la membrana. Esta compuerta, en estado cerrado, constituye una barrera de potencial sobre la cual se supone que pasan los iones por efecto túnel, de acuerdo con la mecánica cuántica no trivial (Figura 3). Según estudios

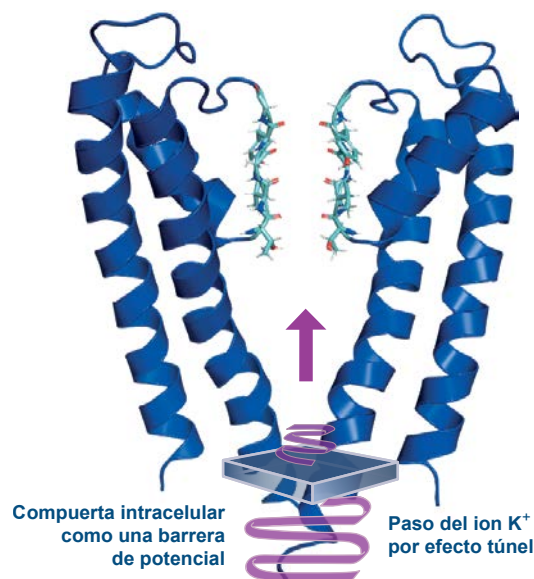


Figura 3. Representación de una parte del canal iónico KcsA que simboliza el paso de iones de K^+ por efecto túnel a través de la compuerta intracelular del canal de potasio que actúa como una barrera de potencial (estructura tomada del código PDB: 2a9h).

teóricos recientes, el efecto túnel de iones sobre el estado cerrado de compuerta del canal modifica las propiedades de excitabilidad de membrana, de transmisión eléctrica y de señalización celular (Kim *et al.*, 2021).

CONCLUSIÓN

Una de las principales dificultades que enfrenta la biología cuántica se encuentra en la falta de un procedimiento metodológico robusto y comprobable. La física cuántica describe propiedades de los átomos con experimentos en condiciones rigurosas, aislados de cualquier interferencia externa y a una temperatura muy baja. En cambio, las condiciones en que ocurren los procesos biológicos consideran una temperatura de $\sim 35^\circ\text{C}$, con presión atmosférica constante, y un ambiente en disolución acuosa con perturbaciones de procesos que ocurren simultáneamente. El escepticismo que existe actualmente es debido a la dificultad de comprobar experimentalmente que realmente son los efectos de la



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

mecánica cuántica no trivial los que se presentan. Además de que estos efectos están participando en diversos fenómenos que no se han podido explicar todavía, tales como el paso selectivo rápido de los iones a través de los canales iónicos de membrana celular.

REFERENCIAS

- Alberts B, Johnson A, Lewis J, Raff M, Roberts K and Walter P (2010). *Biología molecular de la célula*. Ediciones Omega España: Barcelona.
- Dennington R, Tood AK and Jhon MM (2016). GaussView (Version 6), Semichem Inc. Shawnee Mission, KS.
- Gillespie D, Nonner W and Eisenberg RS (2002). Coupling Poisson-Nernst-Planck and density functional theory to calculate ion flux. *Journal of Physics: Condensed Matter* 14 (46):12129.
- Kim Y, Bertagna F, D'Souza EM et al. (2021). Quantum biology: An update and perspective. *Quantum Reports* 3(1):80-126.
- Levine IN (2001). *Química cuántica*. Pearson: España.
- Martín Fierro E (2004). *Los estados coherentes en la descripción semiclásica de la mecánica cuántica*. Universidad de La Laguna, España. Editorial Servicio de Publicaciones.
- Roux B and Schulten K (2004). Computational studies of membrane channels. *Structure* 12(8):1343-1351.
- Salari V, Naeij H and Shafiee A (2017). Quantum interference and selectivity through biological ion channels. *Scientific reports* 7(1):1-9.
- Summhammer J, Sulyok G and Bernroder G (2018). Quantum dynamics and non-local effects behind ion transition states during permeation in membrane channel proteins. *Entropy* 20(8):558.
- Wilson EB and Pauling L (1935). *Introduction to Quantum Mechanics: With Applications to Chemistry*. McGraw-Hill Book Company.

Maricruz Rangel-Galván
Violeta Rangel-Galván
Facultad de Ciencias Químicas
Laboratorio de Química Teórica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
marirangal@gmail.com

Alejandro Rangel-Huerta
Facultad de Ciencias de la Computación
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Obra fotográfica

Carlos Mario **Delacruz**

Carlos Mario Delacruz se considera un ente multita-reas: artesano, monero, historietista, videógrafo, fo-tógrafo y editor.

En su época de monero colaboró en medios regiona-les y nacionales como: *La Jornada de Oriente*, *e-consul-ta*, *Las Histerietas de La Jornada*, *El Chamuco* (primera época, la de Rius), *El Papá del Ahuizote* y otras más.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

Su trabajo como fotógrafo lo coloca del lado de los inmergentes e independientes, no sigue las modas o tendencias que imponen las políticas culturales oficiales o privadas, trabaja al margen de convocatorias, becas o premios.

Actualmente forma parte del Colectivo Casa Click, del Encuentro Fotográfico México (EFM) y de la productora El K-mo-T INVISIBLE.

Sus fotos e ilustraciones se han expuesto principalmente en foros independientes y en universidades. La temática general de su trabajo fotográfico es la calle, vista como un ente vivo con múltiples capas donde todo cabe en ella, en sus periferias e interiorismos y nadie puede asirla a cabalidad: todos poseemos, desposeemos, habitamos y deshabitamos sus fragmentos.

El principal reto de quienes andan disparando su cámara en la calle es lidiar con la tensión generada entre el derecho a la privacidad de las personas y el derecho a la libertad de expresión del fotógrafo sin que se pierda el valor documental de las imágenes captadas.

La presente serie de imágenes titulada *El espejo onírico* es un ejercicio, de los múltiples posibles, que se inserta en ese reto.

Redes sociales:
Facebook: [Carlos Mario Delacruz](#)
Instagram: [@solodelacruz](#)

© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.





© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

El Premio Nobel de Fisiología y Medicina 2021

Francisco **Mercado**
Angélica **Almanza**

El lunes 4 de octubre fue otorgado el Premio Nobel de Fisiología y Medicina 2021 a los doctores David Julius, de la Universidad de California campus San Francisco, y Ardem Patapoutian, del Instituto Scripps, en la Joya, también en el estado California.

Las aportaciones de estos investigadores son de la mayor relevancia para el campo de la neurofisiología de los órganos de los sentidos, los cuales constituyen una ventana para interactuar con el ambiente que nos rodea, informando al sistema nervioso sobre los diferentes estímulos a los que un organismo está expuesto. Por ejemplo, las ondas de presión en el aire son detectadas por la cóclea, en el oído interno, donde se convierten en señales eléctricas y posteriormente, en el encéfalo, son interpretadas como sonidos; ahí mismo se integran con otras funciones del sistema nervioso, como la memoria, de manera que podemos poner en contexto lo que escuchamos: reconocer una melodía, escuchar pistas sobre el acecho de un depredador (podemos interpretar el sonido que producen los pasos sobre el suelo), o simplemente responder a nuestro nombre.

El premio Nobel de este año es por descubrimientos que tienen que ver con el sistema somatosensorial. Dicho sistema tiene como función el procesamiento de tres modalidades sensoriales: el tacto (que es uno de los cinco



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

sentidos que todos conocemos), la propiocepción (que nos ayuda a determinar en qué posición nos encontramos) y la nocicepción (que comúnmente conocemos como dolor, aunque no es lo mismo). El sistema somatosensorial está conformado por neuronas periféricas (sus cuerpos neuronales se ubican fuera del cráneo y la médula espinal) que inervan piel, músculos, tendones y órganos internos, y cuyos axones proyectan a la médula espinal y al tallo cerebral para que el sistema nervioso central realice la interpretación de la activación de estas neuronas.

Una función básica de los órganos de los sentidos es que convierten el estímulo que detectan en señales eléctricas que el sistema nervioso pueda interpretar. Determinar a través de qué moléculas las células sensoriales transducen el estímulo en

señales eléctricas ha representado un largo camino de investigación, con arduo e ingenioso trabajo de por medio. Justamente, descubrimientos en esta área y en este contexto son los que merecieron el premio Nobel de Fisiología y Medicina de este año. En términos simples, la aportación es el descubrimiento de las moléculas en las neuronas sensoriales que transforman estímulos mecánicos y térmicos (para temperaturas altas y bajas) en señales eléctricas.

La primera aportación significativa fue de David Julius y colaboradores en el año 1997 (Caterina *et al.*, 1997). Estudiando la causa por la cual los chiles picantes producen esa sensación que para la gran mayoría de las personas es desagradable y dolorosa, encontraron que la capsaicina (el componente activo de los chiles picantes) se une a una proteína que se encuentra en grandes cantidades en un grupo de neuronas del sistema somatosensorial, a



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

las cuales llamamos nociceptores (del latín *nocêre*, que significa dañar, o receptores de daño), que en realidad se activan con estímulos de diferente naturaleza, pero todos potencialmente peligrosos para la integridad de nuestros tejidos, por lo cual, la activación de los nociceptores termina produciendo una sensación aversiva cuya función última es protegernos.

El receptor de capsaicina recibe el nombre científico TRPV1, y es un canal iónico; esto significa que cuando la capsaicina se une al TRPV1, el canal se activa permitiendo el paso de iones a través de él; dicho flujo iónico produce una corriente eléctrica, lo que a su vez activa a la neurona sensorial en

la que se encuentra localizado, el nociceptor. De este modo es como el TRPV1 convierte un estímulo del exterior, en este caso la capsaicina, que es un químico, en una señal eléctrica que es transmitida hacia el sistema nervioso central.

Debido a que el consumo de picante produce una sensación “quemante”, Julius y su equipo probaron si el TRPV1 era activado también por altas temperaturas. En dichos experimentos, expusieron a neuronas sensoriales a distintas temperaturas externas y encontraron que el TRPV1 permite el paso de iones cuando la temperatura exterior era igual o mayor a 42 °C, lo que corresponde al umbral de lo que la mayoría de las personas experimentamos como una temperatura desagradable. Lo que encontraron es que la función primaria del receptor de capsaicina (muy conservada a nivel evolutivo) es proteger a los organismos de temperaturas altas potencialmente nocivas.

Por otro lado, al mismo tiempo pero de manera independiente, Julius y Patapoutian, descubrieron al receptor de temperaturas bajas, al que los científicos denominan TRPM8 (McKemy *et al.*, 2002; Peier *et al.*, 2002). Este receptor también es un canal iónico, pero a diferencia del TRPV1, se activa cuando la temperatura desciende por debajo de 20 °C y su máxima activación ocurre con temperaturas alrededor de 10 °C; este rango (10-20 °C) corresponde con el umbral de lo que las personas detectamos como desagradable.

Descubrieron este receptor de manera análoga a como se descubrió el TRPV1: para encontrar el TRPM8 utilizaron mentol, una molécula que produce sensación de frescura cuando se consume, o en la piel en el sitio donde se aplica.

El mentol se une al TRPM8 y lo activa; por eso, cuando consumimos una pastilla de menta, se genera en la boca la sensación de que ha descendido la temperatura dentro de ella, pero en realidad la boca cerrada se encuentra a la misma temperatura de todo el cuerpo, a 37 °C (si no nos creen, recuerden que la boca es un buen sitio para medir la temperatura con un termómetro).

Finalmente, la principal aportación de Ardem Patapoutian es el descubrimiento de la molécula que nos ayuda a convertir estímulos mecánicos en sensaciones como el tacto (Coste *et al.*, 2010). Dicha molécula también es un canal iónico, y no fue una la que descubrieron, fueron dos, y se les denomina PIEZO1 y PIEZO2. Estos canales detectan deformaciones en la membrana plasmática, las cuales generan que el poro de los canales se abra y permita el flujo de iones. PIEZO2 es abundante en las neuronas del sistema somatosensorial, particularmente en las activadas por tacto fino (como una caricia), no así en los nociceptores. Este grupo de neuronas de tacto fino se especializa en la detección de estímulos mecánicos de baja intensidad y nos permite percibir la brisa, si un mosquito se posa en nuestra piel y discriminar la textura de los objetos, entre otras cosas. PIEZO también es abundante en las neuronas que median la propiocepción e inervan tendones y músculos, y cuya activación participa en la determinación de la posición de nuestras extremidades en el espacio.

PIEZO tiene otras funciones: se localiza en los nervios que inervan la vejiga y su activación permite al cerebro determinar el volumen de este órgano, generando la sensación de vejiga llena y la activación de los reflejos de micción. El incremento del volumen urinario dentro de la vejiga produce estiramiento de la misma y esto es lo que produce la activación de PIEZO2.

PIEZO también tiene una función importante en el dolor neuropático. Este tipo de dolor es generado por un daño en el sistema nervioso y su síntoma principal es la alodinia, que no es otra cosa más que una sensación extraordinariamente dolorosa ante un estímulo que normalmente sería inocuo, como por ejemplo el roce de la ropa sobre la piel. Al parecer, PIEZO media la alodinia mecánica en varias condiciones patológicas que cursan con dolor neuropático.

Los hallazgos de Julius y Patapoutian no solo son importantes desde el punto de vista de la fisiología, las neurociencias o la biología celular, son sin duda relevantes para el tratamiento del dolor patológico, ya que las moléculas que descubrieron



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

pueden ser el blanco de fármacos que funcionen como analgésicos. Cabe resaltar que dichas moléculas, particularmente PIEZO, habían sido muy elusivas para los investigadores que se dedican a los órganos de los sentidos. La pregunta de ¿cómo las células sensoriales (neuronales o no) transforman los estímulos que detectan en señales eléctricas? ha sido el tema central de un sinnúmero de investigaciones, y son los descubrimientos de Patapoutian los que hicieron posible responder la cuestión.

Julius y Patapoutian han recibido, sin duda, un reconocimiento muy merecido que resalta la importancia de la investigación básica y repercute en varias disciplinas de las ciencias de la vida, particularmente en las ciencias médicas, y potencialmente en la mejora de la calidad de vida de muchos pacientes aquejados por dolor crónico para quienes, hasta el día de hoy, no tenemos un tratamiento adecuado.

REFERENCIAS

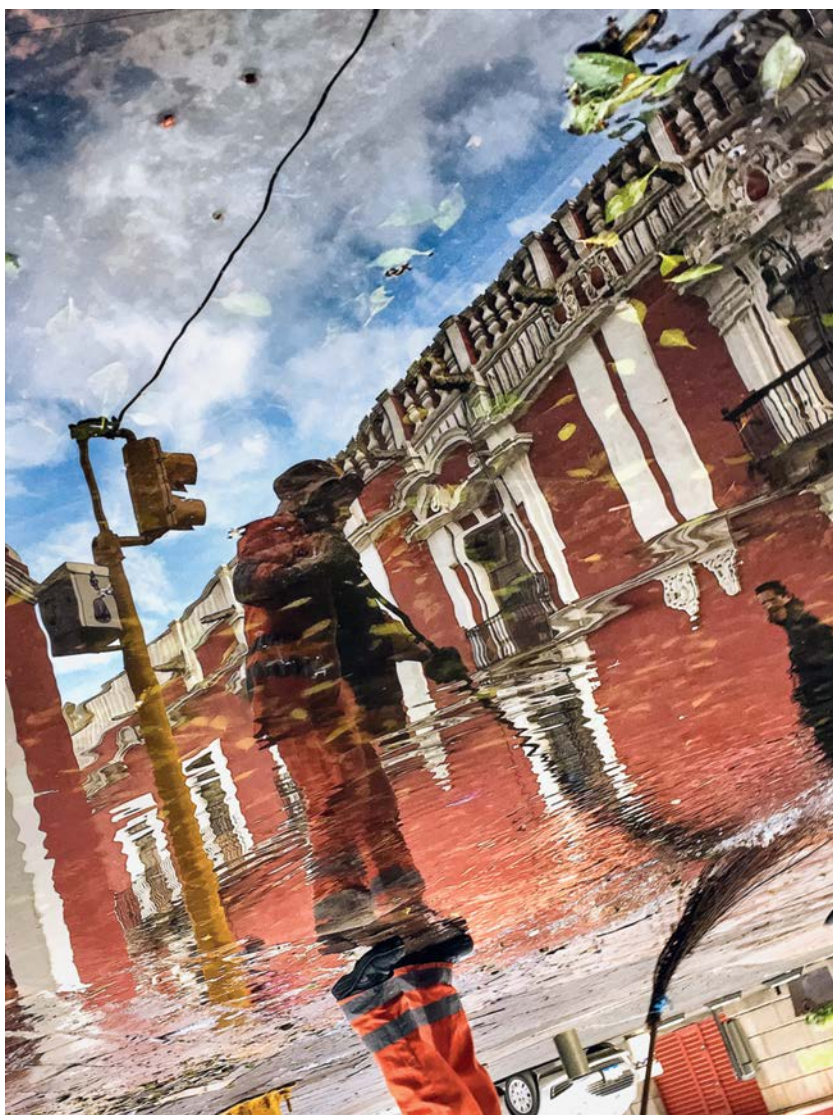
Caterina M *et al.* (1997). The capsaicin receptor: a heat-activated ion channel in the pain pathway. *Nature* 389:816-824.

Coste B *et al.* (2012). Piezo1 and Piezo2 are essential components of distinct mechanically activated cation channels. *Science* 330(6000): 55-60.

McKemy DD *et al.* (2002). Identification of a cold receptor reveals a general role for TRP channels in thermosensation. *Nature* 416:52-58.

Peier AM *et al.* (2002). A TRP channel that senses cold stimuli and menthol. *Cell* 108:705-715.

Francisco Mercado
Angélica Almanza
Laboratorio de Fisiología Celular
Dirección de Investigaciones en Neurociencias
Instituto Nacional de Psiquiatría
Ramón de la Fuente Muñiz, México
fmercado@imp.edu.mx



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

Consumo de opioides y pérdida de la audición

Enrique **Soto**
Teresa **Ramírez**
Rosario **Vega**

Los organismos superiores (incluidos los humanos) producen péptidos que funcionan como neurotransmisores o neuromoduladores en el cerebro, y se les ha denominado endorfinas (morfina endógena), encefalinas o péptidos opioides, esto porque las drogas opioides alteran la operación de este sistema de neurotransmisores neuromoduladores.

Los receptores a estas endorfinas o encefalinas se expresan en varios sistemas corporales, incluido el sistema nervioso central y periférico. Su activación por opioides puede inducir analgesia, euforia, dependencia, depresión respiratoria, bradicardia y retención urinaria. Los péptidos opioides endógenos (endorfinas y encefalinas) tienen, como ya mencionamos, un papel importante en la neuromodulación sináptica. Es posible que la activación de receptores opioides por sustancias exógenas pueda, además, alterar la neuromodulación auditiva y conducir a pérdida de la audición, entre otros efectos.

Los opioides son un conjunto de drogas tanto de origen sintético como natural que se unen a los receptores a endorfinas/encefalinas y producen así sus efectos. Entre los opioides de origen natural los más conocidos son la morfina y la codeína que derivan directamente de la planta de opio (*Papaver somniferum*).

Derivados sintéticos son la droga ilegal heroína, el fentanilo (que se usa como inductor en la anestesia) y analgésicos que están disponibles legalmente con prescripción médica, como la oxycodona, el tramadol, la hidrocodona (esta última en una mezcla con acetaminofeno se vende como Vicodin® y es la combinación a la que es adicto el doctor House, personaje en la serie de televisión), la metadona y la codeína, entre otros (Vega, 2005).

En la década de 1990 dio inicio lo que se conoce hoy como la epidemia de uso de opioides en los Estados Unidos cuyo origen se basa en la necesidad médica para el tratamiento del dolor, y las campañas de comercialización muy agresivas por parte de las farmacéuticas, promoviendo el uso de fármacos opioides.

Actualmente, Estados Unidos cataloga el consumo de opioides en su población como una epidemia que amenaza a su sistema de salud pública, y que con el tiempo se podría propagar a otros países (DeWeerd, 2019). Según datos del *National Institute of Drug Abuse* (NIDA) en EUA mueren diariamente 90 personas por sobredosis de opioides y se estima que la carga económica derivada del abuso de opioides recetados es de 78,500 millones de dólares por año (NIDA, 2021).

En México se prescriben fármacos como morfina, fentanilo y tramadol, aunque el abuso de estas sustancias no se equipara a la situación de Estados Unidos (Goodman-Meza *et al.*, 2019). Sin embargo, se ha reportado un incremento en la prescripción médica de opioides en México que va de 21,100 recetas en el 2014 a 327,800 en el 2016. De lo recetado en 2016 sabemos que el 49 % de recetas fueron por morfina (7 % por tapentadol, 7 % por oxycodona, 7 % por metadona, 29 % por fentanilo, 1 % por otros) (Covarrubias-Gómez *et al.*, 2019).

El abuso en el consumo de opioides produce diferentes efectos en el organismo que comprenden desde alteraciones gastrointestinales, diaforesis, euforia y confusión mental hasta depresión respiratoria y coma. A estos efectos, ampliamente conocidos, se deben agregar los casos en los que

se ha reportado sordera asociada al consumo de fármacos opiáceos (Bayat *et al.*, 2019). La pérdida auditiva se relaciona con sordera neurosensorial por el consumo prolongado de analgésicos narcóticos, aunque también hay casos de sordera de aparición súbita con un consumo agudo de heroína. Se ha documentado que el consumo crónico de analgésicos como el acetaminofén con hidrocodona, origina de forma paulatina sordera sensorial requiriéndose de implante coclear para la recuperación de la audición. También se ha reportado la pérdida temporal de la audición producida por metadona (Friedman *et al.*, 2000).

Entre miles de adictos, un bajo porcentaje de sujetos “susceptibles” son los que sufren alteraciones auditivas profundas por el consumo de opioides (Oroei *et al.*, 2018). La dosis de opioide que produce estos efectos es variable, hay casos de pacientes que presentan hipoacusia aun en esquemas de desintoxicación bien controlados con metadona, y también entre sujetos que están con régimen terapéutico controlado médicamente (Bayat *et al.*, 2019).

Los casos de pérdida auditiva asociada al uso o abuso de opioides revelan una gran variedad de vías de administración, de tiempo de consumo y dosis administradas. El mecanismo de ototoxicidad de los opioides no se ha determinado, pero la mejoría de algunos pacientes por el implante coclear sugiere un daño coclear aislado. El hecho de que los receptores opioides se expresen en el oído interno indica claramente que el daño coclear es fundamental en la pérdida auditiva, aunque se requieren estudios sobre la distribución y función de receptores opioides en el sistema auditivo para comprender completamente su toxicidad.

De las drogas que se han estudiado, la morfina, el fentanilo y el tramadol son drogas típicas de abuso, el fentanilo se agrega con frecuencia a la heroína o se disfraza de heroína, y es actualmente la droga opioide de consumo ilícito más frecuentemente utilizada en México. Estudios de la función auditiva en la chinchilla han demostrado que la activación de receptores opioides produce un aumento de los componentes N1 y N2 de las respuestas

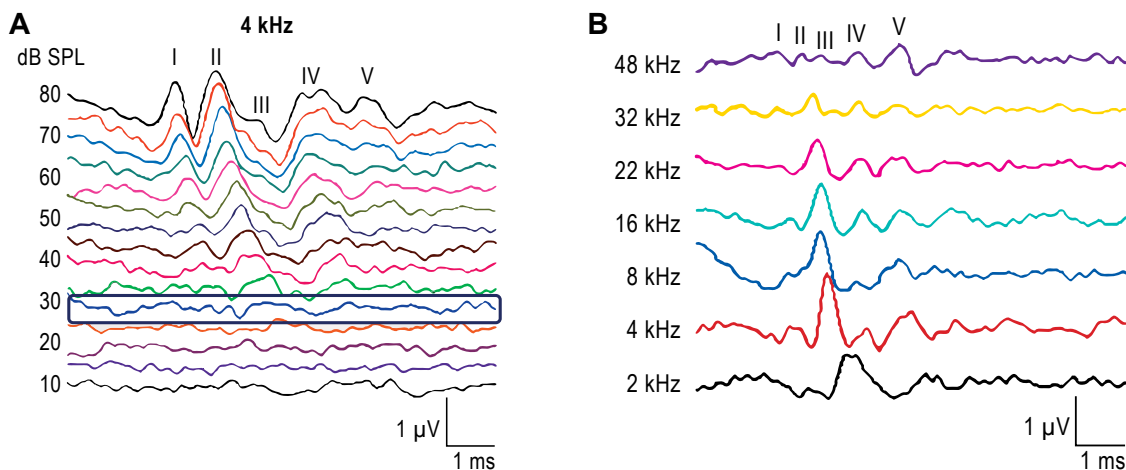


Figura 1. En A, registro de potenciales auditivos del tallo cerebral producidos con un tono de 4 KHz. El umbral auditivo para esta frecuencia está en 30 dB SPL. En B, registro típico de los potenciales auditivos del tallo cerebral en las diferentes frecuencias de estimulación (Ramírez *et al.*, 2020).

auditivas del tronco cerebral (Figura 1). La aplicación de forma directa en la membrana timpánica inhibe el potencial de acción compuesto de la cóclea (Le Prel *et al.*, 2014). En los babuinos, la buprenorfina y la morfina disminuyen la discriminación auditiva, además de disminuir la respuesta a los estímulos sonoros (Heinz *et al.*, 2001).

Resultados de nuestro grupo de investigación en la BUAP indican una regulación de la respuesta auditiva (Figura 1), mediada por la acción de los opioides liberados por el sistema olivococlear (Ramírez *et al.*, 2020).

Hay que mencionar que los receptores a opioides están acoplados a cascadas intracelulares, y entre los efectos que se desencadenan por la activación de estos receptores, están la inhibición de corrientes de calcio dependientes de voltaje, así como la activación de corrientes de potasio dependientes de calcio y de voltaje, teniendo como consecuencia el decremento de la actividad eléctrica de las neuronas (Soto *et al.*, 2016).

Un número significativo de publicaciones han demostrado que la pérdida auditiva puede estar asociada con el uso de opiáceos. El problema es importante porque cada día se dispensan más de 650,000 recetas de opioides en los Estados Unidos (Rawool, 2016), lo que ha llevado a un aumento notable en el número de casos de sordera relacionada con el de opioides.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo deriva del proyecto financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) Fronteras de la Ciencia, 1544.

© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.





© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

REFERENCIAS

- Bayat A, Saki N, Mirmomeni G and Yadollahpour A (2019). Early diagnosis of hearing loss of patients under methadone maintenance treatment. *Front Neurol* 10(749):1-6
- Covarrubias-Gómez A *et al.* (2019). Reflexiones sobre el uso de opioides para el tratamiento del dolor crónico no-oncológico en México. *Anestesiología* 42(4):312-314.
- DeWeerd S (2019). The natural story of an epidemic. Understanding how the opioid epidemic arose in the United States could help to predict how it might spread to other countries. *Nature*. 573: S10- S12
- Friedman R, House J, Luxford W, Gherini S and Mills D (2000). Profound hearing loss associated with hydrocodone/acetaminophen abuse. *Am J Oto* 21:188-191
- Goodman-Meza D, Medina-Mora MA, Magis-Rodríguez C, Lando-vitz RJ, Shoptaw S and Werb D (2019). Where is the opioid use epidemic in Mexico? A cautionary tale for policymakers South of the US-Mexico Border. *Am J Public Health* 109(1):73-82.
- Hienz R, Zarcone T and Brady J (2001). Perceptual and motor effects of morphine and buprenorphine in baboons. *Pharmacol Biochem Behav* 69 (1-2):305-313.
- Le Prell CG, Hughes LF and Bledsoe SC Jr (2014). Dynorphin release by the lateral olivocochlear efferents may inhibit auditory nerve activity: a cochlear drug delivery study. *Neurosci Lett* 1571:17-22.
- NIDA (2021). <https://www.drugabuse.gov/es/informacion-sobre-drogas/los-opioides/la-crisis-de-opioides>, consultada el día 4-11-2021.
- Oroei M, Peyvandi AA and Mokhtarinejad F (2018). Opioid drugs and sensorineural hearing loss. *Addiction & Health* 10(1):64-66.
- Ramírez T, Soto E and Vega R (2020). Opioid modulation of cochlear auditory responses in the rat inner ear. *Synapse* 74(1):e22128.
- Rawool VW (2016). Audiological Implications of the Opiate Epidemic. *Hearing J*. 69:10-12.
- Seseña E, Vega R and Soto E (2014). Activation of μ -opioid receptors inhibits calcium currents in the vestibular afferent neurons of the rat through a cAMP dependent mechanism. *Frontiers in Cellular Neuroscience* 8:90.
- Vega R (2005). Opioides: neurobiología, usos médicos y adicción. *Elementos* 60:11-23.

Enrique Soto
Teresa Ramírez
Rosario Vega
Instituto de Fisiología
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
esoto24@gmail.com

Robots en la medicina actual

Carlos **Arroyo**

Recientemente se instaló en Puebla un robot Da Vinci para la realización de procedimientos laparoscópicos asistidos por robot. Para utilizar esta tecnología se requiere de un entrenamiento específico, después del cual es posible realizar cirugías que antes eran consideradas de elevada complejidad y que con este robot se facilitan al punto de que puede extenderse la práctica quirúrgica a procedimientos más complejos, con más seguridad y precisión, y con una recuperación del paciente más rápida, con menos dolor y mejores resultados. Es curioso pensar que aún se está muy lejos de poder utilizar robots en la vida diaria como se ilustra en muchas películas futuristas, y sin embargo, cada vez estamos más rodeados de robots que participan rutinariamente en la vida diaria; por ejemplo, nadie se sorprende por una aspiradora robótica que tiene la capacidad de planear, aspirar y trapear una casa, y al terminar guardarse y recargarse; tampoco impresiona la gran difusión que tiene un sistema robótico de cocina que prepara todo tipo de platillos *gourmet*, envía al teléfono inteligente la lista del supermercado para la receta, y al terminar se lava sola; o los robots en las calles, como sucede en Estados Unidos, que ayudan a la vigilancia de edificios comerciales; tampoco extraña que cada vez haya más robots en la práctica médica actual.

Una duda importante es si los pacientes le confían más su salud, intimidad y enfermedades a una máquina, y así se evitan el contacto con otro ser humano. Incluso

se ha llegado a proponer que muchas personas tienen más confianza en una máquina que en un profesional de la salud para ayudarles a recuperarse de una enfermedad. Se trata, sin duda, de un fenómeno interesante; sin embargo, se puede caer en el extremo de deshumanizar más la medicina actual.

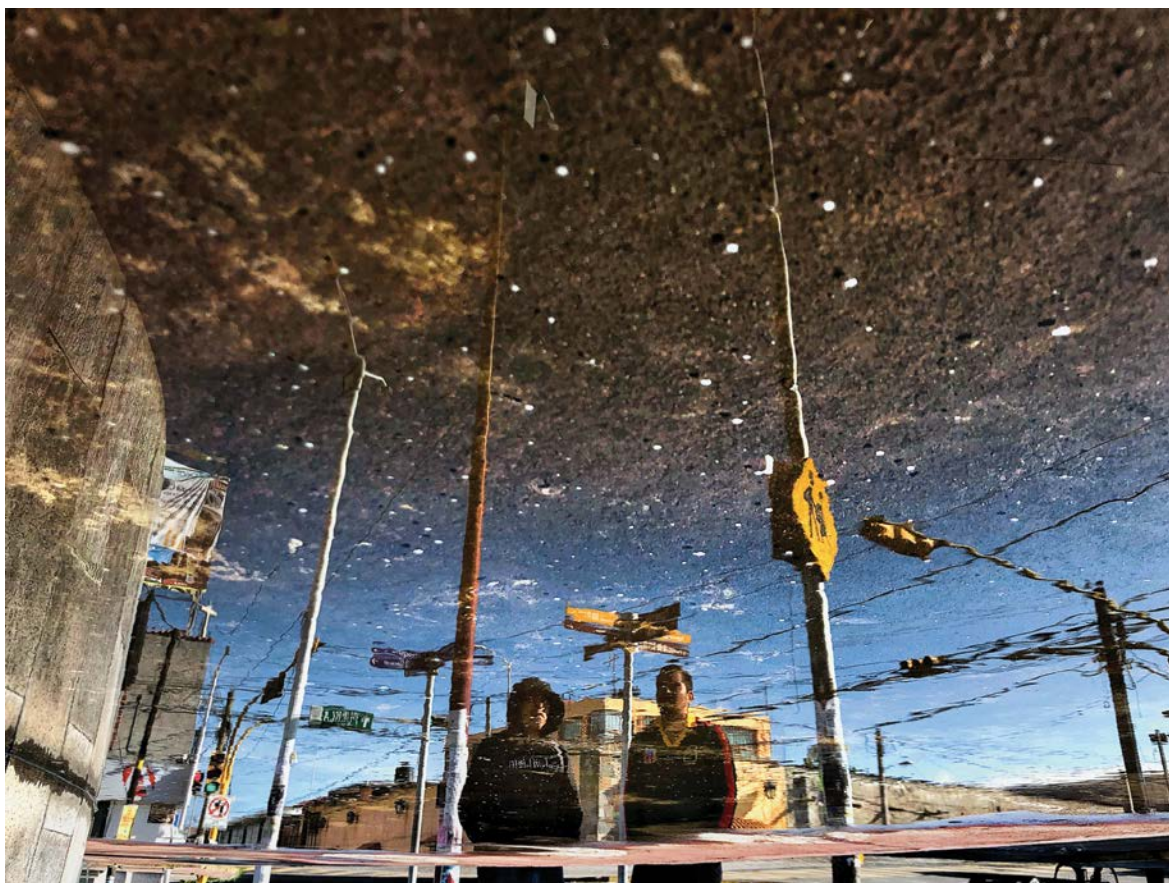
A continuación se revisan cuatro grandes grupos de robots que participan en la medicina: 1) robots empleados para transportar medicamentos o para la limpieza de habitaciones; 2) robots utilizados en cirugía, que incluyen brazos robóticos aislados o en conjunto; 3) robots especializados en la rehabilitación de pacientes con discapacidades físicas o extremidades protésicas (Gyles, 2019), y 4) robots androides que asisten a los enfermos en su vida diaria.

Actualmente, los robots se han ido programando para realizar ciertas tareas que facilitan el tratamiento de los pacientes y evitan que el personal médico se ocupe en actividades que consumen tiempo y pudieran ser rutinarias y sencillas. Un ejemplo de esto son los robots encargados de entregar resultados de laboratorio o medicamentos, que como en las fábricas de automóviles en que los robots distribuyen el material en el momento exacto, transportándolos desde la bodega hasta la máquina encargada del ensamblaje, repiten los mismos procesos con la distribución de fármacos, muestras médicas y material hasta las habitaciones de los pacientes o centrales de enfermería, y lo hacen con mayor control gracias a códigos de seguridad tanto en los pacientes como en las farmacias y el almacén del hospital. El uso de este tipo de robot es adecuado en situaciones tales como la pandemia de COVID-19, en la que la diseminación de la enfermedad se ha debido principalmente al contacto directo entre personas, y que llevó al distanciamiento social como medida preventiva. Otra posibilidad es dejar que los robots realicen actividades de aseo y descontaminación, ya sea con luz ultravioleta o materiales sanitizantes que podrían ser dañinos o tóxicos para el ser humano

al momento de aplicarlos en las habitaciones de los enfermos; el empleo de robots en estas actividades evitaría poner en peligro al personal de limpieza. Otra tarea idónea para un robot es la distribución de medicamentos sin contacto entre el personal de salud y el enfermo; su utilidad ha hecho que en muchos centros hospitalarios del mundo proliferen estos robots mensajeros y de limpieza (pudurobotics.com).

Dentro de esta nueva normalidad de actividades a distancia, también proliferaron robots que permitieron conferencias y consultas en línea con los pacientes infectados por COVID-19, lo que permitió que se mantuvieran en contacto con su familia y con equipos de soporte psicológico que estuvieron dando terapia para apoyo emocional a pacientes aislados por padecer esta enfermedad contagiosa. Ejemplos de estos equipos son los que se implementaron en la ciudad de México en el Centro Médico Nacional 20 de Noviembre, en el que robots mexicanos llamados Robotina Covidia y Davinchito Robotino, que son robots con movimiento y con pantallas para interactuar con los pacientes, permitieron trabajar al Departamento de Psicología y Psiquiatría con los enfermos hospitalizados sin poner en riesgo al personal médico (saluddigital.com).

Algunos de los sistemas que más difusión han tenido en la actualidad son los llamados sistemas robóticos pasivos. Estos sistemas involucran un brazo robótico que puede sostener un instrumento, como una cámara endoscópica, sin temblor y en una posición exacta que permite realizar una cirugía laparoscópica; ejemplo de esto es el robot Aesop®, que se posiciona mediante el movimiento directo del brazo, o bien es guiado por la voz del cirujano. Recientemente se han implementado microscopios en el brazo robótico, lo que permite realizar neurocirugías con mayor exactitud con el sistema Aesculap Aeos® (bbraun.com). Otro ejemplo es el sistema Rosa, de Zimmer Biomet®, utilizado en cirugía de rodilla, que durante el procedimiento fija y alinea la rodilla del paciente, al tiempo que transmite retroalimentación del tejido que se está cortando para que la colocación de la prótesis de



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

rodilla sea exacta e individualizada para cada persona (zimmerbiomet.com). También existen brazos robóticos que al planear el área a retirar de la próstata con un ultrasonido simultáneo, sostienen ambos equipos y cortan progresivamente la próstata, ya sea con electricidad o con un chorro de agua muy intenso.

Esta modalidad de robots se ha repetido con otros sistemas que permiten fijar extremidades en cierta posición sin cambio. Esto puede ser de gran utilidad en una cirugía de ortopedia en la que el hueso se va a reparar usando tornillos y placas, y para ello se requiere fijar la fractura mientras el cirujano aplica estos materiales. Otro sistema robótico que se basa en la misma tecnología es el utilizado en neurocirugía, en la que se planea un procedimiento basado en imágenes obtenidas previamente del cerebro del paciente y entonces el robot repite con exactitud la ruta que se propuso durante la planeación.

Esto previene dañar áreas críticas del cerebro o la médula espinal, permite un mayor éxito en estos procedimientos, y disminuye el temblor o fatiga humana del cirujano que podría provocar lesiones irreparables a los pacientes. En esta modalidad se incluye un sistema para cirugía endoscópica en urología en el que el robot sostiene una cámara muy fina llamada ureteroscopio flexible, que tiene la capacidad de ascender a través del sistema urinario, hasta los riñones, para ahí romper y extraer las piedras urinarias, con la ventaja de mantener la posición que el cirujano establece, disminuyendo así la fatiga, eliminando el temblor y el cambio de ubicación involuntaria durante el procedimiento.

El sistema más reconocido de cirugía robótica es un sistema maestro-esclavo que se ha difundido gracias a la empresa Intuitive® que durante 20 años ha conservado la patente del robot Da Vinci®, y con



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

el cual se han realizado hasta la fecha más de 5 millones de cirugías asistidas por robot en todo el mundo. Es un sistema que se compone de hasta cuatro brazos de los que uno sostiene la cámara de tercera dimensión para realizar el procedimiento laparoscópico con un gran aumento, en tanto que los otros tres se montan en puertos de trabajo, conocidos como trocares, para introducir instrumentos como pinzas y tijeras durante el procedimiento. Todos los brazos repiten los movimientos del cirujano, el cual se encuentra en una consola lejos del paciente. El sistema disminuye el temblor del cirujano, con mayor aumento en la imagen a través de una visión tridimensional, y posee sistemas que reproducen la acción de las articulaciones de la muñeca sobre los instrumentos (intuitive.com).

Recientemente se han desarrollado nuevas plataformas de cirugía que tienen interesantes modificaciones, como brazos no anclados al aparato principal. Los nuevos sistemas incorporan incluso técnicas denominadas de puerto único, que es un solo trocar en el que se introducen los instrumentos y la cámara articulados, de forma que simulan los movimientos de una serpiente que permite que los movimientos y articulaciones se alejen del centro de trabajo para no obstruir la visibilidad;

estos robots permiten realizar la cirugía con una sola incisión (titanmedicalinc.com).

Otro tipo de robot es el que se usa como aditamento agregado sobre el individuo. Este ramo importante de soporte robótico se originó en la industria de la construcción, en la que un sistema o exoesqueleto de soporte permite a los pintores ascender sin andamios y dar apoyo a los brazos para evitar la fatiga empleando motores externos que amplían los movimientos del trabajador. Tales avances tecnológicos se han aplicado con gran éxito en la fisioterapia y la rehabilitación, en las que se emplean sistemas de exoesqueletos, o robots, que se superponen al cuerpo humano para mover a los pacientes a la manera de una grúa unida a los brazos del personal, pero con una mayor fuerza y sin esfuerzo ni fatiga para mover al paciente que se encuentra limitado en sus movimientos.

También se han utilizado estos equipos en pacientes que tienen parálisis o muy poca fuerza; en ellos, mediante un estímulo eléctrico mediado por los nervios del paciente, o con los movimientos sutiles que le restan al mismo, se mueve el robot, permitiendo al sujeto realizar actividades que de otro modo serían imposibles por su limitada fuerza, como caminar o moverse (m.cyberdyne.jp). Estos robots se han reducido a tamaños muy pequeños, hasta el punto de que se ha logrado hacer extremidades robóticas, como manos, que mediante conexiones con los nervios que conserva el paciente amputado, le permiten mover dedos y manos robóticas para sustituir la extremidad perdida.

Finalmente, están los robots tipo androide, que pueden servir como mascota de compañía por ser similares a un perro, o tener forma humanoide, y a los que una persona restringida a una silla de ruedas puede solicitarles que realicen tareas simples, como bajar o subir objetos dentro de la casa, tomar fotografías o videos, y obedecer indicaciones verbales (www.toyota.es).

Todos estos sistemas robóticos tienen como objetivo la exactitud y la eficiencia en las actividades que realizan o ayudan a realizar, y están sustentados en reportes y análisis actualizados acerca de cómo se han conseguido los resultados

obtenidos para mejorarlos continuamente, con el beneficio de disminuir la fatiga del personal de salud y las complicaciones asociadas a la atención de la enfermedad, incluyendo el riesgo de contagio de enfermedades infectocontagiosas, gracias al distanciamiento del médico con el paciente; sin embargo, es importante considerar que también disminuye la parte de contacto humano que es medular en la medicina.

Podemos suponer que la perspectiva de la robótica médica será, primero, un menor costo de los sistemas, que se dará gracias a la competencia de nuevas empresas y a la reducción de los costos de producción de los componentes, lo cual facilitará una mayor difusión y uso por la población general. Otro aspecto importante que habrá que atender en el futuro será incrementar la portabilidad de los robots para poder incluirlos en las actividades rutinarias, hasta el punto en que se desarrollen micro o nanorrobots que se podrán inyectar en el cuerpo humano para que, como en la película *Viaje fantástico* (Richard Fleischer, 1966), migren para llegar al órgano enfermo y ahí tomen biopsias para el análisis de la enfermedad, o administren medicamentos a dosis muy bajas por estar directamente sobre el tejido anormal, e incluso corten y reparen los órganos mediante el uso de láser y pegamentos en el sitio a tratar, sin tener que abrir al paciente, que es lo que ocasiona daño al individuo y retraso en su recuperación.

Un aspecto pendiente de resolver en los sistemas robóticos es la pérdida de la percepción del tacto, puesto que el robot no siente la resistencia de los tejidos o materiales con los que trabaja, y el cirujano solamente siente la resistencia de los resortes y articulaciones de la plataforma robótica, lo que hace que la cantidad de fuerza que se aplica a través del brazo robótico, se traduzca por lo que se está viendo con los ojos y no por lo que se siente con el tacto. La perspectiva será que los sistemas robóticos tendrán que retransmitir a los instrumentos las características táctiles del material con el que se trabaja para que realmente se incluya el sentido del tacto durante el uso del robot y se consiga una actividad más envolvente para el



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

operador. Esto tiene una gran importancia durante un procedimiento quirúrgico, porque durante la cirugía tradicional el cirujano se guía con lo que palpa con las manos, y esto se pierde con los sistemas robot-esclavo actuales porque no hay ninguna resistencia en la consola que simule la resistencia de los tejidos con los que se está trabajando, pero una posible solución es que el robot detecte las características de los tejidos que está tocando y las transmita como información al cirujano. Esto también tendrá que implementarse en los sistemas de exoesqueletos, porque al mover los objetos será ideal que la persona sienta la resistencia y consistencia de lo que está moviendo.

En el futuro, los robots en la cirugía van a ser muy pequeños y portátiles, como cangrejos que



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

tendrán instrumentos con puntas intercambiables que van a permitir, mediante bluetooth o tecnología inalámbrica, que el cirujano dirija la cirugía en un ambiente más envolvente con apoyo de cámaras e imágenes radiográficas previas que permitirán planear la cirugía antes de su realización, y que al momento del procedimiento identifiquen y avisen cuáles son las estructuras a cuidar, como los vasos sanguíneos o los nervios, y delimiten el tejido enfermo para que, incluso con fotografía microscópica, puedan ayudar a definir el punto de corte en el que, por ejemplo, las células cancerosas dan un margen a las células sanas, permitiendo quitar los tumores completos, curando así la enfermedad que se está tratando.

En resumen, los robots en medicina están muy presentes en la actualidad, y van a participar cada vez más en el cuidado y atención de los enfermos para mejorar la calidad de vida del ser humano. Sin embargo, todavía estamos lejos de que sea el robot el que tome en forma autónoma la decisión del tratamiento sin el consentimiento, indicación o aprobación de un médico o un ser humano, para asegurar que se tome la mejor opción de manejo para los pacientes. Pero ya se realizan estudios y análisis computacionales que no están lejos de



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

establecer diagnósticos y tratamientos independientes de la opinión de un médico.

REFERENCIAS

- Gyles C (2019). Robots in medicine. *Can Vet J*. 60(8):819820. <https://www.pudurobotics.com/>.
- <https://saluddigital.com/plataformas-digitales/robot-con-inteligencia-artificial-apoya-a-pacientes-covid-en-el-cmn-20-de-noviembre-en-la-ciudad-de-mexico/>.
- <https://bbraun.com/en/products-an-therapies/neurosurgery/aesculap-aeos.html>.
- www.zimmerbiomet.com.
- www.intuitive.com.
- <https://titanmedicalinc.com/technology/>.
- <https://m.cyberdyne.jp>.
- <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/robots-Toyota-movilidad>.

Carlos Arroyo
Departamento de Urología
Hospital Ángeles de Puebla
Escuela de Medicina
Universidad Anáhuac, Puebla
jcakurologia@yahoo.com.mx

Sensores micrométricos para el monitoreo de variables electroquímicas y biológicas

Rosa María **Woo García**
Leandro **García-González**
Francisco **López Huerta**

A lo largo de la historia los seres humanos han desarrollado capacidades físicas artificiales para facilitar la vida cotidiana, la posibilidad de aumentar la capacidad sensorial a partir de transductores y, en específico, mediante sensores, fundamentales en el avance y consolidación de la cuarta revolución industrial. Los sensores son dispositivos cada vez más importantes para la toma de decisiones que mejorarían la calidad del agua, el aire, la comida, las medicinas. Los procesos en los que se encuentren involucradas las propiedades químicas o físicas deben ser supervisados constantemente para mejorar la calidad o la eficacia del producto o proceso. Por ejemplo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), calcula que en el año 2019 se perdió un 18 % del desperdicio total de alimentos exclusivamente por las condiciones de acidez en el campo, por causas climatológicas y por las prácticas utilizadas en la recolección de las frutas, hortalizas, raíces, tubérculos y cultivos oleaginosos; por ello es necesaria la determinación continua de las variables ambientales involucradas en el proceso de siembra, cultivo y cosecha.

A comienzos del siglo 21 el uso de microsensores electroquímicos basados en la tecnología de semiconductores, para la supervisión de parámetros ambientales, han ganado interés debido a las bondades que presenta frente a los sensores convencionales basados en electrodos de vidrio. Los sensores son dispositivos que transforman señales de diversos dominios de energía hacia el dominio de las señales eléctricas. Cada vez es más común el uso de sistemas multisensores, prueba de ello es el auge del mundo del Internet de las Cosas (IoT), donde diversos dispositivos se encuentran interconectados en una red de comunicación. Para la realización de estos sistemas se incluyen sensores inteligentes basados en la tecnología de fabricación Metal Óxido Semiconductor Complementaria (CMOS), pues en ella se conjunta la capacidad de integración del sensor con su electrónica, es decir, que en el mismo circuito integrado (chip) se implementa tanto la circuitería que desarrolla el sensado, el procesamiento de señales, autodiagnóstico, autoidentificación, calibración e interfaz, con la gran ventaja de reducir los costos, sumando la posibilidad de reducir el tamaño de los dispositivos. Adicionalmente, los microsensores basados en transistores de efecto de campo (FET por sus siglas en Ingles) cumplen las funciones de robustez, facilidad de uso y lectura de resultados, teniendo como ventaja la ausencia de manipulación de reactivos y la minimización del tamaño de la muestra a medir.

Una de las necesidades con mayor demanda en los procesos farmacéuticos, alimentarios y de investigación ambiental, es la de cuantificar la concentración de iones existentes en una solución, así como el de construir instrumentos para la lectura exacta de los mismos. Fue a principios del siglo pasado cuando los fundamentos teóricos sobre las unidades de medida de acidez y basicidad nacen en la industria y los dispositivos para evaluarla se generan en la academia para, en concreto, cuantificar la concentración de iones hidrógeno (medir pH) en medios acuosos y con ello tomar

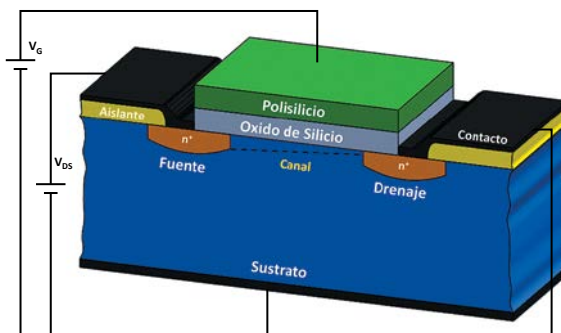


Figura 1. Estructura del transistor MOSFET.

decisiones para controlar de mejor manera los procesos de fermentación de alcohol, de la actividad enzimática en el extracto de malta para la elaboración de panes y galletas, de catálisis para acelerar la velocidad de las reacciones.

En 1970, Piet Bergveld desarrolló un dispositivo capaz de medir actividad iónica en medios ambientes biológicos y electroquímicos, registrando el nivel de pH en una solución; este dispositivo lo denominó ISFET, pues su principio de funcionamiento es similar al del transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET) de canal N de enriquecimiento. A partir del dispositivo de Bergveld, se han desarrollado microsensores basados en la combinación de la tecnología microelectrónica con la síntesis de materiales nanoestructurados, membranas sensibles y películas delgadas para la cuantificación de analitos.

Para comprender el funcionamiento del microsensor FET se debe partir del análisis simple del transistor MOSFET, un interruptor diminuto conformado por 4 terminales: sustrato, fuente, compuerta y drenaje. Su estructura interna consiste en dos regiones con una alta concentración de electrones libres (material tipo n^+), una porción de material conductor (polisilicio) y una capa delgada de óxido de silicio que realiza la función de aislante entre el contacto de compuerta y el sustrato. En la Figura 1 se puede observar la estructura de un transistor MOSFET.

La función principal del MOSFET es controlar el flujo de corriente entre la fuente y el drenaje

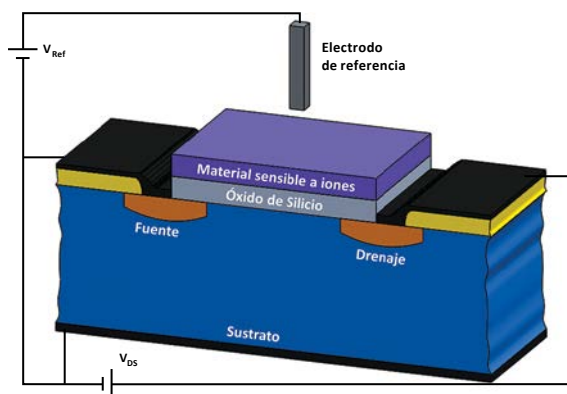


Figura 2. Estructura microsensor FET.

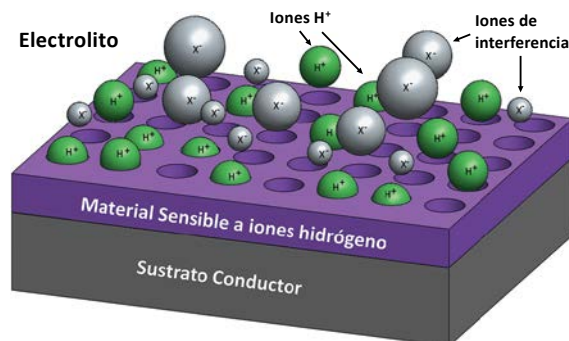


Figura 3. Película de material sensible a iones de hidrógeno.

mediante la magnitud del voltaje que se aplica en la terminal de compuerta. A diferencia del transistor MOSFET, los microsensors FET (Figura 2) no poseen el metal conductor en la compuerta, es así como el óxido básico o una membrana selectiva se expone directamente en la solución a medir (electrolito).

Al establecer el contacto entre el óxido y un electrolito de interés, los fenómenos electroquímicos que se presenten en dicha unión, influyen en la activación del dispositivo y, por tanto, en la magnitud de la corriente que fluye en las terminales fuente a drenaje. Para la adecuada operación del microsensor es necesario contar con un electrodo de referencia que sea capaz de fijar un potencial estable y reproducible, sin importar el grado de actividad iónica de la solución a medir, asegurando así que la medición del sensor es debido al cambio en el potencial interfacial generado entre el óxido básico y el electrolito.

La sensibilidad que presente el microsensor FET depende en gran medida del material de detección de la especie iónica de interés, qué tan reactivo puede llegar a ser el material con el electrolito y, en específico, con el analito, puesto que pueden presentarse iones de interferencia ante los cuales se genere una reacción no deseada.

A lo largo de las últimas décadas se han estudiado y desarrollado algunas películas delgadas (Figura 3) combinadas con nanoestructuras de óxidos básicos y nitruros, las cuales llegan a tener sensibilidad a iones específicos como el calcio, sodio,

potasio, plata, cloro, así como antígenos, especies moleculares o analitos en volúmenes pequeños.

CASOS DE ESTUDIO DE MICROSENSORES FET PARA EL MONITOREO DE VARIABLES ELECTROQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS

Las primeras variaciones de la estructura de Bergveld, fueron las diseñadas por Matsuo y colaboradores en 1981, quienes desarrollaron un microsensor FET añadiendo una capa de nitruro de silicio depositado sobre óxido de silicio, el dispositivo presenta una sensibilidad al pH muy cercana a la respuesta Nernstiana, que se caracteriza por otorgar 52-56 milivolts por cada unidad de pH (mV/pH); el nitruro de silicio muestra menos reactividad a iones interferentes con el hidrógeno, como los iones sodio y potasio, por lo tanto este microsensor es selectivo, haciéndolo buen candidato para medir pH.

Posteriormente se diseñaron dispositivos para la detección y medición de concentración de creatinina, glucosa, urea, triglicéridos; estos microsensors FET son también conocidos como CHEMFET. Dentro de esta categoría también se encuentran los que utilizan membranas selectivas para la detección de especies moleculares, películas enzimáticas, polisiloxanos, poliuretanos y otros polímeros derivados de metacrilato, demostrando mayor rendimiento en cuanto a reproducibilidad y estabilidad a largo plazo en comparación

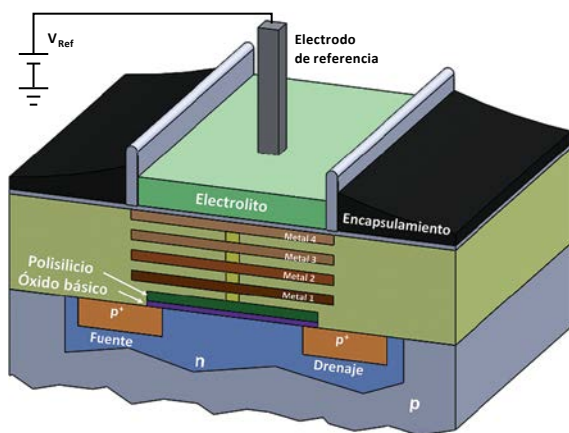


Figura 4. Estructura del pixel de matriz de microsensors FET.

con los primeros sensores FET de membranas basadas en cloruro de polivinilo.

Algunas nanoestructuras son sintetizadas de manera independiente al dispositivo FET, siendo incorporadas de manera externa mediante una compuerta extendida, ya que ambos procesos de fabricación no son compatibles; estos microsensors reciben el nombre de (EGFET por las siglas en inglés de *Extended-gate field effect transistor*). También se han investigado transistores de efecto de campo basados en nanotubos de carbón (CNT-ISFET), utilizando óxido de hafnio como material dieléctrico de compuerta, obteniendo sensibilidad de 60 mV/pH (Dutta *et al.*, 2019). Se ha propuesto un tipo de *effect* cuyo material sensible son nanohojas de óxido de wolframio, teniendo una sensibilidad de 63 mV/pH, esta mejora en sensibilidad y respuesta se atribuye al aumento significativo en el número de sitios de adsorción de iones en la superficie de la estructura de las nanohojas (Kuo *et al.*, 2018).

Un caso de estudio extraordinario son las imágenes de concentración y flujo, que consisten en realizar la lectura de la densidad de un analito en una solución delimitada en un área, con la finalidad de obtener una alta resolución química. Se ha diseñado un arreglo matricial de microsensors ISFET (Figura 4) de 64 x 64 elementos, obteniendo imágenes

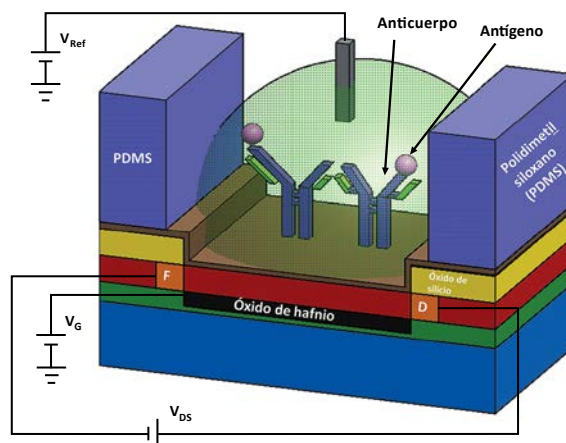


Figura 5. Elemento DG-ISFET de la matriz para la detección de bioanalitos.

del pH durante el fenómeno de difusión al inyectar ácido cítrico en hidróxido de sodio, pudiendo capturar la disminución progresiva del pH en un área de 715 micras cuadradas (Nemeth, 2013).

Probablemente, la secuenciación de ADN ha sido la aplicación más popular y exitosa de los microsensors FET. Los microarreglos para la detección de ADN se desarrollaron a principios de la década del 2000 con una abrumadora mejora en comparación con las técnicas químicas.

Para su medición se emplea la propiedad de que cada célula contiene filamentos de ADN de una secuencia particular; así, mediante la detección de anticuerpos y antígenos es posible secuenciar el genoma del organismo de interés sin la necesidad de someter a un ensayo clínico donde se determina dicha secuencia.

Se ha desarrollado un inmunoensayo electroquímico para la detección de bioanalitos en el ensayo Inmunoabsorbente ligado a enzimas con factor de complemento Humano (H-ELISA por sus siglas en inglés) generado por la enzima glucosa oxidasa, utilizando únicamente protones (sensado de pH) como medio de detección. Se diseñó un microsensor de transistor de doble compuerta sensible a protones (DG-ISFET).

El diseño se compone de una matriz de 16,384 elementos (128 x 128) de detección, como los que se muestran en la Figura 5. El sistema, además, detecta la proteína C reactiva y la inmunoglobulina E

hasta concentraciones de 12.5 y 125 picogramo por mililitro, respectivamente (Juang *et al.*, 2018).

DESAFÍOS

Es evidente que el futuro de los microsensores FET se encuentra en los arreglos de tipo matricial. En la actualidad, se desarrollan cada vez más sistemas con una densidad de microsensores mayor y con un aumento en el área de exposición. La tendencia es hacia el incremento del área de detección química con la finalidad de minimizar el ruido.

La integración de los microsensores FET y su circuito de lectura en un solo chip ha sido uno de los puntos claves en el desarrollo de estos dispositivos, buscando el escalamiento a la par de cualquier tecnología nanométrica. Sin embargo, este no ha sido el caso de los electrodos de referencia, cuya estructura continúa siendo similar a la de inicios de los años 90's. Una estructura novedosa consiste en incorporar en la compuerta del microsensor FET dos capacitores Metal-Aislante-Metal (MIM), cuyas terminales se encuentran conectadas a dos placas de sensado. Una de las placas de esta estructura presenta la misma función que el electrodo de referencia, con la gran ventaja de estar integrada dentro del mismo chip y, por lo tanto, se prescindiría del electrodo externo, reduciendo los costos de producción y el tamaño del microsensor.

Es necesario también dedicar esfuerzos para proponer nuevas topologías y esquemas de compensación, es decir, instrumentación más eficiente y robusta, donde la calibración y los tiempos de deriva se reduzcan. Se espera que se incorporen mecanismos para el manejo de factores como la estabilidad de la temperatura, la inmunidad al ruido e incluso la sensibilidad a la luz. Estos avances serán requisitos indispensables para que se originen nuevas aplicaciones de los microsensores FET.

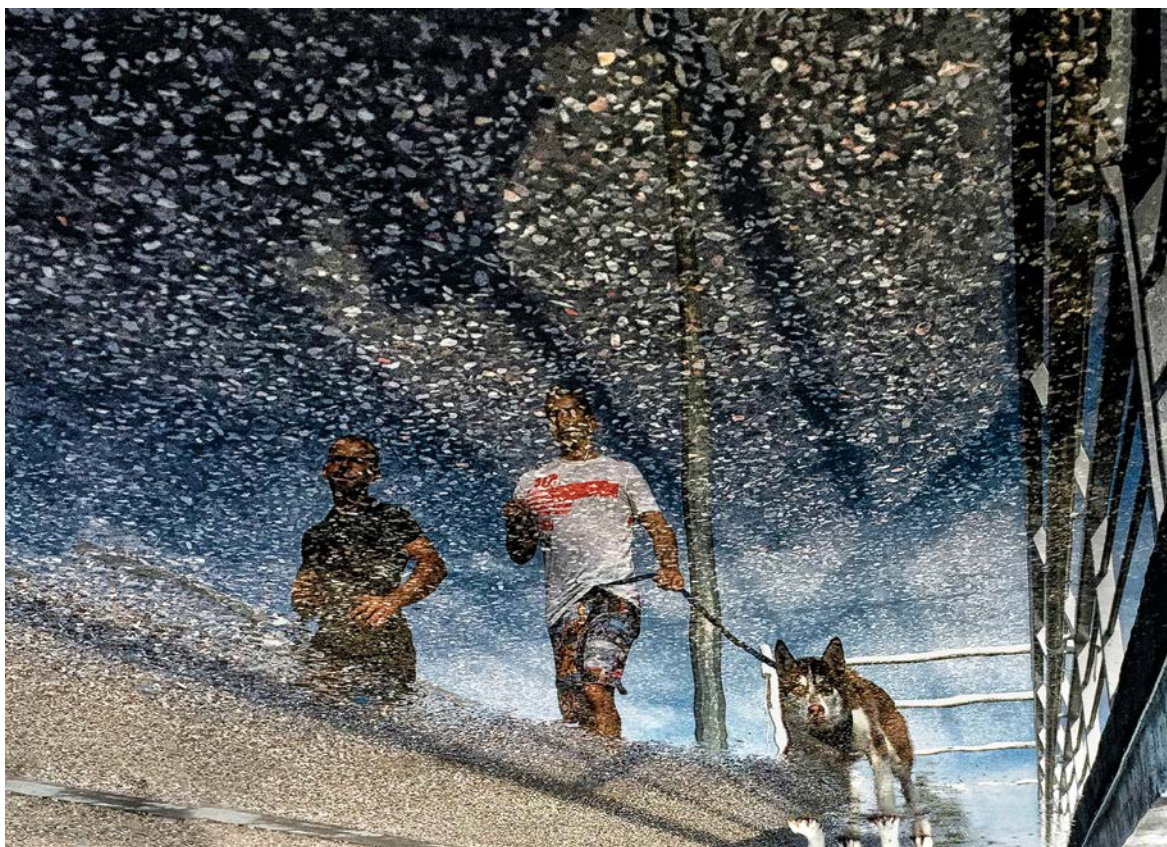
Actualmente, en las instalaciones del Centro de Investigación de Micro y Nanotecnología en la Universidad Veracruzana, se están desarrollando materiales y nanoestructuras para la medición de pH aplicados en microsensores FET. Particularmente,

en el Laboratorio simulación y caracterización de circuitos integrados y MEMS, se diseñan etapas de instrumentación para la amplificación y acondicionamiento de las señales de este tipo de dispositivos.

CONCLUSIONES

Los microsensores FET son ideales para la integración en sistemas parcial o completamente automatizados, donde la prioridad es el desarrollo de sistemas analíticos miniaturizados que proporcionen análisis de alto rendimiento, donde existe un bajo consumo de reactivos, además de muestreo automático con acondicionamiento y calibración *in situ*. La capacidad de detección y selectividad de los diversos analitos depende en gran medida de los materiales y las nanoestructuras desarrolladas, colocadas como elemento sensible. Actualmente, los microsensores FET comienzan rápidamente a ganar terreno en el campo de los sensores químicos debido a su integración con la tecnología CMOS estándar, garantizando una escalabilidad predicha por la ley de Moore, duplicando cada dos años la densidad matricial de microsensores FET en un mismo chip. Existen algunas áreas de oportunidad para mejorar el acondicionamiento de estos dispositivos y, con ello, aumentar su confiabilidad con la finalidad de cumplir los criterios que permitirán fabricarlos en grandes volúmenes, haciéndolos accesibles en costo al público en general.

Hace ya 50 años, cuando Bergveld informó sobre el diseño de su microsensor FET, su principal motivación era realizar mediciones de pH donde no se podían colocar electrodos de vidrio. Actualmente, su invención se ha convertido en un dispositivo esencial en el campo de la detección, con una investigación en constante crecimiento que pronto integrará millones de microsensores FET para el sensado de analitos, secuencias de ADN, proteínas, iones, antígenos, ionóforos de manera autónoma y masivamente paralela.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

REFERENCIAS

Juang DS, Lin CH, Huo YR, Tang CY *et al.* (2018). Proton-ELISA: electrochemical immunoassay on a dual-gated ISFET array. *Bio-sensors and Bioelectronics* 117:175-182.

Zhang J, Zhao D, Yang H *et al.* (2019). Dual-mechanism model to describe the slow response of ISFETs. *IEEE Sensors Journal*, 19:7471-7478.

Keeble L, Moser N, Rodriguez-Manzano J and Georgiou P (2020). ISFET-based sensing and electric field actuation of DNA for on-chip detection: a review. *IEEE Sensors Journal*. 20:11044-11065.

Moser N, Keeble L, Rodriguez-Manzano J and Georgiou P (2019). ISFET arrays for lab-on-chip technology: a review. *26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)* (pp. 57-60) IEEE.

Lee CS, Kim SK and Kim M (2009). Ion-sensitive field-effect transistor for biological sensing. *Sensors* 9(9):7111-7131.

Matsuo T and Esashi M (1981). Methods of ISFET fabrication. *Sensors and Actuators* 1:77-96.

Hazarika C, Neroula S and Sharma S (2019). Long term drift observed in ISFET due to the penetration of H^+ ions into the oxide

layer. In *International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence* (pp. 543-553). Springer, Cham.

Dutta JC, Thakur HR and Keshwani G (2019). High-performance dual-gate carbon nanotube ion-sensitive field effect transistor with high-k gate and low-k gate dielectrics. *IEEE Sensors Journal*, 19(14):5692-5699.

Kuo CY, Wang SJ, Ko RM and Tseng HH (2018). Super-Nernstian pH sensors based on WO_3 nanosheets. *Japanese Journal of Applied Physics* 57(4S):04FM09.

Nemeth B, Piechocinski MS and Cumming DR (2012). High-resolution real-time ion-camera system using a CMOS-based chemical sensor array for proton imaging. *Sensors and Actuators B: Chemical* 171:747-752.

Leandro García-González
Francisco López Huerta
Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología
Universidad Veracruzana, México

Rosa María Woo García
Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología
Universidad Veracruzana, México
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Veracruzana, México

rwoo@uv.mx

Homo imperfectus

José Antonio **González Oreja**

Un vehículo todoterreno se desplaza por las extensas planicies del Parque Nacional del Serengueti, en el norte de Tanzania, mientras graba una escena de caza. A plena luz del día, el potente *zoom* de la moderna videocámara capta a un guepardo que persigue a toda velocidad a una joven gacela de Thomson. La voz en *off* del narrador del documental nos recuerda que el guepardo es el animal terrestre más rápido conocido, pues se han documentado velocidades máximas de unos 115 kilómetros/hora, y refuerza en nosotros la idea de que está perfectamente adaptado a las condiciones de vida en el ecosistema de la sabana de África. La voz en *off* afirma, también, que todo en la anatomía del depredador está perfectamente diseñado para este momento, pues se alcanzan los límites biomecánicos de tolerancia del sistema musculoesquelético del guepardo. Son ejemplo de ello la extensión y flexión extrema de su columna vertebral, así como el fantástico despliegue de sus extremidades durante las fases en suspensión del movimiento, que le permiten prolongar la longitud de la zancada y acelerar de forma casi explosiva para lograr tales velocidades (Kardong, 2009).

Sin embargo, la gacela, todavía inexperta en la realidad de las relaciones ecológicas entre depredadores y presas, se hace grácilmente a un lado en la última milésima de segundo y el cuerpo del guepardo, que no puede evitar las consecuencias de las leyes de la física sobre los seres vivos, rueda atropelladamente por el suelo

cuarteado, reseco y polvoriento de la sabana. Al parecer, la perfección en el diseño del guepardo no ha sido suficiente como para garantizar su éxito en este lance de caza: la joven gacela vivirá, por lo menos, para ver una puesta de sol más sobre el ardiente horizonte del Serengeti.

UNA NATURALEZA IMPERFECTA

Aunque la escena anterior es fruto de mi imaginación, incluida la voz en *off* y su explicación sobre la supuesta perfección de la adaptación del guepardo a su modo de vida como un superdepredador de la sabana, lo cierto es que narraciones así abundan. No tenemos más que disfrutar de canales de televisión como Animal Planet, Discovery Channel o National Geographic, o las más modernas plataformas como Amazon o Netflix, para confirmar lo que digo. La idea de que los seres vivos están perfectamente adaptados a su medio ambiente nos resulta fascinante y, muy probablemente, los creadores de contenidos sobre la naturaleza lo saben y lo explotan de forma consciente.

Sin embargo, como nos aclara cualquier buen libro de texto sobre evolución (por ejemplo, Emlen y Zimmer, 2020), los seres vivos *no* están perfectamente adaptados; ni necesitan estarlo. Después de todo, ¿qué implicaría que un ser vivo se comportase como si fuera una máquina perfectamente adaptada a su medio ambiente? Si no existiesen limitaciones a lo que puede lograr la evolución por selección natural, los seres vivos perfectamente adaptados podrían reproducirse a una tasa infinita, serían totalmente inmunes a los ataques de los depredadores y los parásitos, no tendrían problemas para sobrevivir por siempre y mostrar una longevidad eterna, etcétera (Maynard Smith, 1978). Está claro que no existen tales seres vivos. Afirmar alegremente, como hacen muchos documentales de la naturaleza, que los seres vivos están perfectamente adaptados a su medio ambiente, es utilizar un lenguaje vacío de contenido. Por razones como esta, y medio en broma, medio en serio, invito

siempre a mis estudiantes de evolución a que eliminen la palabra “perfección” de su vocabulario.

IMPORTANCIA EVOLUTIVA DE LA IMPERFECCIÓN

En el siglo XIX, la aparente perfección de los diseños de los seres vivos había sido utilizada por la teología natural para inferir la existencia de un creador divino, omnipotente y generalmente benevolente (Ayala, 2007). No mucho después, Charles Darwin –sin negar la excelencia del diseño– propuso por primera vez una explicación muy diferente: la selección natural. En esencia, la selección natural permite entender la adaptación de los seres vivos a las condiciones ambientales locales; *i.e.*, aquí y ahora. Pero, en contra de lo que todavía parece ser una creencia generalizada, no propone ningún principio perfeccionador.

Esta misma idea la recogió Stephen Jay Gould ya en sus primeros ensayos. De forma magistral, Gould (1977, 1980, 1983) mostró que la evolución por selección natural no conduce a la perfección, y explicó por qué que no deberíamos buscar evidencias de que la evolución es un hecho en la supuesta perfección de las adaptaciones. En efecto, la perfección podría ser la consecuencia tanto de un creador divino como de un proceso “ciego” (*sensu* Dawkins, 1986) de selección natural. Además, la perfección no necesita tener historia: cuando la historia perfecciona, borra sus huellas. Se podría afirmar que la confianza de Darwin (y de Gould) en la selección natural no descansaba en los “órganos de extrema perfección y complejidad”, sino en las rarezas e imperfecciones que existen en tales diseños, y que revelan una historia, muchas veces curiosa, compleja y caprichosa. En resumen: la teoría de la evolución por selección natural encuentra en la imperfección el apoyo que no puede encontrar en la perfección.

Es lo que el propio Gould (1980) denominó “el principio del panda”, haciendo referencia a su ejemplo favorito: el del falso pulgar del oso panda gigante. Los pandas gigantes son descendientes herbívoros de ancestros carnívoros; la evolución de esta dieta, que actualmente se basa en los

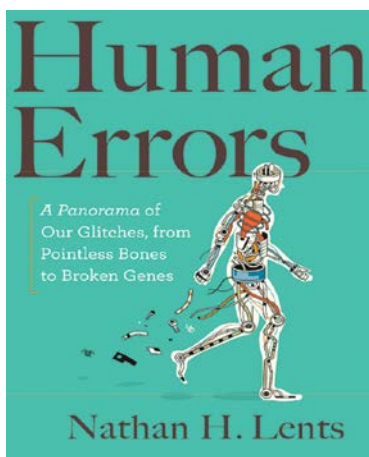


Figura 1. Portada. Lents NH (2018). *Human Errors. A Panorama of Our Glitches, from Pointless Bones to Broken Genes*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt.

bambúes, implicó cambios notables en los modos de vida de la especie, incluida su anatomía. En la actualidad, los osos panda presentan un rasgo anatómico en las muñecas de sus extremidades anteriores que parece ser un dedo adicional (i.e., un sexto dedo, o falso pulgar), pero que en realidad es un hueso sesamoideo¹ que ha sido modificado a lo largo de la evolución, lo que produce una estructura subóptima pero aun así funcional. De este modo, aunque es un “dedo” claramente imperfecto (de hecho, no es un verdadero dedo), el pulgar del panda le permite agarrar y manipular los tallos de bambú con notable destreza. Así pues, siguiendo a Gould (1983), podemos desvelar la historia del pasado, que incluye la evidencia del origen, gracias a las imperfecciones de los seres vivos, que son la marca de la evolución.

HOMO IMPERFECTUS

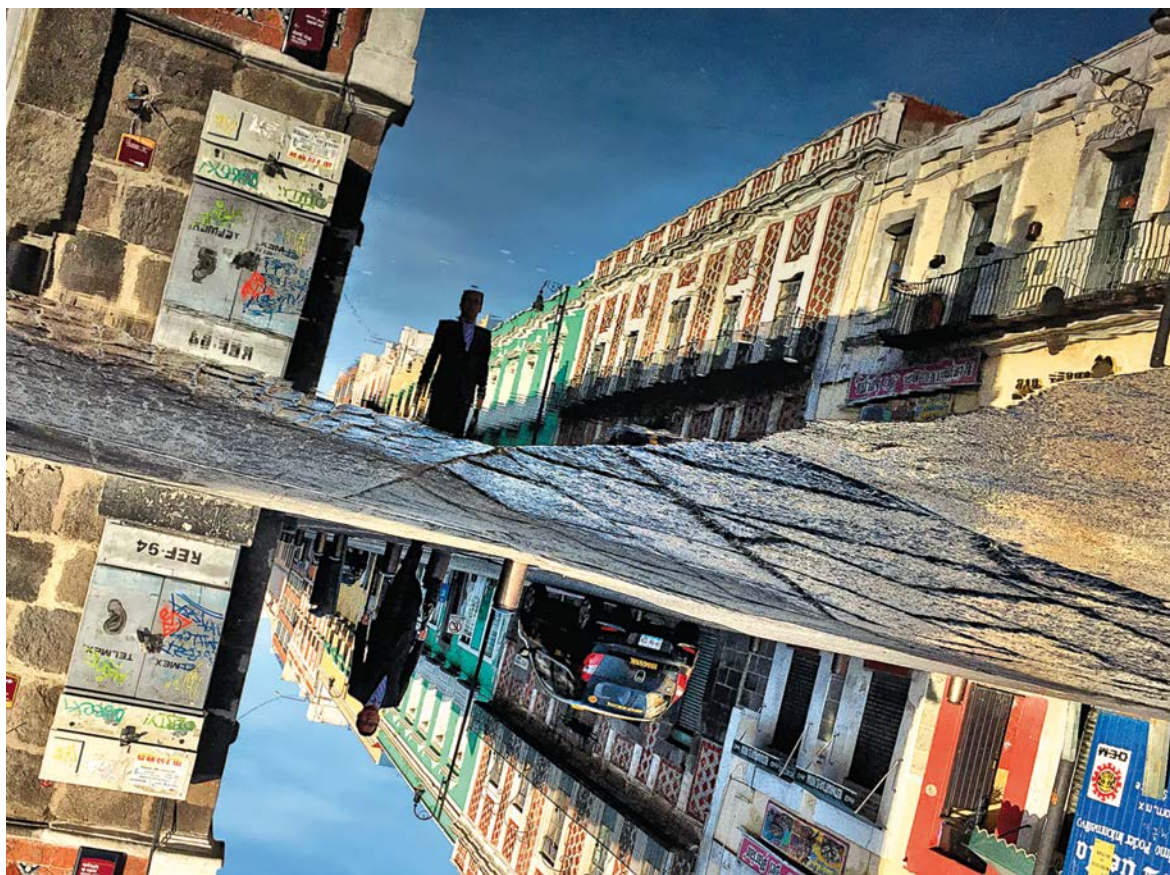
Nos guste o no, nuestra especie es igualmente imperfecta. En *Human errors* (Figura 1), un libro fácil de leer y escrito con sentido del humor,² Nathan Lents (2018) nos muestra un amplio panorama de nuestros muchos defectos, que nos alejan definitivamente de la condición perfecta que muchos de nosotros querríamos tener.

En la introducción, el autor se hace eco de la increíble belleza del cuerpo humano, así como de

la complejidad y grandeza de sus sistemas, órganos y tejidos, que resultan a todas luces maravillosas, casi milagrosas, y sobre las cuales podemos saber más consultando cualquiera de los miles de libros que encontraremos en la biblioteca de una buena facultad de medicina. El suyo no será un libro así, pues estará dedicado a mostrar nuestros muchos defectos, de cabo a rabo. Nuestros errores resultan tremendamente informativos y gracias a ellos podemos mirar a nuestro pasado y valorar el camino que hemos recorrido a lo largo de nuestra evolución. Cada célula, cada proteína, cada letra de nuestro DNA es el fruto de un largo proceso evolutivo que nos ha llevado a tener un cuerpo fantásticamente robusto, lleno de vigor, con capacidad de resistir los ataques de los elementos, y que ha resultado lo suficientemente exitoso como para llegar hasta el momento presente en el curso de la evolución. Un cuerpo, sin embargo, que no es perfecto.

Cualquier discusión sobre las limitaciones que la evolución impone en el cuerpo humano debe comenzar, dice el autor, por reconocer su belleza y capacidad. Pero, a partir de entonces, en seis capítulos, más un epílogo, hace un repaso por los múltiples errores que hacen de nosotros una especie imperfecta, plagada de disposiciones extrañas, diseños ineficientes y defectos manifiestos. Veamos tan solo tres de ellos.

1. *Estamos mal contruidos*. Mientras que la locomoción de otros primates utiliza sus cuatro extremidades, nosotros, los seres humanos, andamos (al menos, en nuestro estado adulto... y sobrio) sobre las extremidades posteriores: las piernas; es lo que se conoce con el nombre de bipedalidad (del latín *bipedalis*, de dos pies). A lo largo del tiempo, la evolución de la anatomía humana nos ha permitido mantener una postura bípeda, principalmente gracias a cambios en las piernas, la pelvis y la columna vertebral. Andamos y corremos razonablemente bien de este modo, erguidos. Tanto es así que, ingenuamente, podríamos esperar que la evolución hubiera perfeccionado la bipedalidad.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

No es así. El proceso de adaptación anatómica de los seres humanos a la postura erguida y la bipedalidad no ha terminado todavía. Los diversos fallos que Lents recoge en *Human errors* incluyen el pobre diseño del mesenterio, es decir, el tejido conjuntivo altamente vascularizado que une los órganos viscerales con las paredes abdominales. En contra de lo que podríamos esperar, nuestro mesenterio no está suspendido de la parte superior de la cavidad abdominal; en realidad, tal y como ocurre en los demás primates, nuestro mesenterio “pende” de la parte posterior de la misma. Esta disposición, que tiene pleno sentido en nuestros ancestros evolutivos (animales cuadrúpedos), puede acarrear lesiones en los seres humanos (bípedos) que llevan una vida sedentaria y permanecen sentados durante períodos de tiempo prolongados.

Los ejemplos de Lents incluyen, también, casos más graves, como el ligamento cruzado anterior (en adelante, LCA), que es el encargado de realizar la mayor parte del trabajo a la hora de permitir el movimiento de nuestras piernas en torno a las rodillas, y que tantas molestias acarrea a muchos deportistas que tienen que cambiar bruscamente de dirección o ejercer fuertes impulsos sobre sus rodillas.

Si no le exigimos demasiado al andar o correr en condiciones normales, el LCA hace bien su trabajo al mantener unidas la parte superior de la pierna con la parte inferior. Pero, cuando “forzamos la máquina” (i.e., cuando corremos velozmente y paramos de modo brusco, o giramos violentamente a gran velocidad, como ocurre con muchos futbolistas o tenistas), entonces el LCA puede no ser lo suficientemente fuerte como para mantener los huesos de las piernas, y puede romperse (i.e., desgarrarse) de forma parcial o total.

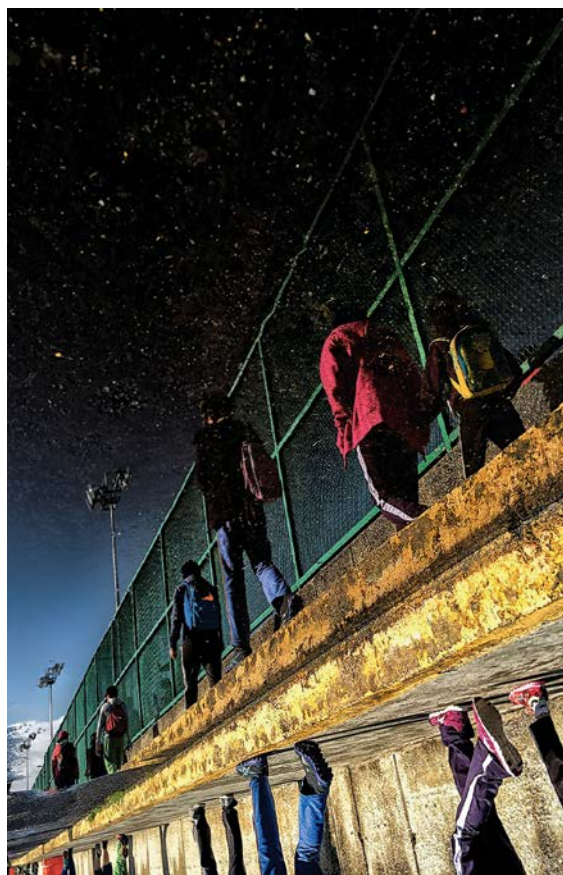
El LCA conecta los cóndilos del fémur con el área entre los cóndilos de la tibia, justo bajo la rótula, y resulta tan vulnerable precisamente como consecuencia de nuestra postura erguida sobre nuestras extremidades posteriores (las piernas). Aunque nuestros ancestros comenzaron a desplazarse en una postura erguida hace cerca de seis millones de años, resulta frustrante (pero no del todo sorprendente) que nuestra anatomía todavía no haya tenido tiempo suficiente como para completar esta adaptación.

2. *Una dieta imperfecta.* Más adelante, Lents analiza los fallos que encontramos en nuestra dieta y que (a diferencia de otras especies animales) nos hace depender de fuentes suplementarias de sales minerales, vitaminas y otros micronutrientes esenciales. Tanto es así que la nuestra tiene más necesidades alimenticias que la de la mayor parte de las especies que comparten el reino animal con nosotros. Nuestros cuerpos no pueden sintetizar muchos de los compuestos que otros animales sí, por lo que debemos incluirlos en la dieta.

La historia de cómo la evolución hizo que nuestros ancestros primates “se olvidasen” de producir vitamina C (*i.e.*, ácido ascórbico) resulta fascinante e ilustra una vez más nuestra naturaleza imperfecta. Aunque estamos equipados con todas las herramientas genéticas para sintetizar esta vitamina, uno de los genes necesarios (conocido como GULO) resulta en nosotros inservible, pues se ha convertido en un “fantasma evolutivo”, lo que en genética se conoce como un pseudogen.

Las mutaciones aleatorias en la secuencia de nucleótidos de este gen se fueron acumulando a lo largo del tiempo, e implicaron finalmente su pérdida de funcionalidad. Muy probablemente, estos fallos fueron tolerados por la evolución solo porque tuvieron lugar en un grupo animal que podía suplir la carencia de vitamina C gracias a una dieta rica en frutos en los que se encontraba en concentraciones elevadas.

No olvidemos que la vitamina C es necesaria, entre otras funciones, para la biosíntesis del colágeno, así como para el normal crecimiento del tejido óseo y la reparación de sus fracturas. Y no



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

olvidemos, tampoco, que su ausencia, y la de los alimentos frescos en los que se encuentra, acarrea el desarrollo de enfermedades como el escorbuto, y que la falta de vitamina D conduce al desarrollo de raquitismo (una enfermedad exclusivamente humana), y que desarrollaremos muchas otras enfermedades si nuestra dieta no incluye las cantidades necesarias de ciertos metales (como el cobalto, el cobre, el cromo, el zinc o el molibdeno).

3. *El emperador de todos los males.* Son muchos los fallos que Lents analiza en *Human errors* y, aunque algunos de nosotros nunca vayamos a sufrir de alergias, o de ataques al corazón, y nunca vayamos a mostrar síntomas de enfermedades autoinmunes, hay una “bestia” que nos acecha a todos: el emperador de todos los males (Mukherjee, 2010): el cáncer. Pues, como señala Lents, si vivimos lo suficiente (*i.e.*, si no morimos antes),



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

hay una probabilidad de prácticamente el 100 % de que tengamos cáncer.

El cáncer no es una enfermedad exclusiva de nuestra especie, pues (al menos en principio) todos los seres vivos multicelulares están expuestos al riesgo de sufrirlo. Así entonces, ¿por qué Lents incluye al cáncer en su libro sobre errores humanos? Sencillamente, porque el cáncer es, quizás, el mejor ejemplo de que la naturaleza es imperfecta, el resultado de un mal diseño; en este caso, la consecuencia inevitable del mal funcionamiento de los seres vivos multicelulares que se reproducen sexualmente. En la inmensa mayoría de los casos, el cáncer es un producto de nuestras células. Recordemos que, salvo excepciones, el cáncer se desarrolla cuando, como resultado de ciertas mutaciones, algunas células individuales no cumplen con sus propios “códigos de conducta” y comienzan a crecer, multiplicarse y proliferar fuera de control. Las células cancerosas muestran muchos

comportamientos “diabólicos”, casi superpoderosos (Gibbs, 2004).

En efecto, pueden crecer en ausencia de señales que se lo indiquen, y pueden crecer también a pesar de la existencia de señales que se lo impidan. Pueden evadir mecanismos autodestructivos codificados en programas genéticos de “suicidio celular” (*i.e.*, apoptosis), y pueden, además, estimular el crecimiento de vasos sanguíneos que les aporten nutrientes y oxígeno suficientes como para proliferar. Algunas células cancerosas son potencialmente inmortales, y tienen la capacidad de invadir otros tejidos y dispersarse a otros órganos de un mismo cuerpo, interfiriendo así con los sistemas de soporte vital. Podemos entender el curso de esta enfermedad gracias a la teoría de la evolución por selección natural actuando a nivel celular.

Si una de estas células mutantes crece y se divide a una tasa siquiera ligeramente superior a la de las demás células no mutantes, entonces su descendencia (su linaje celular, canceroso) dominará numéricamente a las demás.

En resumen: el cáncer es el resultado de sucesivos episodios de mutación, competencia y selección natural de unos linajes celulares frente a otros. Frecuentemente, este crecimiento canceroso se dispersa e invade otros tejidos, hasta que el cuerpo como un todo pierde su homeostasis y finalmente muere.

Como dice Lents, la triste ironía es que, en cierto sentido, el cáncer es un efecto secundario inevitable de la maquinaria de la vida. Todo lo que la evolución ha sido capaz de producir, incluidas las maravillas del cuerpo humano, se debe en última instancia a la mutación. Los errores aleatorios que se introducen en el genoma de los seres vivos acarrearán variedad genética y pueden suponer innovaciones evolutivas. Así pues, desde un punto de vista evolutivo, las mutaciones son la fuente última de la diversidad genética, y esta es la materia prima sobre la que puede actuar la selección natural. Si no hubiera sido por las mutaciones aleatorias, sin la capacidad de cometer errores en los procesos de copia de la información genética, la

vida sería hoy día tal y como fue miles de millones de años atrás. No existirían los velocísimos guepardos de la sabana del Serengeti, ni sus presas principales, las ágiles gacelas de Thomson, ni nosotros, los seres humanos... Pero, por otra parte, las mutaciones son, también, la causa del cáncer. El error está dentro del sistema, y es inevitable; en ese sentido, el cáncer es el error perfecto.

NOTAS

- ¹ Generalmente, los huesos sesamoideos son pequeños, redondeados y planos; se desarrollan en el interior de los tendones y están habitualmente sometidos a fuerzas de tensión y compresión.
- ² Por ejemplo, el texto se abre con lo que el autor presenta como un comentario de su madre tras enterarse de que él iba a escribir un libro sobre los fallos de nuestra especie: Now, there's a topic you know a lot about!

REFERENCIAS

- Ayala FJ (2007). Darwin's greatest discovery: Design without designer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (Suppl. 1): 8567-8573.
- Dawkins R (1986). *The Blind Watchmaker: Why the Evidence of Evolution Reveals a Universe Without Design*. New York: Norton.
- Emlen DJ, Zimmer C (2020). *Evolution. Making Sense of Life*. Third Edition. New York: Macmillan.
- Gibbs WW (2004). Untangling the roots of cancer. *The Science of Staying Young. Scientific American*, Special Edition: 60-69.
- Gould SJ (1977). *Ever since Darwin. Reflexions in Natural History*. New York: Norton.
- Gould SJ (1980). *The Panda's Thumb. More Reflexions in Natural History*. New York: Norton.
- Gould SJ (1983). *Hen's Teeth and Horse's Toes: Further Reflections in Natural History*. New York: Norton.
- Kardong KV (2009). *Vertebrates. Comparative Anatomy, Function, Evolution*. Sixth Edition. New York: McGraw-Hill.
- Maynard Smith J (1978). Optimization theory in evolution. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 9:31-56.
- Mukherjee S (2010). *The Emperor of all Maladies. A Biography of Cancer*. New York: Scribner.

José Antonio González Oreja
Facultad de Ciencias Biológicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México
jgonzorj@hotmail.com

© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.





© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

Retos del sector eólico en México

Eduardo **Martínez Mendoza**

El cambio climático es la alteración de las temperaturas en el planeta, resultado de causas naturales y por la actividad humana. La destrucción de los ecosistemas, el uso intensivo de combustibles fósiles y la extracción no responsable de los recursos naturales, son factores que han contribuido a acelerar el calentamiento del planeta que, al retener más calor del necesario, ha generado el cambio climático.

El cambio climático altera los ciclos naturales de la Tierra, provocando variaciones en el clima; los gases generados por el uso intensivo de los combustibles son una de las causas más relevantes para acelerar el calentamiento del planeta.

El cambio climático se ha convertido en un problema para todo el planeta; aunque sus efectos resultan visibles en la vida humana con temperaturas más elevadas, sequías, inundaciones, etc., sus efectos no se limitan a las personas; los sistemas biológicos (flora y fauna) y físicos (glaciares, erosión, nivel del mar, etc.) también son afectados por estos cambios.

El año 1995 es un punto referente para el combate al cambio climático, cuando iniciaron las negociaciones para que, dos años después, 86 países firmaran –y 46 ratificaran– el protocolo de Kyoto, donde se comprometieron a “limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de conformidad con las metas individuales acordadas” (Naciones Unidas, 2021). A partir de entonces, una de las medidas que cobró mayor relevancia fue el

impulso a las energías renovables, porque el sector energético es “fuente de las dos terceras partes de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero” (IEA, 2013).

Una de las fuentes de energía que logró un crecimiento acelerado fue la energía eólica, que a nivel mundial pasó de 7.5 GW (gigawatts) en 1997, a 743 GW en 2020 (GWEC, 2021). La energía generada a partir del viento es considerada una de las que produce menor daño ambiental, porque su tecnología no usa agua o combustibles en su funcionamiento, y porque los parques eólicos “necesitan una media de entre seis y ocho meses de funcionamiento para ‘devolver’ la energía utilizada para fabricarlos e instalarlos” (EolicCat, s.f.). Han existido numerosas protestas y críticas a nivel mundial respecto a su impacto en las aves, el ruido y el paisaje, principalmente. Respecto a las aves, se han cuantificado en 5.25 aves muertas por año en Estados Unidos; a nivel mundial de 0.2 a 40 aves por año. En el caso mexicano se cuantificaron 78 aves en un parque eólico de Oaxaca (Uribe-Rivera *et al.*, 2018).

En comparación, anualmente mueren 550 millones de aves por choques con edificios, 80 millones por colisiones con automóviles y 28,500 por turbinas eólicas (Wallace *et al.*, 2021), aunque otros estudios reportan entre 140,000 y 679,000 aves muertas, y entre 600,000 y 949,000 murciélagos, solo en Estados Unidos (Choi *et al.*, 2020). Esta discrepancia se debe a que aún es difícil cuantificarlas por la intervención de la flora y fauna locales, y son necesarios más estudios para lograr mayor precisión en las estimaciones.

En lo referente al ruido, la tecnología ha evolucionado y ha logrado que las turbinas generen niveles bajos, aunque las perturbaciones en las comunidades dependen en gran medida de la planeación, del diseño del parque eólico y de la selección del sitio de construcción. La discusión respecto al ruido se ha centrado en las afectaciones a los humanos, y es necesario ampliarla sobre sus efectos en la fauna local.



Imagen 1. Parques eólicos en el Istmo de Tehuantepec. Fuente: EJAAtlas, 2020.

El impacto paisajístico depende de la densidad de turbinas y está directamente relacionado con los procesos de planeación en las comunidades. La Imagen 1 muestra la densidad de turbinas eólicas en Oaxaca; aunque su apreciación tiene un componente de subjetividad, es necesario reflexionar respecto a la transparencia en los procesos de planeación con las comunidades y su relación con la flora y fauna; además, deben considerarse las prácticas culturales de los habitantes y otros elementos físicos, como los sitios sagrados y las alteraciones de las corrientes de agua por la creación de brechas, entre otros.

ENERGÍA EÓLICA EN MÉXICO

El primer parque eólico en México se instaló en 1994; pero, es a partir de 2006 cuando inicia su crecimiento significativo en capacidad instalada, principalmente en el Istmo de Tehuantepec. En 2020 el país alcanzó 6,681 MW de capacidad instalada acumulada. En México están instalados 3,172 aerogeneradores en 68 parques eólicos, que representan un ahorro anual de 12.2 millones de toneladas de CO₂ (emisiones de tres millones de autos) (AMDEE, 2021). Este sector ha acumulado 11.4 mil millones de dólares de inversión, aunque al importar todos los aerogeneradores instalados en los parques eólicos de México, los beneficios económicos del sector en el país se reducen significativamente, porque los aerogeneradores representan el 65 % de la inversión de un proyecto eólico (AMDEE, 2021).

Existen numerosos estudios que documentan los conflictos sociales que han ocurrido en el país por la instalación de los parques eólicos (Martínez-Mendoza *et al.*, 2021; Zárate-Toledo y Fraga, 2016). Aunque la legislación se ha ido adecuando, aún se requiere fortalecer la transparencia en los procesos de planeación y desarrollo de los proyectos eólicos, así como el seguimiento durante su operación.

Es un tema pendiente la aprobación de la NOM-151-Semarnat-2006, que establecería las especificaciones técnicas para la protección del medio ambiente durante la construcción, operación y abandono de instalaciones eoloelectricas en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, norma derogada en 2012 por considerarse que en México no existía información específica para sustentar la toma de decisiones (DOF, 2014).

La derrama económica en las comunidades donde se instalan parques eólicos, en la fase de construcción, es temporal y de bajo valor agregado; se da de manera permanente en los arrendadores de la tierra donde se instalan; aunque existen conflictos entre arrendatarios y empresas por la falta de cumplimiento en los plazos, pagos por afectaciones o por los montos bajos respecto a la media internacional (Chaca, 2019; Llaven Anzurez, 2019).

Otros beneficios locales son a través de los impuestos pagados a los municipios, especialmente antes de la construcción, aunque tampoco existe alguna metodología que guíe la estimación de los montos en la ley de ingresos municipal. Existen controversias respecto a las obras de carácter social que hacen las empresas en las comunidades (donaciones a escuelas, hospitales, bomberos, pavimentación de calles, etc.), porque hay sectores y líderes sociales que las consideran paliativos para tratar de ganar legitimidad ante las irregularidades cometidas en las comunidades.

Existen retos para mejorar la regulación que ayude a armonizar el desarrollo del sector eólico en México. Se requieren procesos que aseguren la transparencia en todas las fases del proyecto, desde su planeación hasta el término de su vida útil. Son necesarias estrategias para acompañar

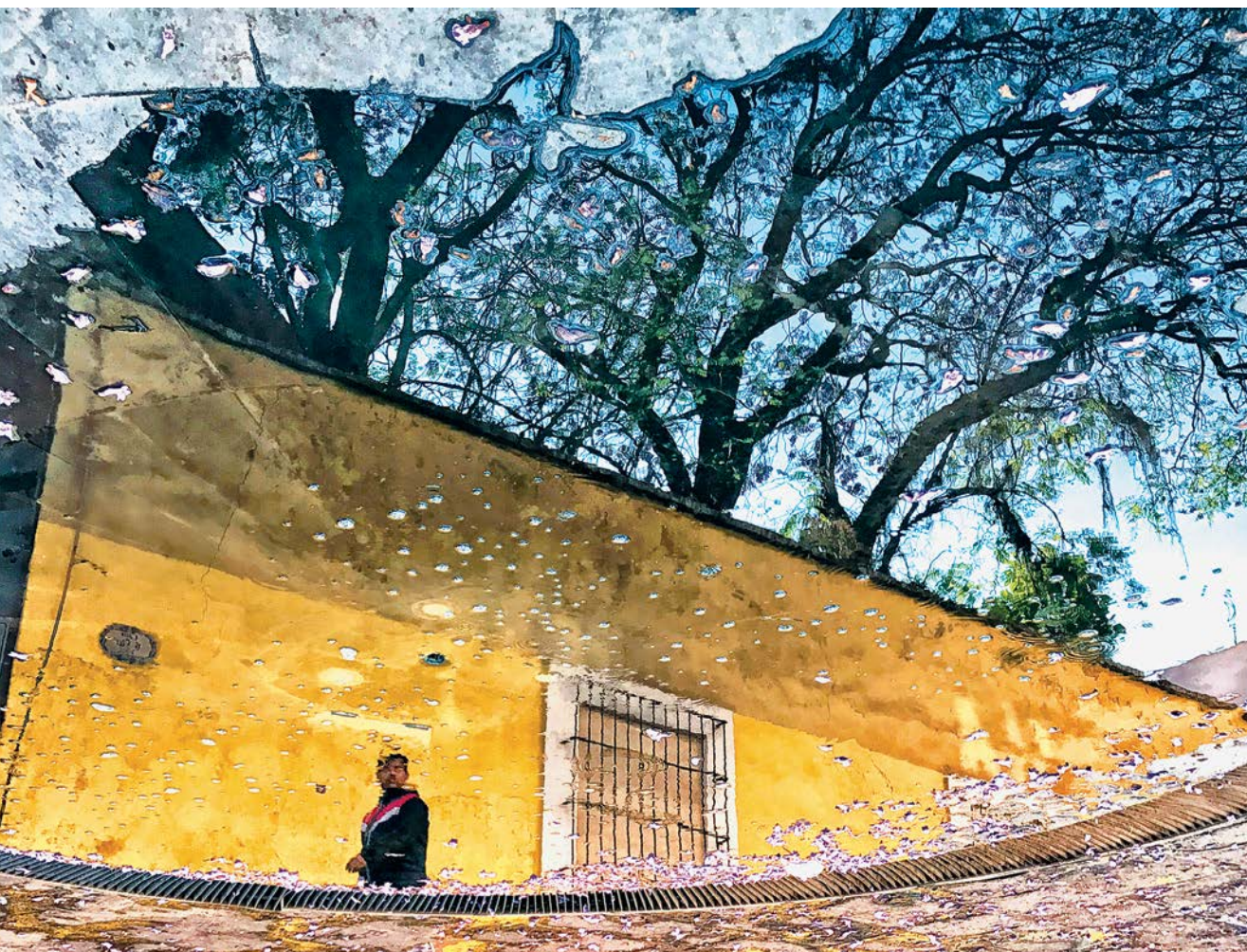
a las comunidades y los dueños de la tierra en los procesos de toma de decisiones. Las acciones de responsabilidad social de las empresas deben ser articuladas a través de estrategias de largo plazo con los sectores y gobiernos locales para el desarrollo de capacidades productivas y tecnológicas en la región.

CAPACIDADES EÓLICAS DE MÉXICO

México ha enfocado su política de desarrollo del sector eólico en la acumulación de capacidad instalada. Los principales logros presentados son en términos de capacidad instalada, inversión acumulada, empleo directo generado en las comunidades (especialmente en la fase de construcción), obras sociales de las empresas e ingresos municipales por impuestos y pagos de derechos. Sin embargo, en la agenda política el desarrollo de capacidades tecnológicas tiene poca relevancia.

Aunque México ha creado el Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica para fundar y fortalecer capacidades tecnológicas, donde se integran 32 organizaciones (instituciones de educación superior, centros de investigación, empresas y entidades gubernamentales), se requiere un marco institucional que incentive el desarrollo de estrategias de largo plazo para estimular la participación de las empresas del sector; y potenciar los esfuerzos de las empresas mexicanas que están haciendo desarrollo tecnológico eólico, como la empresa Potencia Industrial, que desde 1976 posee las primeras patentes de aerogeneradores mexicanos de baja potencia (Potencia Industrial, 2021). Por ahora, las empresas extranjeras que dominan el desarrollo eólico mexicano

[...] refieren que no ven posible que en el mediano plazo las capacidades tecnológicas que ellas acumulan en el exterior se difundan en México, en particular aquellas capacidades tecnológicas relacionadas con las actividades de I+D y de alta tecnología (Alvarado López, 2015, p.325).



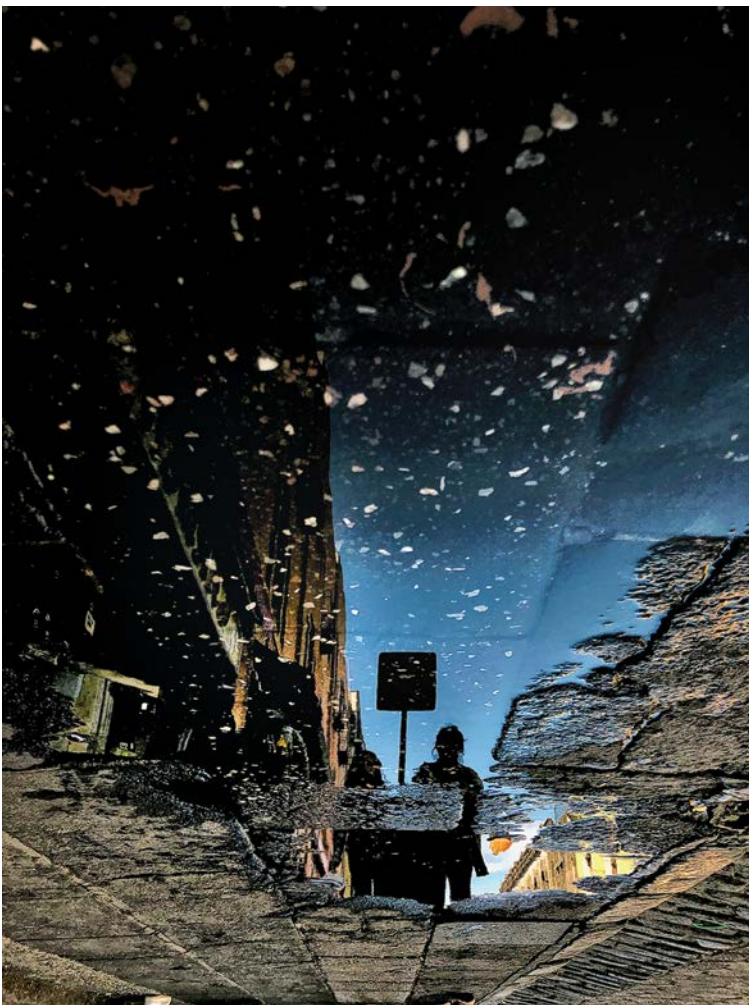
© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

Su modelo de negocio en México se orienta hacia la capacidad instalada. El fomento de capacidades tecnológicas nacionales es fundamental para el aprovechamiento de los beneficios de la cadena de valor eólica, porque su tecnología representa más de la mitad de la inversión de un proyecto eólico y se desagrega en más de cien actividades económicas.

Por otro lado, es necesario no centrar la atención solo en la instalación de parques eólicos de gran tamaño. Existen oportunidades para la creación de nuevas empresas a través de los aerogeneradores de pequeña potencia y la generación distribuida, empresas que podrían crearse como

fruto de la creación de capacidades tecnológicas en las universidades, la vinculación entre ellas y con el gobierno y el sector empresarial.

Otro reto en los siguientes años será adecuar la legislación para el manejo de los equipos que culminen su vida útil. En los parques eólicos de gran potencia es un tema con mayor control debido al limitado número de empresas que participan y a las certificaciones que son requeridas con sus proveedores y por los organismos internacionales; sin embargo, la adopción social de los aerogeneradores de baja potencia implicará un reto mayor debido a la dispersión de los equipos a lo largo del territorio nacional, a la diversidad de actores inmersos, y al sistema de recolección y manejo de residuos.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

Es un tema relevante para evitar que este tipo de equipos, debido a su mal manejo, generen contaminación ambiental al término de su vida útil. Es necesario prever un enfoque de economía circular en las siguientes décadas.

REFERENCIAS

- Alvarado López R (2015). Capacidades tecnológicas del sector eólico en México: análisis y perspectivas. Tesis doctoral. Ciudad de México, México: UNAM.
- AMDEE (2021). Asociación Mexicana de Energía Eólica. Recuperado de: <https://amdee.org/preguntas-frecuentes.html#>.
- AMDEE (marzo de 2021). Asociación Mexicana de Energía Eólica. Recuperado de: <https://amdee.org/el-viento-en-numeros.html>.
- Chaca R (10 de junio de 2019). Bloquean en Oaxaca accesos al parque eólico más grande de AL. El Universal. Recuperado de <https://>

www.eluniversal.com.mx/estados/bloquean-en-oaxaca-accesos-al-parque-eolico-mas-grande-de-al.

Choi D, Witting T, and Kluever B (2020). An evaluation of bird and bat mortality at wind turbines in the Northeastern United States. *PLoS ONE* 15(8):1-22. doi:doi.org/10.1371/journal.pone.0238034.

DOF (19 de febrero de 2014). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5333155&fecha=19/02/2014.

EJAtlas (09 de diciembre de 2020). Corredor Eólico en el Istmo de Tehuantepec. Recuperado de: <https://ejatlas.org/conflict/corredor-eolico-en-el-istmo-de-tehuantepec-oaxaca>.

EolicCat (s.f.). Asociación Eólica de Catalunya. Recuperado de: <http://eoliccat.net/que-es-eoliccat/?lang=es>.

GWEC (2021). Global Wind Energy Council. Recuperado de: <https://gwec.net/windsights/>.

IEA (2013). World Energy Outlook 2013. Paris: IRENA. Recuperado de: https://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2013_weo-2013-en.

Llaven Anzures Y (23 de abril de 2019). Paga Iberdrola 3 pesos anuales por metro a ejidatarios por instalación de Parque Eólico Chapulco. *La Jornada de Oriente*. Recuperado de: <https://www.la-jornadadeoriente.com.mx/puebla/ejidatarios-chapulco-iberdrola/>.

Martínez-Mendoza E, Rivas-Tovar L and García-Santamaría L (2021). Wind energy in the Isthmus of Tehuantepec: conflicts and social implications. *Environment, Development and Sustainability*. doi:10.1007/s10668-020-01136-8.

Naciones Unidas (2021). United Nations Climate Change. Recuperado de: https://unfccc.int/es/kyoto_protocol.

Potencia Industrial (2021). Turbina eólica Colibrí. Recuperado de: <https://www.potenciaindustrial.com.mx/es/productos/turbina-eolica-colibri.html>.

Uribe-Rivera M, Guevara-Carrizales A y Ruiz-Campos G (2018). Mortalidad incidental de aves paseriformes en un parque eólico del noroeste de México. *Huitzil, Revista Mexicana de Ornitología*, 20(1):1-7. doi:doi.org/10.28947/hrmo.2019.20.1.377.

Wallace P, Erickson W, Johnson G and Young Jr. D (2005). A Summary and Comparison of Bird Mortality from Anthropogenic Causes with an Emphasis on Collisions. *USDA Forest Service General Technical Reports* 1029-1042.

Zárate-Toledo E y Fraga J (2016). La política eólica mexicana: Controversias sociales y ambientales debido a su implantación territorial. Estudios de caso en Oaxaca y Yucatán. *Tracce* 69:65-95.

Eduardo Martínez Mendoza
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec
ed_mtz@hotmail.com

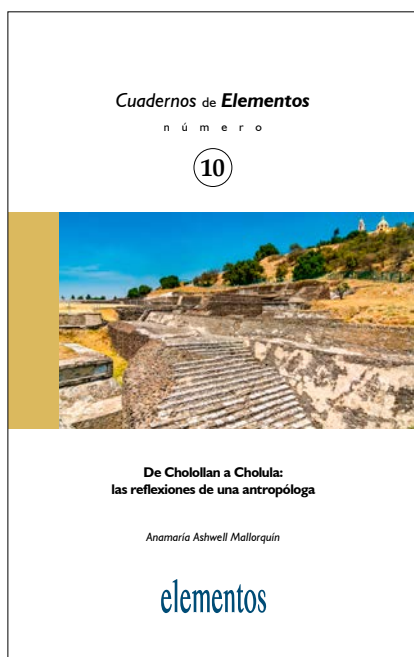


© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.

Cuadernos de *Elementos* número 10 De Cholollan a Cholula: las reflexiones de una antropóloga

Anamaría **Ashwell Mallorquín**

Lee Cuadernos de *Elementos* No. 10 en:
<https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000006026.pdf>.



Desde tiempos coloniales las élites políticas-económicas de lo que hoy son San Pedro y San Andrés Cholula se abocaron no solo a disputar, sino a delimitar fronteras municipales porque implicaba, sobre todo, la asignación fiscal de los habitantes a cada municipio. Sin embargo, desde los barrios tradicionales (incluyendo pueblos de otros municipios) el antiguo altepetl Cholollan mesoamericano continuó colectiva y religiosamente reuniéndose, peregrinando y tributando, en la gran pirámide, aunque desde el siglo XVI en devoción de Nuestra Señora de los Remedios. Es más, la orden franciscana, desde el siglo XVII, dejó como atributo de los cargos en los diez barrios actuales de San Pedro Cholula (específicamente al Circular de la Virgen de los Remedios) la custodia del santuario sobre la gran pirámide –y la organización de sus rituales–, aunque la delimitación municipal asignó casi la totalidad del área ceremonial mesoamericana en torno la gran pirámide (y así el santuario) a la jurisdicción municipal de San Andrés Cholula. La antropóloga Anamaría Ashwell demuestra cómo nada o poco de la investigación académica influyó e influye al momento de cuestionar las reconstrucciones populares sobre el pasado mesoamericano de los habitantes de las Cholulas, y menos aún incide en las historias “oficiales” que los ayuntamientos exponen, editan y promueven con fines de promoción turística en sus entidades geopolíticas.



© Carlos Mario Delacruz. De la serie *El espejo onírico*.



