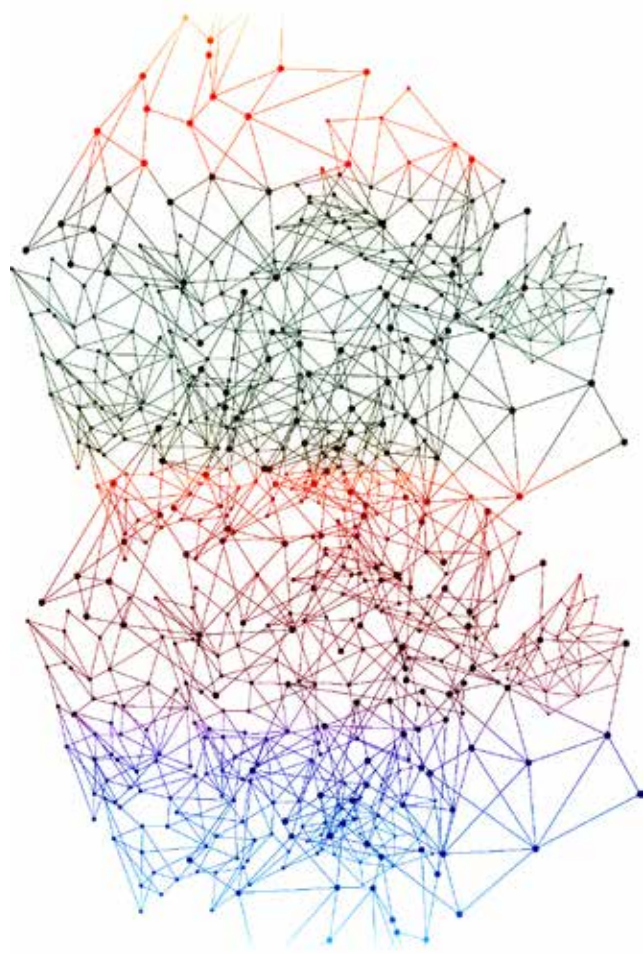


NORBERT WIENER Y EL ORIGEN DE LA CIBERNÉTICA

Norbert Wiener: de la gloria al olvido Carlos A. Coello Coello	12
Retroalimentación y sincronía en procesos Cristina Verde Rodarte	26
La danza incesante de las moléculas Gerónimo Uribe Bravo	36
La mente en la máquina José Galaviz Casas	42
De la cibernética a la nueva ciencia cognitiva Tom Froese	52



Mensaje del presidente de la AMC

Jaime Urrutia Fucugauchi

3

Desde el Comité Editorial

Miguel Pérez de la Mora

5

Presentación

Norbert Wiener y el origen de la cibernética

Sergio Rajsbaum

Eduardo Morales

6

Comunicaciones libres

Historia del determinante

José de Jesús Medel Juárez

Consuelo Varinia García Mendoza

60

Compuestos contaminantes de la atmósfera:
¿cuáles son sus efectos? y, sobre todo,
¿cómo eliminarlos?

68

Rodolfo Palomo Briones

Emilia Ríos del Toro

Luis Fernando Calderón Soto

Ángela Patricia Bravo Vidales

Cintia Noemí Gómez Muñoz

Edén Ocegüera Contreras

Lo nuestro

La plaza de Santo Domingo en el siglo XVI

Martha Fernández

76

Correspondencia

Nota aclaratoria al artículo "Uso de los medios electrónicos y la enseñanza del derecho"

86

Loretta Ortiz Ahlf

Noticias y comentarios

Noticias de la AMC

88



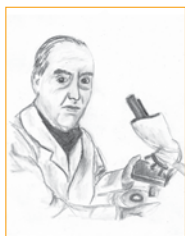
Portada a partir de imágenes de Jupiter Images.



Separador:
Ana Viniegra



Separador:
Ana Viniegra



Separador:
Ximena Molinero



Contraportada:
Ximena Molinero

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Miguel Pérez de la Mora

Comité editorial

Raúl Ávila
Beatriz Barba Ahuatzin
Luis Benítez Bribiesca
Ana Cecilia Noguez G.
Raymundo Cea
Deborah Dultzin
Alfredo Feria Velasco
Alonso Fernández Guasti
Ronald Ferrera
Alfonso N. García Aldrete
Adolfo Guzmán
Juan Pedro Laclette San Román
Román Piña Chan †
Carlos Prieto de Castro
Sergio Sánchez Esquivel
Alicia Ziccardi

Coordinadora editorial

Martha Lorena Soria Licona

Editora

Rosanela Álvarez

Revisor de estilo

Paula Buzo

Diseño y formación

Quinta del Agua Ediciones, S.A. de C.V.

Ilustradores

Ana Viniegra, pp. 12-13, 36-37, 38, 52-53, 54, 59, 68-69, 73, 75, 76-77
Enrique Martínez de la Rosa, pp. 26-27, 31, 32, 45, 46, 62, 64, 68

Preprensa e impresión

Tipos Futura, S.A. de C.V.

Academia Mexicana de Ciencias

Casa Talpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca
Col. San Andrés Totoltepec, México 14400, D.F.
tel.: 5849 4903, fax: 5849 5108
www.revistaciencia.amc.edu.mx



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
CONACYT DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

ciencia, publicación trimestral de la Academia Mexicana de Ciencias, A. C. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Academia Mexicana de Ciencias. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa de la Academia Mexicana de Ciencias. Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo del título 04-2001-072510183000-102 expedido el 25 de julio de 2001 por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Certificado de Licitud de Título 9971 y Certificado de Licitud de Contenido 6971 expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones de Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1405-6550. Formación: Quinta del Agua Ediciones, S.A. de C.V., tel.: 55 75 58 46. Impresión: Tipos Futura, S. A. de C. V., Yucatán 9-B, Col. Héroes de Padierna, México, D. F., 10700. Tel.: 55 68 50 65. Tiraje 7 500 ejemplares. Correspondencia: Academia Mexicana de Ciencias, A. C., atención: Revista Ciencia, Casa Talpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Col. San Andrés Totoltepec, México 14400, D. F., tel.: 58 49 49 03, fax: 58 49 51 08, rciencia@unam.mx, <http://www.amc.mx>.

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

NORBERT WIENER y el origen de la cibernética

Norbert Wiener:
de la gloria al olvido

De la cibernética
a la nueva ciencia
cognitiva

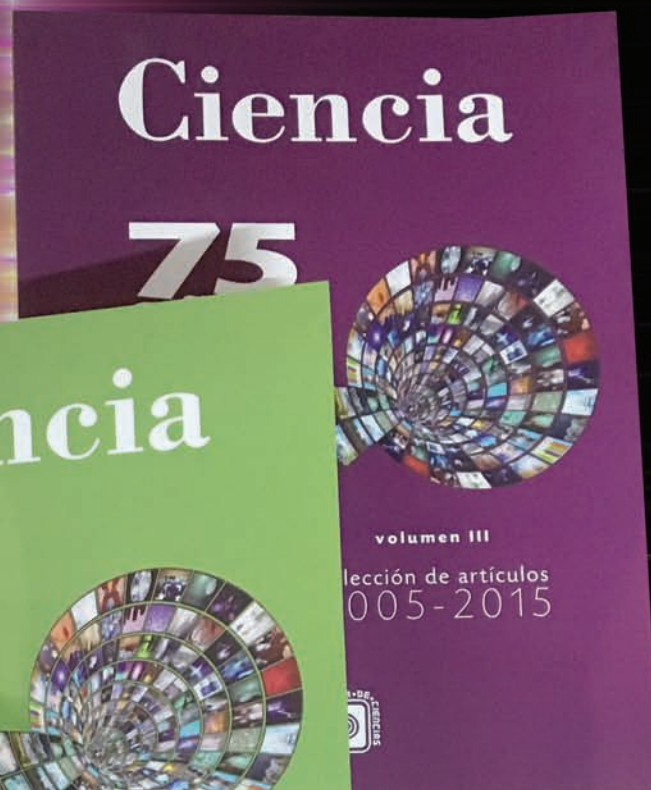
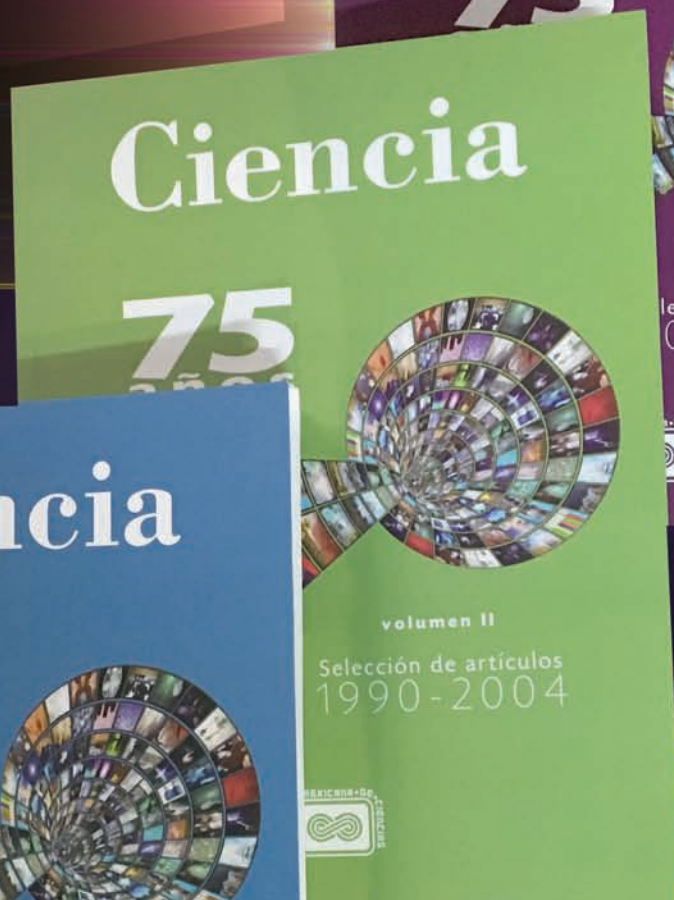
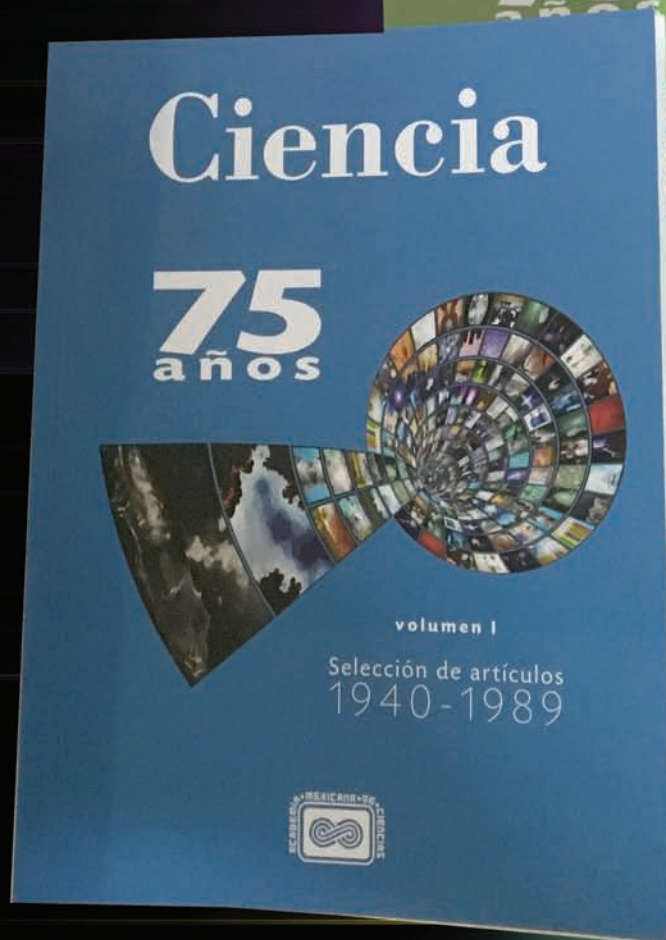
La mente
en la máquina

La Plaza de
Santo Domingo

\$40.00 MN
ISSN 1405-6550

www.revistaciencia.amc.edu.mx





¿cómoves?

Revista de divulgación de la ciencia • UNAM

Suscríbete

12 números

\$300.00

Incluye gastos de envío*



Informes:

Guadalupe Fragoso

(55) 5622 7297

gfragoso@dgdc.unam.mx

- **México:** \$250.00 m.n. + \$50.00* m.n. por gastos de envío por correo ordinario del Servicio Postal Mexicano (SEPOMEX); por correo certificado \$540.00 m.n.
- **Otros países:** Norte y Sudamérica USD \$60; Europa €48.

Solicita la ficha de depósito al correo:

suscribete_comoves@dgdc.unam.mx

1

2

3

Haz el pago correspondiente en Bancomer.

Envía el comprobante de pago y tus datos (nombre y domicilio completo) a **suscribete_comoves@dgdc.unam.mx** (si requieres factura envía tu cédula fiscal).

También puedes suscribirte en la taquilla de Universum, Museo de las Ciencias.



DGDCUNAM
Divulgación de la Ciencia

unam
donde se construye el
futuro



CONSEJO DIRECTIVO JUNIO 2014-JUNIO 2017

Presidente

Jaime Urrutia Fucugauchi

Vicepresidente

José Luis Morán López

Tesorera

Georgina Hernández Delgado

Secretarios

Erika Pani Bano

William Lee Alardín

Presidentes de las

Secciones Regionales de la AMC

Sección Centro: Ricardo Femat Flores

Sección Noreste: Sergio Mejía Rosales

Sección Noroeste: Saúl Álvarez Borrego

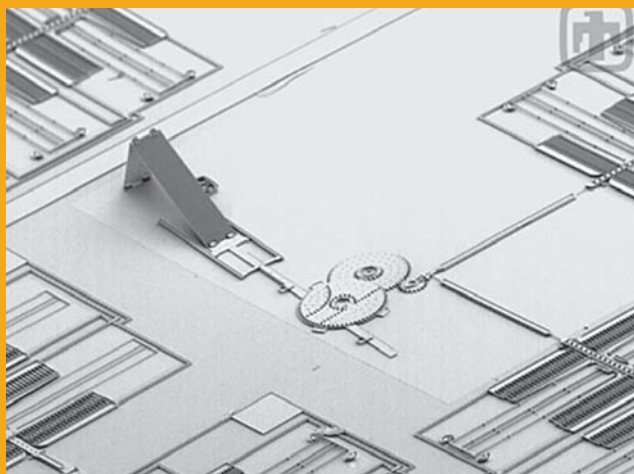
Sección Sureste I: Romeo de Coss Gómez

Sección Sureste II: Margarita Martínez Gómez



En nuestro próximo número
abril-junio de 2016:

COMUNICACIONES LIBRES





El lado **bueno** de la **grasa**: sus **células troncales**

Las células troncales mesenquimales derivadas del tejido adiposo tienen varias ventajas prácticas en la medicina clínica. En diversos estudios se han utilizado para reparar o regenerar músculo, grasa, hueso, cartílago y tejido nervioso. Como el proceso para su obtención es más sencillo (lipoaspiración), su uso a futuro es promisorio, siempre y cuando se cumplan los criterios establecidos para la obtención, el almacenaje y trasplante de las células troncales o células madre.

La aplicación de las células troncales mesenquimales (CTM) del tejido adiposo es una de las temáticas más relevantes de la medicina actual, como en su momento fueron la transfusión sanguínea y el trasplante de médula ósea, que actualmente son opciones terapéuticas usuales y de reconocida valía. La medicina regenerativa se fundamenta en la utilización de células troncales con el propósito de rehabilitar los órganos afectados. Su aplicación se basa en que este tipo de células tiene diferentes capacidades o potencialidades; es decir, pueden originar a células especializadas con funciones específicas o diferentes variedades de células. Por su origen, las células troncales pueden ser embrionarias (se obtienen del embrión en su etapa de blastocisto) o adultas. Estas últimas tienen muchas ventajas sobre las embrionarias, ya que son fáciles de obtener y no ocasionan rechazo inmunológico, no existen restricciones éticas ni legales y no se ha identificado que originen tumores malignos. Sin embargo, las células troncales adultas son más difíciles de manipular genéticamente, comparadas con la embrionarias.

Las CTM del tipo adultas y multipotentes se caracterizan por tener su origen en el tejido conectivo embrionario, o mesénquima, que es el tejido encargado de dar sostén al organismo. Asimismo, tienen la capacidad para originar diferentes tipos de células y tejidos, como el músculo cardíaco (Choy *et al.*, 2010), cartílago, hueso y grasa, entre otros; este mecanismo se conoce como versatilidad o transdiferenciación (Bajada *et al.*, 2008).

Inicialmente se consideraba que las CTM se encontraban de manera exclusiva en la médula ósea, sitio donde se producen las células de la sangre (hematopoyesis). Sin embargo, en la actualidad se sabe que también se encuentran en el hígado, páncreas, bazo, líquido amniótico, sangrado menstrual, hueso, músculo esquelético, pulpa dental, testículos, pulmón, sangre periférica, piel y grasa (Eslaminejad y Jahangir, 2012; Zhang *et al.*, 2012). Como el proceso para su obtención es más sencillo en la grasa (lipoaspiración), en comparación con las otras localizaciones, las zonas corporales con grasa se han convertido en la fuente principal de las CTM. Por otra parte, estas células evitan la producción de mediadores químicos o citosinas, por lo que su aplicación no desencadena una respuesta inmune de rechazo. Además, tienen la capacidad de migrar al sitio afectado cuando son administradas vía intravenosa, entre otras ventajas (véase la Tabla 1).

Grasa o tejido adiposo

A la grasa se le considera como un tipo de tejido conectivo especializado proveniente del mesénquima, y su principal función es la reserva de energía del cuerpo. En el ser humano existen dos tipos de grasa: la grasa blanca y la grasa parda (Figura 1). Anteriormente se consideraba que la grasa parda se encontraba exclusivamente en el recién nacido; sin embargo, en la actualidad se sabe que también está presente en el adulto (Bakker, 2014). Sus principales células son los adipocitos –las únicas células especializadas en el almacenamiento de grasas en su citoplasma sin que se afecte su integridad funcional– y las CTM.

Tabla 1. Ventajas del uso de las células troncales de la grasa.

- Tiene la capacidad de originar diferentes tejidos.
- Impide su rechazo, por su capacidad inmunomoduladora.
- Evita la muerte celular.
- Función de apoyo para estimular la proliferación y diferenciación celular.
- Estimula la formación de vasos sanguíneos (angiogénesis).
- Propiedad de migrar vía sanguínea al sitio dañado.
- Favorece los efectos anticicatrizantes para estimular la regeneración de tejidos.
- Fáciles de obtener y de procesar, a bajo costo.
- Podrían ser donadas.

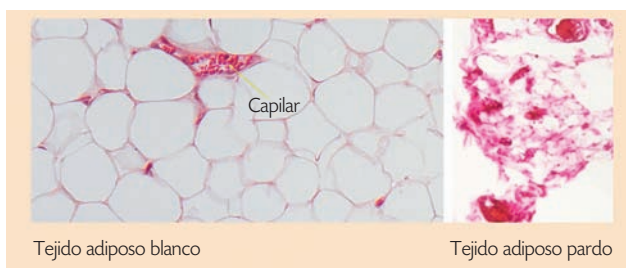


Figura 1. Los dos tipos de grasa. Tinción con hematoxilina y eosina.

Células troncales de la grasa

Para que una célula troncal pueda tener aplicaciones regenerativas en medicina, se deben cumplir criterios específicos como: que se encuentren en grandes cantidades; que se puedan aislar del cuerpo con un procedimiento mínimamente invasivo; que puedan originar a diferentes tipos de células de una manera regulable y reproducible; que se pueda hacer el trasplante sin complicaciones; y un aspecto de fundamental importancia es respetar las leyes y normas para la obtención, el almacenaje y trasplante de las células troncales adultas. Las CTM obtenidas de la grasa humana cumplen con los criterios anteriores; además, por su naturaleza mesenquimatosas, son capaces de diferenciarse en hueso, cartílago, grasa, tejido nervioso y músculo (Figura 2) (Baer, 2011).

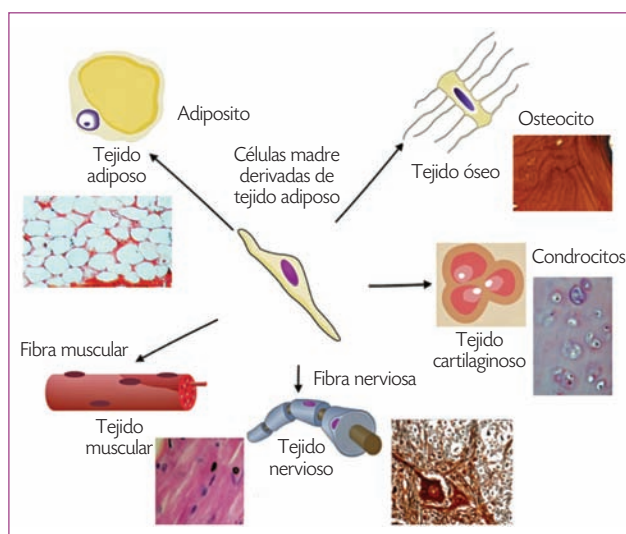


Figura 2. Representación de la diversificación de las células troncales de la grasa en diferentes tejidos: músculo (Choy *et al.*, 2010); grasa, hueso y cartílago (Baer, 2011); tejido nervioso (Chang *et al.*, 2014).



Usos clínicos potenciales de las células troncales de la grasa

Existen varios estudios y ensayos clínicos que han utilizado CTM derivadas de tejido adiposo. Entre ellos destacan los estudios donde se ha demostrado su capacidad para reparar el cartílago dañado (Mizuno, 2010). Asimismo, se ha demostrado que estas células pueden no sólo reparar, sino generar cartílago, con lo cual su uso potencial en varios padecimientos que comprometen al cartílago –como en la artritis– es una posibilidad real (González *et al.*, 2009).

Además, se ha identificado que las CTM del tejido adiposo pueden sobrevivir en el sistema nervioso después de ser inyectadas y promover la recuperación de nervios tanto por diferenciación directa como por secreción de numerosos factores de crecimiento. Por lo tanto, el uso de este tipo de células es promisorio para el tratamiento de lesiones del sistema nervioso central y nervios periféricos, como la enfermedad de Parkinson y el Alzheimer (Kim *et al.*, 2012; Chang *et al.*, 2014). Asimismo, se han realizado investigaciones con este tipo de células para favorecer la revascularización causada por isquemia de las arterias coronarias, la regeneración cardiovascular, la reparación ósea, para el aumento de la contractibilidad muscular esquelética y en la reconstrucción mamaria; todos con resultados prometedores (véase la Tabla 2).

Donación de grasa

En nuestro país existe un grave problema de obesidad, por lo que hay una gran cantidad de personas con acúmulos subcutáneos de grasa. Esta situación podría ser aprovechada para la obtención de CTM de tejido adiposo, ya que el proceso de lipoaspiración es muy



simple y los cirujanos plásticos lo pueden realizar con anestesia local, para obtener una cantidad pequeña de grasa –aproximadamente de 1 a 5 ml– y procesarla, a bajo costo. Es decir que se pueden obtener las CTM con la finalidad de procesarlas, cultivarlas e inducir las de manera específica para su diferenciación en el tipo de células que se necesiten, y después pueden ser conservadas y utilizadas. Se ha determinado que de un gramo de grasa se pueden adquirir 5×10^3 CTM. Sin embargo, se debe considerar que el procedimiento de lipoaspiración de la grasa debe tener la autorización del donador por consentimiento informado y ajustarse a la normativa vigente para el almacenamiento, y que su aplicación clínica requiere de autorización de un Comité de Bioética y de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris).

Conclusión

Las CTM derivadas de la grasa tienen ventajas prácticas en la medicina clínica y su uso es más realista porque el tejido adiposo –la principal fuente de éstas células– es abundante y fácil de obtener. Sin embargo, se requieren más estudios preclínicos y clínicos para determinar si las terapias basadas en células madre derivadas de la grasa podrían ser utilizadas con éxito para el tratamiento de enfermedades para las cuales las terapias médicas o quirúrgicas son ineficaces.

Tabla 2. Aplicaciones clínicas de las células troncales de la grasa.

- Reparación de defectos óseos importantes del cráneo.
- Aplicación tras infarto crónico de miocardio.
- Reconstrucción de la glándula mamaria.
- Reconstrucción de defectos postraumáticos de cara y cuerpo.
- Rehabilitación de nervios periféricos.
- Tratamiento de la osteoartritis.

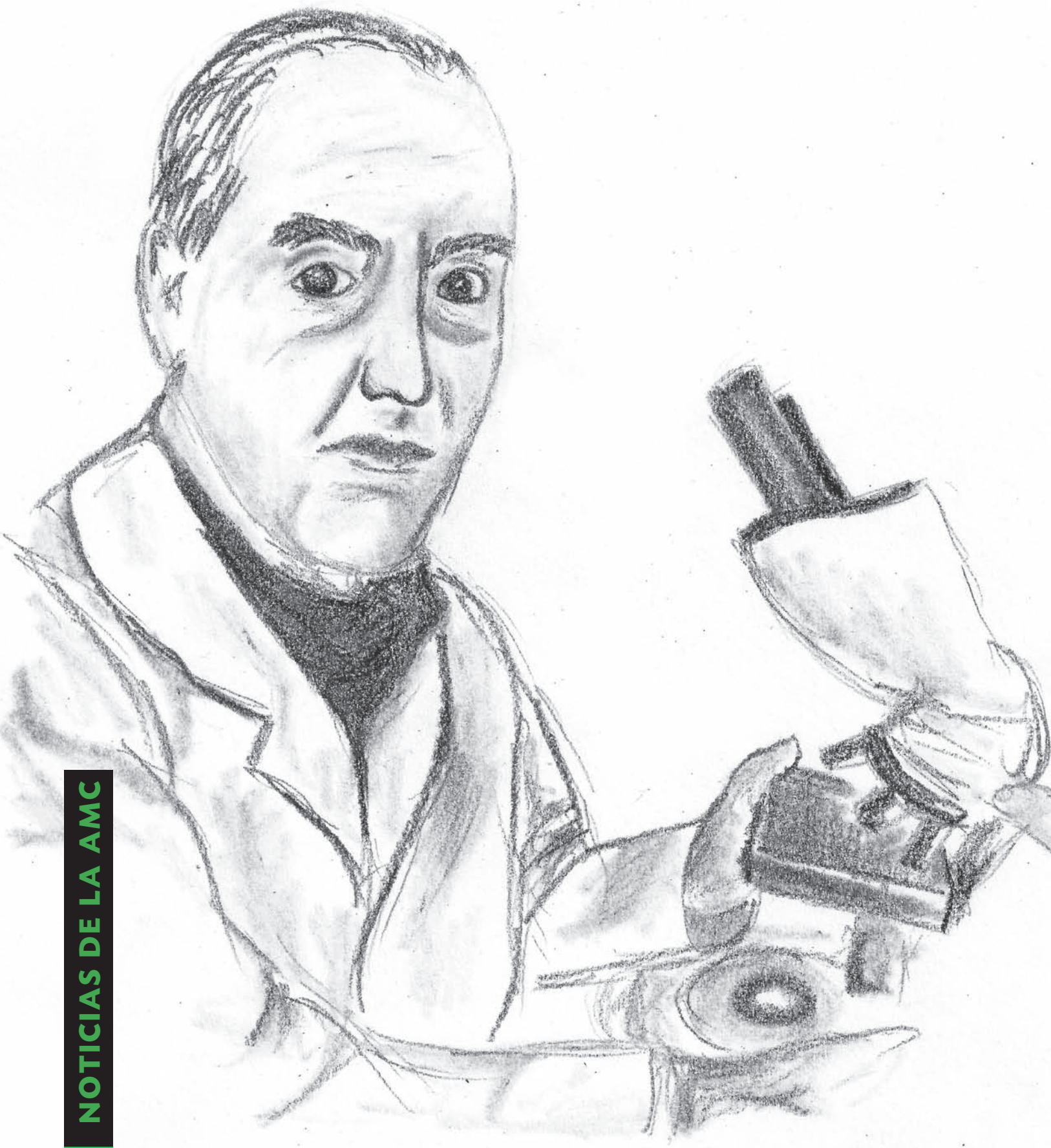
Guillermo H. Martínez Delgado es estudiante de Médico Cirujano Partero y colaborador del Laboratorio de Ingeniería Tisular y Medicina Regenerativa de la Universidad de Monterrey.
guillermo.martinez@udem.edu

Ma. Guadalupe Treviño Alanís es médico cirujano partero por la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL); maestra en Ciencias de la Educación por la Universidad de Monterrey (UEM), y en Ciencias Morfológicas por la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). Cuenta con un doctorado en Medicina por la UANL, y uno en Ciencias por la UAA. Es Médico Certificado por el Colegio de Médicos y Profesor Certificado por la UDEM, donde colabora en el Laboratorio de Ingeniería Tisular y Medicina Regenerativa.
ma.trevino@udem.edu

Gerardo Rivera Silva es médico por la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, y pediatra por el Centro Médico Nacional Siglo XXI. Cursó un diplomado en Biología Molecular en el Instituto Pasteur de París; realizó el doctorado en Morfología y Neurociencias en la Universidad de Salamanca, España, y el posdoctorado en Biotecnología en la Universidad Laval de Quebec, Canadá. Fue científico invitado en el Institute for BioNanotechnology in Medicine de la Universidad de Northwestern, en Chicago, EUA. Colabora en el Laboratorio de Ingeniería Tisular y Medicina Regenerativa de la Universidad de Monterrey.
gerardo.rivera@udem.edu

Lecturas recomendadas

- Baer, P. (2011), "Adipose-derived stem cells and their potential to differentiate into the epithelial lineage", *Stem Cells Development*, 20(10):1805-1816.
- Bajada S., I. Mazakova, J. B. Richardson y N. Ashammakhi (2008), "Updates on stem cells and their applications in regenerative medicine", *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 2(4):169-183.
- Bakker, L. E. H. et al. (2014), "Brown adipose tissue volume in healthy lean south asian adults compared with white caucasians: a prospective, case-controlled observational study", *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 2(3):210-217.
- Chang, K. A., J. H. Lee y Y. H. Su (2014), "Therapeutic potential of human adipose-derived stem cells in neurological disorders", *Journal of Pharmacological Sciences*, 126(4):293-301.
- Choy, Y. S., K. Matsuda, G. J. Dusting, W. A., Morrison y R. J. Dilley (2010), "Engineering cardiac tissue in-vivo from human adipose-derived stem cells", *Biomaterials*, 31(8):2236-2242.
- Eslaminejad, M. B. y S. Jahangir (2012), "Amniotic fluid stem cells, their application in cell-based tissue regeneration", *International Journal of Fertility & Sterility*, 6(3):147-156.
- González, M. A., E. González-Rey, L. Rico, D. Buscher y M. Delgado (2009), "Treatment of experimental arthritis by inducing immune tolerance with human adipose-derived mesenchymal stem cells", *Arthritis & Rheumatology*, 60(4):1006-1019.
- Kim, S., K. A. Chang, J. A. Kim, H. G. Park, J. C. Ra, H. S. Kim y Y. H. Suh (2012), "The preventive and therapeutic effects of intravenous human adipose-derived stem cells in Alzheimer disease mice", *Plos One*, 7(9):e45757.
- Mizuno, H. (2010), "Adipose-derived stem and stromal cells for cell-based therapy: current status of preclinical studies and clinical trials", *Current Opinion of Molecular Therapy*, 12(4):442-449.
- Zhang, H., M. Albersen, X. Jin y G. Lin (2012), "Stem cells: novel players in the treatment of erectile dysfunction", *Asian Journal of Andrology*, 14:145-155.



Noticias de la

Academia Mexicana de Ciencias



Luis Benítez Bribiesca (1934-2015)

El 30 de noviembre falleció el doctor Luis Benítez Bribiesca, notable médico militar, científico y maestro, miembro del Comité Editorial de la revista *Ciencia*. Benítez Bribiesca era médico cirujano con estudios de posgrado en patología general y experimental por el Instituto Mallory de Patología, en Boston, y por la Universidad de Bonn, Alemania; fue becario de la Fundación Alexander von Humboldt. Fue una figura emblemática de la Escuela Médico Militar; jefe e Investigador Titular de la Unidad de Investigación Médica en Enfermedades Oncológicas del Hospital de Oncología del Instituto Mexicano del Seguro Social; profesor en la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en la Universidad Anáhuac y en la Escuela Médico Militar; así como profesor de los Posgrados en Biomedicina, Ciencias Médicas y Ciencias Físicas (Física Médica) de la UNAM.



Su actividad principal era la investigación oncológica. Fue autor de más de 100 trabajos científicos en revistas nacionales e internacionales, varios escritos sobre temas biomédicos y numerosos artículos periodísticos de divulgación científica. Era miembro del Sistema Nacional de Investigadores, la Academia Mexicana de Ciencias, la Academia Mexicana de Cirugía y la Academia Nacional de Medicina. Es autor del libro *Una ruta hacia la ciencia. La preparación de un científico*; fue Editor Emérito de la *Gaceta médica de México*, así como fundador y Editor Emérito de la revista *Patología*. Su excelente labor como editor de la revista *Archives of Medical Research* le valió el reconocimiento internacional.

Luis Benítez fue un individuo con ideas originales, interesado en los mecanismos por los cuales las células malignas invaden otros tejidos, la manera en que se forman nuevos vasos sanguíneos que alimentan a los tumores, y el proceso de apoptosis o muerte celular. Fue un tutor que exigía mucho de sus alumnos,

no aceptaba más que la excelencia; sin embargo, se ganó tanto su respeto como su cariño.

Fue Tutor Principal y responsable de la organización de las actividades médicas del programa de Maestría en Física Médica (MFM) de la UNAM desde su creación en 1997. Cuando se organizó la MFM, Luis era jefe de la Subdivisión de Maestrías y Doctorados de la Facultad de Medicina, y desde allí colaboró activamente en la definición de objetivos y contenidos curriculares de las actividades académicas. Él propuso la creación de una residencia hospitalaria para físicos, de manera que les brindara una visión directa de la aplicación de los principios de la física en la práctica clínica. En la MFM fue tutor generoso, maestro y formador incansable; defensor infatigable del modelo de educación de físicos médicos que se generó con este programa. Todos los alumnos llevaron el curso de Biología Celular, que impartía en el primer semestre y donde era elemento esencial *What is Life?*, obra escrita en 1944 donde el físico Erwin Schrödinger presenta una predicción teórica del almacenamiento de la información genética. Luis impartió este curso durante 18 años, hasta noviembre de 2015.

Fue un hombre con una gran cultura: igual conocía a detalle la historia de cada una de las piedras que forman el Zócalo de la Ciudad de México, que la historia de los grandes músicos, pues también fue cantante de ópera y cineasta aficionado. Pero sobre todo fue un magnífico ser humano.

Que descanse en paz.

MARÍA ESTER BRANDAN,
Instituto de Física, UNAM

PATRICIA OSTROSKY,
Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM

Dos oros y dos platas para México en Olimpiada Iberoamericana de Biología

La delegación mexicana que concursó en la IX Olimpiada Iberoamericana de Biología (OIBAB 2015) regresó de El Salvador con dos medallas de oro y dos de plata. La participación mexicana en el certamen, que tuvo lugar en la capital salvadoreña del 6 al 12 de septiembre de 2015, “nos sorprendió, porque fuimos el único país, de los doce que tomaron parte, que logró dos preseas de primer lugar y otro par de segundo, con lo cual se cumple el objetivo de la Olimpiada, pues los estudiantes hicieron un excelente papel”, resaltó la coordinadora de la Olimpiada Nacional de Biología de la AMC, María Cristina Revilla Monsalve.

El equipo mexicano lo integraron Martín Lugo Leyva, de Sinaloa, y Francisco Vanegas Díaz, de Michoacán, ambos ganadores del oro; y José Vega Equihua, de Michoacán, y Miguel Molina Alegría, de Sonora, quienes obtuvieron plata. ■



Los estudiantes mexicanos Miguel Molina Alegría (Sonora), Martín Lugo Leyva (Sinaloa), Francisco Vanegas Díaz y José Vega Equihua (ambos de Michoacán), ganaron dos medallas de oro y dos de plata en la IX Olimpiada Iberoamericana de Biología, celebrada en San Salvador, El Salvador, del 6 al 12 de septiembre. Fotos: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.

De plata y bronce las medallas de México en Olimpiada Iberoamericana de Química

En la ciudad brasileña de Teresina, la delegación mexicana que participó en la XX Olimpiada Iberoamericana de Química obtuvo muy buenos resultados, luego que Víctor Hernández Lima, del Estado de México; Jesús Barreras Uruchurtu, de Sonora; Saúl Pérez Arana, de Jalisco; y Carlos Quezada Espinoza, de Sinaloa,

consiguieran tres preseas de plata y una de bronce en el concurso que se llevó a cabo del 5 al 14 de septiembre de 2015, con la participación de 54 estudiantes de 15 países.

Al respecto de las cuatro medallas, Antonia Dosal Gómez, coordinadora de la Olimpiada Nacional de Química de la AMC, destacó que el resultado fue excelente y que éste es uno de los equipos más parejos que se ha podido conformar en muchos años, por los puntajes tan similares que obtuvieron.

La participación de México en la Olimpiada Iberoamericana de Química tiene una larga historia, pues nuestro país asiste a esta competencia desde la primera edición, celebrada en Mendoza, Argentina, en 1995. El número de medallas conseguidas hasta la fecha es de 19 de oro, 37 de plata, 22 de bronce y una mención honorífica. ■



La selección mexicana que obtuvo tres medallas de plata y una de bronce en la XX Olimpiada Iberoamericana de Química, realizada en Teresina, Brasil, estuvo integrada por Carlos Quezada Espinoza, de Sinaloa; Jesús Barreras Uruchurtu, de Sonora; Víctor Hernández Lima, del Estado de México; y Saúl Pérez Arana, de Jalisco. Fotos: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.

Firman la AMC y el SPR convenio de colaboración

La AMC y el Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano (SPR) firmaron un convenio de colaboración con el fin de impulsar, divulgar y promover la educación y la cultura universal, así como la investigación científica, tecnológica y humanística.

El acuerdo tiene una vigencia de tres años y fue signado por los presidentes de la AMC y del SPR, Jaime Urrutia Fucugauchi y Antonio Carrillo Lavat, respectivamente.

Entre las primeras acciones por llevarse a cabo bajo este acuerdo está la realización de una serie de 13 títulos de divulgación científica, los cuales se espera se estrenen a partir de febrero de 2016.



La Academia Mexicana de Ciencias y el Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano acuerdan relación de colaboración. En la imagen, los presidentes de ambas organismos, Jaime Urrutia y Antonio Carrillo. Foto: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.

Antonio Carrillo señaló que el convenio representa motivo de orgullo al poder participar con la AMC, lo que significa un compromiso y un esfuerzo por divulgar las investigaciones científicas que en México son de muy alto nivel y de las cuales necesita el país para su desarrollo. “Sabemos que lo más importante de la investigación científica está reunido en la AMC; siempre contar con científicos fue un orgullo para nosotros, pero no únicamente era tenerlos, contar con el reconocimiento de la Academia era fundamental para que todo lo que vayamos a decir esté avalado al cien por ciento por ella”, añadió.

Jaime Urrutia agregó que el acuerdo de colaboración enmarca un tema de interés para todo el país, como es el de incidir y fomentar la vocación científica en nuestros jóvenes y mantener informada a la sociedad sobre los nuevos desarrollos científicos, así como estudios que se llevan a cabo en todos los campos del conocimiento. ■

Anuncia AMC a ganadores de los Premios de Investigación 2015

El Consejo Directivo de la AMC dio a conocer el 15 de octubre de 2015 a los ganadores de los Premios de Investigación 2015, considerada la distinción más importante que otorga la Academia. De acuerdo con la convocatoria, el premio reconoce a jóvenes investigadores menores de 40 años, en el caso de los hombres, y menores de 43 años, para las mujeres, que realicen investigación de punta en las áreas de ciencias exactas, naturales, sociales, humanidades, ingeniería y tecnología.

Ganadores de los Premios de Investigación 2015

- En el área de ciencias exactas:
Eduardo Gómez García
Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- En el área de ciencias naturales:
Stefan de Folter
Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional.
- En el área de ciencias sociales:
José Hevia de la Jara
Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Unidad Golfo.
- En el área de humanidades:
Rebeca Robles García
Dirección de Investigaciones Epidemiológicas y Psicosociales, Instituto Nacional de Psiquiatría “Ramón de la Fuente Muñiz”.
- En el área de ingeniería y tecnología:
Natalya Victorovna Likhanova
Gerencia de Ingeniería de Recuperación Adicional, Instituto Mexicano del Petróleo. ■

Celebra AMC los 75 años de la revista *Ciencia*

La AMC celebró los 75 años de la revista *Ciencia* con una ceremonia conmemorativa y la develación de una placa el 15 de octubre de 2015.

Este reconocimiento es un orgullo más para la Academia, dijo el presidente de la AMC, Jaime Urrutia Fucugauchi, quien destacó que la institución que encabeza siempre ha contado con la participación de personas con visión, quienes han propuesto proyectos



Miembros de la Academia Mexicana de Ciencias y del Comité Editorial de la revista *Ciencia*, asisten a la develación de la placa conmemorativa. Foto: Lilia Hernández/AMC.



En la celebración del 75 aniversario de la revista *Ciencia*, estuvieron presentes como invitados especiales, los ex presidentes Carlos Gual Castro, Ricardo Tapia, Mauricio Fortes, Francisco Bolívar Zapata, Juan Pedro Laclette y Daniel Reséndiz. Foto: Lilia Hernández/AMC.

de largo alcance, como la revista *Ciencia*. Esto representa una oportunidad para mirar hacia atrás y reflexionar acerca de los logros, pero también de las tareas que se tienen pendientes.

En la ceremonia realizada en el auditorio Galileo Galilei, de la AMC, donde se mostró el primer número de esta revista (1 de marzo de 1940), estuvieron presentes Antonio Bolívar Goyanes, hijo de Cándido Bolívar y nieto de Ignacio Bolívar, fundadores de la revista; Julia Tagüeña Parga, directora adjunta de Desarrollo Científico del Conacyt; Jorge Flores Valdés, ex presidente de la AMC y una de las personas que impulsó la incorporación de *Ciencia* al seno de la institución en 1979; y el actual director de la publicación, Miguel Pérez de la Mora. ■

Premia AMC a jóvenes realizadores en el 1er Concurso Nacional de Videoclip "Descubramos a las científicas mexicanas"

La AMC y la Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS, por sus siglas en inglés) entregaron los premios a los ganadores del Primer Concurso Nacional de Videoclip "Descubramos a las científicas mexicanas", certamen que superó las expectativas de los organizadores por el alto número de inscripciones.

"Es una de las iniciativas más interesantes que hemos tenido, la cual despertó gran entusiasmo. El número de inscripciones fue muy alto, aun cuando los tiempos que se dieron en la convocatoria fueron muy cortos", resaltó Jaime Urrutia Fucugauchi, presidente de la AMC.

Reconoció la labor de la doctora Judith Zubieta García, representante de la AMC ante IANAS, por impulsar con estas activida-

des los programas que se llevan a cabo en asociación con la red —que integra a academias de ciencias de 19 países del continente americano—, con los cuales se busca atraer a más mujeres a la investigación científica. "Ha sido una labor enorme y se ha podido construir con base en la creatividad y el compromiso", dijo.

En el acto, realizado el 19 de octubre de 2015 en el auditorio Dr. Pablo González Casanova, de la Coordinación de Universidad Abierta y Educación a Distancia de la UNAM, la titular Judith Zubieta expresó su agradecimiento a los participantes: "por dejarse coquetear con esta convocatoria. Ojalá vuelvan a participar en la segunda edición y a seguir trabajando por un país que nos permita ofrecer mejores condiciones de vida a la población".

Hernán Muñoz Acosta, quien habló a nombre de los ganadores, sostuvo que esta convocatoria les dejó claro "la importancia del trabajo colectivo, porque corroboramos que no se pueden hacer muchas cosas sin la participación de otros; además, al conocer más de cerca a las científicas, nuestro respeto por ellas se vio incrementado, pues son mujeres que están plantando una semilla en jóvenes como nosotros".

Los ganadores, premiados con un diploma y un estímulo económico de 15 000 pesos, fueron: Monserrat Rosales Briseño, Darío Ballesteros, Blanca Cortés Quintero, Aidé Barajas Vega, en la categoría individual; Mariana De Botton Falcón y Sebastián Palacios Martínez; Federica Rentería e Itala Aguilera; Hernán Muñoz Acosta y Mayra Magaña Pintor; y Aketzalli González Santiago, Laura Esquivel Hernández y Ernesto Mata Plata, en la categoría por equipos.

Los títulos de los videos con mención honorífica son: "De la semilla al árbol", "Por amor a la ciencia", "Siguiendo generación de científicas mexicanas", "El mundo de Sofía", "Sinapsis femenina, una mirada única de la ciencia", "El lado oscuro de la ciencia: mujeres como agentes de cambio" y "Efectos colaterales 3.0".



Ganadores de los primeros lugares y menciones honoríficas del Primer Concurso Nacional de Videoclip "Descubramos a las científicas mexicanas", acompañados por el doctor Jaime Urrutia Fucugauchi y la doctora Judith Zubieta García. Foto: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.



El doctor Jaime Urrutia y la doctora Judith Zubieta, en la premiación del Primer Concurso Nacional de Videoclip "Descubramos a las científicas mexicanas". Foto: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.

Los videos ganadores pueden verse en la siguiente página electrónica: <<http://www.amc.mx/videoscientificas>>.

Participa AMC en aniversario 45 del Conacyt

El presidente de la AMC, Jaime Urrutia Fucugauchi, resaltó la labor transformadora que ha hecho el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) en el sistema de ciencia y tecnología del país, al implementar una serie de programas y acciones que han contribuido a las políticas de descentralización de la ciencia y la investigación en México.

Señaló que las iniciativas emprendidas por el organismo han impulsado la formación de recursos humanos a través de becas nacionales e internacionales, así como la creación de nuevos centros de investigación.

La ceremonia del 45° aniversario del Conacyt, en el auditorio Jaime Torres Bodet, del Museo Nacional de Antropología, fue celebrada el 20 de octubre de 2015 y presidida por el director general del Conacyt, Enrique Cabrero Mendoza, y por el Premio Nobel de Física 2006, George Smoot. En su intervención durante el evento, Urrutia Fucugauchi indicó que la investigación, la ciencia, la tecnología y la educación son los pilares del desarrollo de las naciones.

"La diferencia —dijo— es la rapidez con la que se dan los avances y los impactos en las sociedades; de ahí que para permanecer en el proceso de desarrollo es necesario construir, consolidar y ampliar las capacidades en ciencia y tecnología, además de contar con sistemas educativos de calidad y proveer las condiciones y la infraestructura para formar, retener y atraer a los estudiantes hacia la investigación."



Los doctores Axel de la Macorra, Jaime Urrutia Fucugauchi, Enrique Cabrero Mendoza, George Smoot y Jorge Flores Valdés, durante la ceremonia del 45 aniversario del Conacyt, en el auditorio "Jaime Torres Bodet" del Museo Nacional de Antropología. Fotos: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.

Agregó que la relación entre la AMC y el Conacyt ha sido cercana y ha dado lugar a diferentes iniciativas. Tal es el caso de la creación del Sistema Nacional de Investigadores en 1983, en la que también participó la Secretaría de Educación Pública; o del programa "Hacia dónde va la ciencia en México", que es parte de la colaboración del Conacyt, la AMC y el Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República.

Enrique Luis Graue Wiechers, nuevo rector de la UNAM

Después de una amplia deliberación y tras un periodo de 44 días, la Junta de Gobierno de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) designó al médico oftalmólogo



El doctor Enrique Luis Graue Wiechers fue designado por la Junta de Gobierno de la UNAM rector para el periodo 2015-2019. Foto: Forum.

Enrique Luis Graue Wiechers como nuevo rector de la institución para el periodo 2015-2019.

El 17 de noviembre tomó protesta en el Palacio de la Escuela de Medicina. Sustituyó en el cargo al doctor José Narro Robles. ■

Recibe revista *Ciencia* Premio CANIEM al Arte Editorial 2015

Por su diseño editorial, idea del producto, ilustración, fotografía y presentación final, la revista *Ciencia* de la AMC recibió el 19 de noviembre de 2015, en el auditorio del Museo Memoria y



El doctor Miguel Pérez de la Mora, director de la revista *Ciencia*, recibió del presidente de la CANIEM, José Ignacio Echeverría, el Premio al Arte Editorial 2015 y una mención especial por los 75 años de la publicación. Foto: Mónica Hernández/CANIEM.



Publicaciones que este año fueron distinguidas con el Premio al Arte Editorial CANIEM 2015, que otorga la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. La revista *Ciencia* de la Academia Mexicana de Ciencias (abajo derecha), lo recibió en la categoría "Cultura, literarias, religiosas, académicas y universitarias". Foto: CANIEM.

Tolerancia, el Premio al Arte Editorial 2015 que otorga la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana (CANIEM), en la categoría de publicaciones periódicas de "Cultura, literarias, religiosas, académicas y universitarias", así como una mención especial por los 75 años de la publicación.

El director de *Ciencia*, Miguel Pérez de la Mora, recibió la distinción y al respecto dijo que el galardón es muestra del buen momento por el que está pasando la revista. "Es un reconocimiento a toda la labor de tanta gente que ha trabajado en la revista a lo largo de estos 75 años, al buen ojo que tuvo la AMC de acoger a la revista *Ciencia* en 1979 y, por supuesto, que se haya dado el premio a quienes formamos parte de este equipo que ya lleva trabajando 15 años ininterrumpidos." ■

Construyendo el futuro - Encuentros de Ciencia

La primera reunión "Construyendo el futuro-Encuentros de ciencia" se llevó a cabo del 19 al 22 de noviembre de 2015, en la ciudad de Mérida, Yucatán. El encuentro se realizó en el marco del 45° aniversario del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y los 70 años del Premio Nacional de Ciencias y Artes. Se reunió a investigadores en diferentes etapas de sus carreras, con el objetivo de propiciar discusiones y analizar programas y proyectos de investigación, para explorar colaboraciones y construir nuevas iniciativas.

El evento fue organizado por la AMC en colaboración con el Conacyt, el Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la



Inauguración de *Construyendo el futuro - Encuentros de Ciencia*. En la mesa de honor Raúl Godoy, titular de la Secretaría de Investigación, Innovación y Educación Superior; Rolando Zapata, gobernador de Yucatán; Jaime Urrutia, presidente de la Academia Mexicana de Ciencias; y Jorge Flores, coordinador general del Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República. Foto: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.



El doctor Andrés Aluja, coordinador general de Cooperación e Internacionalización de la UADY, y la investigadora Liliana Quintanar, ganadora del Premio de la Investigación de la AMC. Foto: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.

República, el gobierno del estado de Yucatán, El Colegio Nacional y la Universidad Nacional Autónoma de México.

El grupo de investigadores consolidados incluyó a algunos distinguidos con el Premio Nacional de Ciencias y Artes, con el Premio Universidad Nacional o integrantes de El Colegio Nacional. De los jóvenes investigadores que participaron, 23 fueron elegidos de entre los galardonados con el Premio de Investigación de la Academia; el Premio Weizmann, que otorgan la AMC y la Asociación Mexicana de Amigos del Instituto Weizmann de Ciencias; y las Becas L'Oréal para Mujeres en la Ciencia menores de 40 años, que otorgan la AMC, L'Oréal y la Comisión Mexicana de Cooperación de la UNESCO. También se contó con la participación de 21 investigadores de Cátedra Conacyt, así como con investigadores acreedores del Reconocimiento Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos de la UNAM; la Beca



Integrantes de El Colegio Nacional, ganadores del Premio Nacional de Ciencias y Artes, así como de los Premios de Investigación de la Academia, Premios Weizmann, Becas L'Oréal, Estancias de Verano FUMEC e investigadores del Programa Cátedras Conacyt, compartieron experiencias hasta el último día de actividades de la reunión *Construyendo el futuro - Encuentros de Ciencia*. Foto: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.

Internacional L'Oréal-UNESCO; y el programa de Estancias de Verano para Investigadores Jóvenes AMC-FUMEC.

La ceremonia inaugural, celebrada el 20 de noviembre, fue presidida por el gobernador del estado de Yucatán, Rolando Bello Zapata, acompañado por el secretario de Investigación, Innovación y Educación Superior del estado de Yucatán, Raúl Godoy Montañez; Jaime Urrutia Fucugauchi, presidente de la AMC; y Jorge Flores Valdés, coordinador general del Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República. En el marco de dicha ceremonia se firmó un convenio de colaboración entre la Secretaría de Investigación, Innovación y Educación Superior del estado de Yucatán y la AMC. ■

Entrega el Colmex Premio Alfonso Reyes a Miguel León Portilla

En los festejos por los 75 años de la fundación de El Colegio de México (Colmex) se entregó, el 8 de octubre de 2015, el Premio Alfonso Reyes al historiador, filósofo, filólogo, traductor y diplomático Miguel León Portilla, un mexicano cuyos estudios en torno a la cosmología indígena y cuya defensa por las lenguas originarias, especialmente el náhuatl, le han valido reconocimiento internacional.

León Portilla, integrante de la AMC, ofreció la conferencia magistral "Una evocación de Alfonso Reyes", en la que enalteció,



Foto de grupo de los participantes en el evento *Construyendo el futuro - Encuentros de Ciencia*, durante su visita al Parque Científico y Tecnológico de Yucatán. Foto: Elizabeth Ruiz Jaimes/AMC.



El investigador Miguel León Portilla recibió de El Colegio de México el Premio Alfonso Reyes, emisión 2015. La presidenta del Colmex, Silvia Giorguli, hizo entrega del reconocimiento que consistió en una medalla, un diploma y un incentivo económico; asiste el momento Jaime Serra Puche, representante de la Fundación Colmex. Foto: Cortesía Colmex.

entre otras, la figura del mexicano nacido en Nuevo León, quien como diplomático fue uno de los principales responsables de haber dado acogida a los españoles que se refugiaron en México tras el estallido en su país de la guerra civil, en 1936. ■

Reconocen a investigador miembro de la AMC con el Premio Heberto Castillo 2015

Por sus aportaciones científicas y su reconocida trayectoria, el doctor Luis Fernando de la Peña Auerbach, investigador emérito del Instituto de Física de la UNAM, obtuvo el Premio Heberto Castillo de la Ciudad de México 2015 "Por una Ciudad ConCiencia", que otorga el Gobierno de la Ciudad de México a través de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación. ■



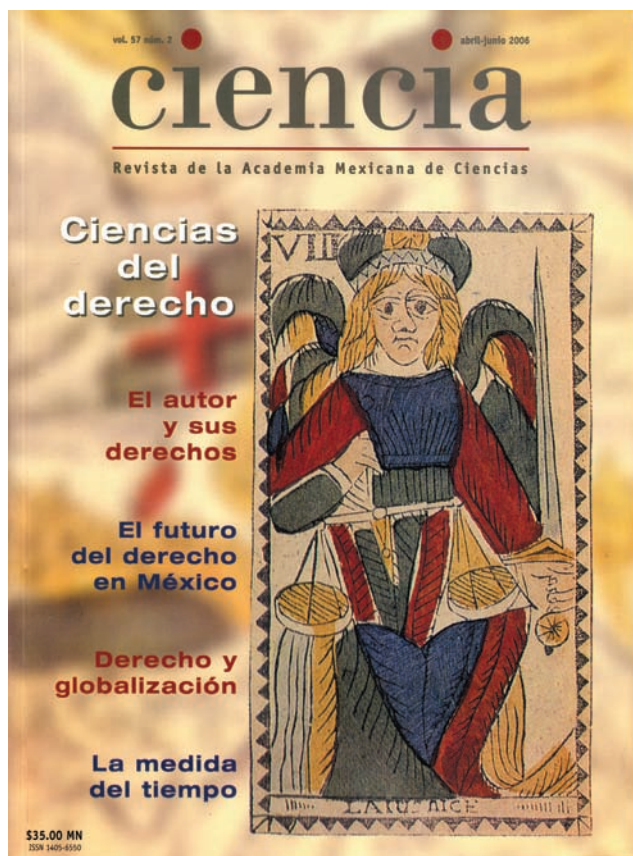
El doctor Luis Fernando de la Peña Auerbach, investigador emérito del Instituto de Física de la UNAM e integrante de la Academia Mexicana de Ciencias, fue reconocido hoy con el Premio Heberto Castillo de la Ciudad de México 2015 "Por una Ciudad ConCiencia". Foto: DGCS-UNAM.

Nota aclaratoria al artículo **“Uso de los medios electrónicos y la enseñanza del derecho”,** por su autora

Por una omisión atribuible a mi persona, no se publicaron en mi trabajo correspondiente al vol. 57, núm. 2, de abril-junio de 2006, denominado “Uso de los medios electrónicos y la enseñanza del derecho”, las siguientes citas bibliográficas del trabajo *La enseñanza del derecho en la Universidad Iberoamericana*, publicado por dicha universidad en 2002, del Dr. Víctor Rojas Amandi, situación por la cual pido una disculpa.

De acuerdo con Rojas Amandi, en el caso de la información legal, contamos con buscadores especializados en el ámbito internacional:

El servicio *Internet Legal Resource Guide* (<http://www.ilrg.com>) permite buscar en más de 4 000 sitios web de todo el mundo. El buscador *Find Law* realiza búsquedas de una manera muy rápida y precisa en una infinidad de sitios



públicos o privados presentes en la red. Si la información que se busca es sobre derecho mexicano, se recomienda utilizar el *navJus*, navegador jurídico del Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM (<http://www.juridicas.unam.mx/navjus>).¹

En relación con el buscador *navJus*, Rojas Amandi destaca que a través del mismo

[...] se puede acceder a la información general del país: a la legislación federal mexicana, así como a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos vigente, incluidas todas sus reformas y otras constituciones que fueron vigentes en nuestro pasado; a los sitios de la presidencia de la República, de las diferentes secretarías de Estado, de los organismos autónomos centralizados, descentralizados y desconcentrados y de las embajadas y consulados; a la página electrónica de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión; al sitio del Senado de la República; al servicio de la Suprema Corte de Justicia de la Nación; al sitio del Consejo de la Judicatura Federal; al Tribunal Federal de Justicia Fiscal y Administrativa; y al de los partidos políticos. De igual forma, los enlaces del gobierno de México ofrecen acceso a los sitios electrónicos de los poderes legislativos, ejecutivos y judiciales de las diferentes entidades federativas que integran la federación mexicana.²

En palabras de Rojas Amandi, dentro de *InfoJus*, el sistema *AdproJus*,

[...] que ha sido desarrollado por la Procuraduría General de la República, conjuntamente con el Instituto de Investigaciones Jurídicas, es quizá el único que contiene toda la legislación federal, así como la legislación más importante de cada uno de los estados de la República y

del Distrito Federal. El sistema cuenta con cuatro sitios: Administración de Justicia, Jurídico Laboral, Jurídico Constitucional y Jurídico Universitario.

El sitio de Administración de la Justicia (<http://info4.juridicas.unam.mx/adprojus>) brinda acceso a la totalidad de la legislación federal mexicana: (<http://info4.juridicas.unam.mx/adprojus/leyfed.htm>); a la legislación más importante de los estados que pertenecen a la República Mexicana (<http://info4.juridicas.unam.mx/adprojus/leyest.htm>); y a los acuerdos, aclaraciones, bases de colaboración, circulares, convenios de apoyo y colaboración, instructivos, manuales, oficios y circulares de la Procuraduría General de la República (<http://info4.juridicas.unam.mx/adprojus/lacu.htm>).

El sitio Jurídico Laboral (<http://info4.juridicas.unam.mx/juslab>) proporciona acceso a la legislación laboral y de seguridad social básica (<http://info4.juridicas.unam.mx/juslab/leylab>); a la jurisprudencia de la materia (<http://info4.juridicas.unam.mx/juslab/teslab>), y a la bibliografía de la materia (<http://info4.juridicas.unam.mx/juslab/biblab>).³

Sobre el punto, señala Rojas Amandi que

Algo que resultaría imprescindible para lograr que los estudiantes lleguen a aprovechar de la mejor manera los recursos jurídicos a los que se puede acceder haciendo uso de medios electrónicos, sería que los profesores de las diferentes ramas del Derecho soliciten que sus estudiantes utilicen permanentemente dichos medios, que preparen trabajos sobre los contenidos que ofrecen los diferentes servicios con información jurídica y, sobre todo, que los motiven a utilizarlos en su trabajo diario.⁴

LORETTA ORTIZ AHLF

¹Rojas Amandi, V. M. (2002), "El uso de los medios electrónicos en la enseñanza del derecho", en V. M. Rojas (coord.), *La enseñanza del derecho en la Universidad Iberoamericana*, México, Universidad Iberoamericana, p. 159.

²*Ibidem*, p. 160.

³*Ibidem*, pp. 160-161.

⁴*Ibidem*, p. 170.

Martha Fernández



La plaza de **SANTO DOMINGO** en el siglo XVI

En una atmósfera como la creada por un convento de frailes (la Orden de Predicadores) y una institución represora (el Santo Tribunal de la Inquisición), nació la plaza de Santo Domingo en la capital de lo que entonces era la Nueva España. Su privilegiada ubicación y conformación urbana propiciarían que tanto las autoridades civiles y religiosas como la sociedad se apropiaran de ella para llevar a cabo actividades de distinta índole y significación, desde juegos de cañas hasta autos de fe. Entre sus calles y vecinos, y por supuesto sus leyendas, esta plaza ha sobrevivido por siglos y atestiguado el devenir histórico de México y sus cambios a través del tiempo.



El nacimiento de la plaza de Santo Domingo

Para conocer el origen de la plaza de Santo Domingo debemos remontarnos a la llegada de la Orden de Predicadores a la capital de lo que entonces era la Nueva España, en el año de 1526. Su primer albergue fue el convento de San Francisco, en el cual permanecieron tres meses, y después se mudaron a una casa que les donó la familia Guerrero, en la esquina de las actuales calles de República de Brasil y República de Venezuela; es decir, que la casa se ubicaba en el sitio donde, más tarde, levantaría su edificio el Santo Tribunal de la Inquisición, hoy sede del Museo de Medicina y Protomedicato de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Con ello, identificamos una primera casa dentro del perímetro de lo que, poco tiempo después, se convertiría en una plaza.

Los Predicadores vivieron tres años en la casa que les donó la familia Guerrero. Al seleccionar el sitio donde podrían levantar su convento, pensaron en los solares de enfrente. De acuerdo con el relato de fray Juan de la Cruz y Moya, resulta que:

Por Real Cédula del Emperador [Carlos V] despachada en Valladolid a veinte y ocho de junio de mil quinientos veinte y siete, se concedió a nuestro convento todo el sitio que hoy goza, por súplica que interpuso el Ve. P. Fr. Tomás Ortiz, determinando en ella que a los dueños de los solares en que se resolvía hacer la fundación se diesen otros equivalentes, en otra parte de la ciudad (De la Cruz y Moya, 1954, t.1, pp. 133-134).



En total, se les donaron seis solares de una extensión bastante generosa, pues en conjunto abarcarían lo que en la actualidad es toda una manzana limitada por las calles que, una vez construido el convento, se llamarían: Del Puente de Santo Domingo (hoy República de Brasil), De la Puerta Falsa de Santo Domingo (hoy República del Perú), De la Cerca de Santo Domingo (hoy Belisario Domínguez) y De la Pila Seca (hoy República de Chile). Por la calle de la Puerta Falsa de Santo Domingo, esto es, al norte del terreno, corría un canal que fue cegado en el siglo XVIII.

Pese a las dimensiones del terreno cedido a los dominicos, los frailes no se conformaron, de manera que hicieron correr una versión de la Real Cédula —que recogió fray Juan de la Cruz y Moya— según la cual Carlos V no sólo aseguró a los Predicadores la propiedad de esos solares para que pudieran construir su convento,

sino que, además, les había otorgado la plazuela que estaba frente al atrio, “mandando no se labre en ella edificio alguno, sino que quede siempre desembarazada para el desahogo del convento y funciones de la iglesia”.

Aunque se pueda dudar de la veracidad de semejante donación real, es obvio que los Predicadores tuvieron buen cuidado de reservar esos solares, todavía libres de construcciones, “para el desahogo del convento”. Por ello, Francisco de la Maza tiene razón cuando expresa que, finalmente, “la plaza de Santo Domingo, la más bella y mejor conservada de México, es una creación de los frailes dominicos, para dar vista y esplendor a su iglesia” (De la Maza, 1968, p. 10), así como para significarla. Por lo mismo, colocaron al centro una cruz de madera, conocida como la “Cruz de Medina”, la cual fue sustituida por un pozo en el mismo siglo XVI por la necesidad de abastecer de agua a los vecinos.



Figura 1. La plaza de Santo Domingo. Foto: Martha Fernández.

En cuanto a las construcciones que la limitaban, hasta el año de 1527 sólo se tiene noticia cierta de la citada casa de la familia Guerrero. Para entonces, los dominicos ya la habían modificado: en su interior construyeron una pequeña iglesia, adaptaron habitaciones para los frailes y abrieron celdas para los reos, pues los Predicadores fungieron como inquisidores de la Nueva España de 1526 a 1571.

Una vez que los dominicos adquirieron los solares, comenzaron la construcción de su convento. Lo primero que levantaron fue el claustro, concluido en el año de 1529, y siguieron utilizando la iglesia que tenían en la casa de los Guerrero hasta el año de 1532, cuando se concluyó la primera de las tres iglesias que los Predicadores erigieron en su solar (Cervantes de Salazar, 1985, p. 110). La merced de agua les fue concedida por el Cabildo de la Ciudad en 1542.

El primer templo que construyeron los frailes fuera de la casa estaba orientado de oriente a poniente; tenía una sola nave y era tan pobre que su presbiterio consistía en “un rincón cubierto de paja”, mientras que la techumbre de su nave era de madera. En esa situación prevaleció varios años, pues fue hasta el 12 de mayo de 1552 cuando el rey expidió la Real Cédula, dirigida al virrey don Luis de Velasco, por la cual ordenaba que de la hacienda real se edificara la iglesia de Santo Domingo; por eso el título de la casa de los dominicos fue el de Convento Real.

Además, para ayudar al financiamiento de la construcción, el rey autorizó que el fruto de las donaciones otorgadas por particulares para dotar capillas a la iglesia se aprovechara en la construcción del convento. Los Predicadores, todavía instalados en la casa de los Guerrero, habían otorgado dos capillas que seguramente abrieron en la nueva iglesia: una a Francisco de Santa Cruz, apoderado de Hernán Cortés, y otra, en 1528, a Juan Cázeres Delgado y su mujer, Catalina González, —con seguridad— benefactores de la orden.

Probablemente la primera iglesia erigida en los solares otorgados a los dominicos ya estaba terminada hacia 1597, cuando los propios frailes solicitaron al Cabildo de la Ciudad que se celebraran “las fiestas acostumbradas en honor de San Jacinto”.

Al claustro se ingresaba a través de una portería conformada por una danza de arcos contigua al novi-



Figura 2. Portada principal de la iglesia de Santo Domingo, construida en el siglo XVIII. Foto: Martha Fernández.

ciado. El edificio era de dos pisos construidos al poniente de la iglesia. La fachada, que miraba al oriente, consistía en un arco de medio punto flanqueado por dos claraboyas. En el segundo piso se abría una arquería rematada con almenas y un torreón. El noviciado, igualmente de dos pisos, también se levantaba al poniente del templo.

Al frente de todo el conjunto se encontraba el atrio, bardeado, en el cual se levantaban cuatro capillas posas y una cruz al centro. Las capillas posas servían para depositar o “posar” al Santísimo Sacramento o a los santos de la devoción de la orden durante las procesiones públicas que se llevaban a cabo en el atrio. De esas capillas sobrevivió una en la esquina suroeste del antiguo atrio, hoy dedicada al Señor de la Expiración. Pese a sus reducidas proporciones —en opinión de quienes lo conocieron—, este primer convento de Predicadores de la capital novohispana era muy suntuoso.

La presencia de tan importante institución debió de haber dado relevancia al sitio, lo que atrajo a vecinos pudientes que decidieron construir sus casas en el perímetro de la plaza.

La Inquisición en la plaza de Santo Domingo

Sin duda, la otra institución que otorgó identidad a la plaza de Santo Domingo durante la época virreinal fue el Santo Tribunal de la Inquisición, que se fundó en la Nueva España, por Cédula Real de Felipe II, el 16 de agosto de 1570. El 12 de septiembre de 1571 llegaron a la Nueva España Pedro Moya de Contreras, como inquisidor, y Pedro de los Ríos, como secretario. La ceremonia de recepción fue organizada por el Cabildo de la Ciudad y se llevó a cabo el 4 de noviembre del mismo año en la Catedral de México.

Su primera habitación fue el convento de Santo Domingo, pero pocos días después se mudaron a las casas que antes habían ocupado los Predicadores, en

la esquina de las actuales calles de República de Brasil y República de Venezuela. El inquisidor, de inmediato, adaptó la Sala de Audiencia, la Sala de Juzgados, la Cámara del Secreto, una capilla provisional y aposentos para dos inquisidores, para el alcaide de la cárcel y para el portero. Se improvisaron también algunas celdas, que ocuparía como primer prisionero el pirata francés Pedro Sanfroy, por resultar sospechoso de luteranismo.

De acuerdo con las *Actas de Cabildo*, pese a la importancia del Tribunal y de sus funciones, apenas el 15 de mayo de 1598 los inquisidores se dirigieron al virrey para solicitar “que se meta el agua al edificio para provecho y salud de los presos y enfermos”. La petición fue aprobada, y para el 6 de julio de ese mismo año el Cabildo mandó proveer la piedra necesaria “para el encañado de la Inquisición” (*Actas de Cabildo de la Ciudad de México*, 6 de julio de 1598).

Con esas obras, realizadas en un edificio ya construido previamente, la plaza no sufrió alteraciones en su traza urbana, pero la institución más temida del



Figura 3. Antiguo Palacio de la Inquisición, hoy Museo de Medicina y Protomedicato de la UNAM. El edificio actual fue construido por el arquitecto Pedro de Arrieta a principios del siglo XVIII. Foto: Martha Fernández.

mundo en aquel momento muy pronto le imprimió su sello propio con las celebraciones de los famosos autos de fe, que invariablemente comenzaban en el convento de Santo Domingo y su plaza. Durante el siglo XVI se celebraron cuatro autos de fe importantes en la Ciudad de México: 1574, 1575, 1590 y 1596; este último fue conocido como “auto grande”. Fue también el Santo Tribunal quien implantó la costumbre de realizar la procesión de la Cruz Verde un día antes de la celebración de esos terribles actos.

La plaza y sus vecinos

Al principio, la plaza no tenía más que tierra apisonada, pero en 1585 se mandó empedrar y aderezar el puente que había en ella. Las obras fueron realizadas por los arquitectos Alonso Valdés y Alonso Gómez de Cervantes, quienes las finalizaron en 1588 (*Actas de Cabildo de la Ciudad de México*, 31 de marzo de 1588).

Entre las casas importantes que se construyeron en la plaza se encontraban las del Mayorazgo Pacheco y Bocanegra, que fue fundado por Cédula Real, expedida en Madrid el 8 de noviembre de 1562. También se ubicaban otras en los alrededores, según dice José María Marroquí, “en la plaza del monasterio de Santo Domingo, que lindan por una parte con casas de Cristóbal de Oñate y, por las espaldas, con casas de Gonzalo de Salazar, y por delante y por un lado, con las dos calles reales, que están en la esquina”.

La casa de Cristóbal de Oñate se encontraba en el número 7 “de la segunda calle de Santo Domingo” (hoy República de Brasil), en tanto que la de Gonzalo Salazar era “la casa número 24 de los Medinas” (hoy República de Cuba) (Marroquí, 1969, p. 307). Esto quiere decir que las “calles reales” que se mencionan en la cita anterior eran: una, la de Santo Domingo y, la otra, la que más tarde se llamaría de Medinas.

Una calle más limitaba la plaza. En los famosos diálogos de Cervantes de Salazar, los interlocutores citan dos calles: “una que va a la plaza y tiene el nombre del convento [...] y esta otra que va al convento de monjas”; o sea, la que hoy se denomina Belisario Domínguez, donde se levantaba el convento de Nuestra Señora de la Pura y Limpia Concepción, que fue fundado en 1540 y del cual subsisten la iglesia reconstruida en

el siglo XVII y las ruinas de algunos claustros de los siglos XVI al XVIII.

Con esto nos damos cuenta de que desde mediados del siglo XVI la plaza estuvo limitada por las calles que ahora conocemos como República de Brasil, República de Venezuela, República de Cuba y Belisario Domínguez.

Las primeras casas que se erigieron en ese lugar fueron: la de los Guerrero (en la esquina de las actuales calles de Brasil y Venezuela), la del Mayorazgo de Pacheco y Bocanegra (en la esquina de las calles que hoy llevan el nombre de Brasil y Cuba) y la de Gonzalo de Salazar (sobre la actual calle de Cuba). Sin embargo, el prestigio que pronto alcanzó la plaza motivó a muchas personas a avecindarse en sus alrededores; por ello, desde muy temprano, las *Actas de Cabildo* mencionan varias concesiones de solares a los alrededores del convento de los Predicadores. Entre ellos conviene recordar uno otorgado por el Cabildo de la Ciudad al sastre Mucio Delgado, “junto a las casas de Pedro de Paz”, que se encontraban frente a la Puerta Falsa de Santo Domingo. El caso de las casas de Paz es interesante, pues el 9 de agosto de 1563 el Cabildo le otorgó un plazo de tres días para presentar ante el Ayuntamiento los títulos que lo autorizaban para construir las casas citadas, y él presentó el 16 de agosto siguiente “el proceso que se sigue entre él y la Universidad por la propiedad de los solares que están frente a la puerta falsa del monasterio de Santo Domingo” (*Actas de Cabildo de la Ciudad de México*, 16 de agosto de 1563), lo que quiere decir que la Universidad —en aquel entonces Real y Pontificia— también tenía propiedades en la zona aledaña a la plaza de Santo Domingo.

Asimismo, los cofrades de Santa Catalina se avecindaron en las cercanías de la plaza, en el camino que iba al “tianguis de Tlatelolco”, cuyo solar les fue concedido el 12 de enero de 1537. En este sitio edificaron la iglesia parroquial que —tras ser reconstruida a finales del siglo XVII— subsiste hasta nuestros días. También se levantó, desde temprano, la iglesia de Santa Ana, para atender a la población indígena de la zona.

Las primeras actividades comerciales de la plaza y sus alrededores fueron de “artesanos de todas clases” que ocupaban la calle de Santo Domingo, tal como refiere Francisco Cervantes de Salazar; así como unas tabernas, sobre la misma calle, cuyos propietarios eran

los herederos de Bernardino Vázquez de Tapia, de acuerdo con la noticia que se da de ellas en las *Actas de Cabildo* del 6 de junio de 1561. En los alrededores también encontramos al boticario Juan de Santa Cruz, al sastre Mucio Delgado y al licenciado Morones.



Fiestas, ceremonias y autos de fe

La privilegiada ubicación de la plaza de Santo Domingo propició que las autoridades civiles y religiosas, así como la misma sociedad civil, se apropiaran de ella para realizar diversos eventos de distinta índole. Los frailes dominicos fueron los primeros que utilizaron la plaza en este sentido, como bien relata fray Juan de la Cruz y Moya, cuando en 1534 se celebró en la iglesia la fiesta por la erección de la Provincia de Santiago de México de la Orden de Predicadores, que había sido autorizada por bula del papa Clemente VII, el 11 de julio de 1532. Hubo repique general de campanas en las iglesias de San Francisco, San Agustín y Santo Domingo, así como “luminarias” en toda la ciudad y una misa solemne en la que predicó fray Julián Garcés, obispo de Tlaxcala. A esta fiesta asistieron los principales personajes de la vida política de la Nueva España, inclusive Hernán Cortés.

Es muy probable que los frailes también realizaran diversos actos festivos o luctuosos en los días señalados para ello por la Iglesia católica, como la Navidad y la Semana Santa; así como para las devociones promovidas por ellos, como la Virgen del Rosario –cuya cofradía se fundó el 16 de marzo de 1538– y santo Domingo. Sin embargo, la información concreta con la que contamos indica que el 6 de marzo de 1597, la orden de religiosos solicitó al Cabildo de la Ciudad que se llevaran a cabo “las fiestas acostumbradas en honor a San Jacinto”. En esa ocasión, el Cabildo aceptó y acordó que para el “domingo de la procesión” se hicieran arcos triunfales y tablados “con banderas y trompetas” para las calles por donde pasaría el santo; y que en la plaza de Santo Domingo se realizara una “sortija” que ofreció pagar el alcalde Rodrigo de Zárate. Además, el lunes, viernes y sábado habría toros, y también el lunes, juegos de cañas. “Se decidió gastar 700 pesos para la fiesta”, gasto que autorizó el virrey el 22 de marzo.

Asimismo, la plaza fue utilizada por las autoridades civiles por lo menos desde 1580, pues fue costumbre que los virreyes y arzobispos recién nombrados, cuando llegaban a la Nueva España, entraran a la ciudad por la plaza de Santo Domingo. Así, por ejemplo, se utilizó para el recibimiento de don Lorenzo Suárez de Mendoza, conde de la Coruña, el 4 de octubre de 1580. Los preparativos comenzaron desde el 29 de agosto; el 26 de septiembre, el Cabildo de la Ciudad acordó levantar un arco “en la calle de Santo Domingo a Santa Catalina” (hoy República de Brasil), para entregar en ese sitio una llave dorada al nuevo virrey.

Del mismo modo, el 2 de enero de 1590, el Cabildo de la Ciudad acordó realizar las siguientes actividades para recibir al virrey don Luis de Velasco:

- a) Una escaramuza en el valle de Guadalupe. b) Que se pase revista a las tropas de infantería. c) Que se haga un palio de seda. d) Que se den hachas a cada uno de los regidores. e) Que se haga bosque en la plaza de México con conejos y venados. f) Que se organicen juegos de cañas y corridas de toros. g) Que se haga un arco triunfal en la plaza de Santo Domingo. h) Se organizaron cuadrillas para los juegos de cañas.

También se estableció como una costumbre desde el siglo XVI que los ministros del Santo Tribunal de la Inquisición levantaran túmulos en la iglesia a la memoria de los reyes fallecidos, lo que afectaba también las actividades de la plaza, pues todo el pueblo estaba invitado a visitarlos. Eran obras efímeras que se colocaban durante cierto tiempo y después se desmontaban; muchas veces se reutilizaban en otras ceremonias y solamente les cambiaban las pinturas y las imágenes, de acuerdo con el personaje cuya muerte se lamentaba. El primer túmulo del que tenemos noticia, erigido en la iglesia de los dominicos, fue el que los inquisidores mandaron construir a la memoria del rey Felipe II, fallecido en 1598. La ceremonia fúnebre tuvo lugar el día 1 de abril de 1599. El diseño del túmulo fue obra del arquitecto Alonso Arias, y las pinturas de Andrés de Concha. Como era costumbre también en Europa, los túmulos solían tener figuras alegóricas de virtudes atribuidas al monarca; en esta ocasión se seleccionaron, entre otras, el Temor, el Espanto, el Llanto, el Sentimiento,



Figura 4. Antigua Aduana de Santo Domingo, hoy Secretaría de Educación Pública. El edificio actual fue construido en el siglo XVIII. Foto: Martha Fernández.

el Genio, el Entendimiento, el Deseo, el Pensamiento y el Tiempo; la imagen que se encontraba en el lienzo principal representó a la Fama (De la Maza, 1946, pp. 41-46).

Aunque el primer auto de fe celebrado en la plaza de Santo Domingo tuvo lugar hasta el año de 1605, todos comenzaban siempre en esa plaza, donde se encontraba la sede del Santo Tribunal. El acto iniciaba un día antes con la procesión de la Cruz Verde, a la que asistían las órdenes religiosas de varones que había en la ciudad, la nobleza, las autoridades civiles y religiosas y los miembros de la Inquisición, todos vestidos de gala. Los frailes dominicos eran precisamente los encargados de portar la Cruz cubierta por una sábana de tafetán negro y llevaban luces en las manos. Salían de la plaza y recorrían diversos conventos de la ciudad para anunciar el auto del día siguiente.

De acuerdo con una tradición recogida por Luis González Obregón, para el auto de fe celebrado en 1574 en la plaza del Marqués (frente a lo que es ahora el Monte de Piedad), se reunieron un día antes los inquisidores en el patio de su sede “e instruyeron a los reos del modo con que habían de ir al tablado, y

los vistieron con sambenitos amarillos, pintados atrás y adelante de cruces encarnadas, no dejando dormir en toda la noche a todos esos herejes con los preparativos”. Al día siguiente, 28 de febrero, “los reos desayunaron tazas de vino y rebanadas de pan frito con miel, y al terminar salieron de las cárceles del Santo Oficio. Iban caminando separadamente con su propio sambenito, sogá al cuello y en la mano una gran vela verde apagada, y acompañados por dos españoles, uno de cada lado, que los custodiaba” (González Obregón, 1979, pp. 141-147).

Pero además la sociedad civil hizo uso de la plaza no solamente para establecer sus negocios, sino también para celebrar algunos acontecimientos. Fue el caso de una “mascarada de caballeros” que se celebró el 25 de noviembre de 1576. A decir de Luis González Obregón, en esa mascarada los protagonistas lucieron “magníficas libreas, tan buenas que nunca se habían visto desde que se conquistó México; pasó a las ocho de la noche por la calle de San Bernardo y a las nueve por la Inquisición; y al día siguiente volvió a salir en la tarde, ‘entró a la plaza y corrieron los caballeros delante del señor virrey y la audiencia’” (González Obregón, 1979, p. 271).

Las primeras leyendas

En una atmósfera como la creada por un convento de frailes y una institución represora, no podían faltar las leyendas. Las primeras estuvieron relacionadas con los propios frailes dominicos y tuvieron tendencias moralizantes, casi siempre para favorecer el culto a la Virgen del Rosario. Algunas fueron relatadas por fray Juan de la Cruz y Moya en su *Historia de la Santa y Apostólica Provincia de Santiago de Predicadores de México*. El cronista cuenta que en el año de 1539, dos mujeres indígenas estuvieron a punto de ser víctimas de violación: una, doncella, fue agredida por sus dos pretendientes; la otra, viuda, por un cofrade del Rosario. Ambas se salvaron gracias a su devoción por el rosario que llevaban consigo, lo que movió a la Virgen a brindarles su protección. La doncella, “agradecida a favor de tan singular como el que había hecho su soberana protectora, la dio cordialísimas gracias y deseando emplearse en su servicio todos los días de su vida y quitarse de las ocasiones que ofrece el mundo, se entró en una de las casas de recogimiento que en aquel tiempo había en México para las indias nobles”. La viuda, por su parte, logró que su agresor cambiara su actitud hacia ella y su manera de pensar, así que él le ofreció disculpas por “el haberte yo escandalizado en palabras y obras, que te prometo el enmendarme en adelante, confesar mi culpa y hacer penitencia de ella”.

Otra leyenda, seguramente de finales del siglo XVI o principios del XVII, está relacionada con fray Agustín Dávila Padilla, autor de la *Historia de la Provincia de Santiago de México de la Orden de Predicadores*. Según relata don Artemio del Valle Arizpe, el fraile cronista era muy apuesto, por lo que una “dama principal, hermosa, rica y elegante” se enamoró de él, de manera que, un Viernes Santo, se presentó en su celda disfrazada de hermano dominico con la intención de seducirlo. “Y enseguida se abre el hábito y se muestra desnuda, ¡desnuda, Señor! Desnudez dorada y pagana que se aterciopela a la luz con espléndida opulencia de albaricoque maduro.” Ante la insistencia de aquella señora, el fraile acabó por arrancarse de la cintura el rosario que la ceñía y “empieza a azotar las carnes palpitantes de aquella incontenible mujer, que ni así se calma; antes bien, se enciende más abrasadora y terrible su sensualidad”. Sin embargo, se produjo el milagro.

Como pudo, fray Agustín salió de su celda y aquella dama principal, al ver marcada en su pecho lacerado la cruz del rosario del fraile, “arrepentida, llena de congoja, envuelta en su humilde sayal de penitente”, decidió profesar en el convento de la Concepción, “a sembrar allí, con lágrimas, frutos de penitencia” (Del Valle Arizpe, 2008, pp. 36-41).

Epílogo

Así nació la plaza de Santo Domingo. Su estructura urbana ha sobrevivido por siglos y, sin exageración alguna, ha sido testigo de la historia de México desde el siglo XVI, aunque sus vecinos, sus actividades y su forma de vida hayan cambiado a lo largo del tiempo. De hecho, la actual iglesia de Santo Domingo fue edificada a principios del siglo XVIII; los famosos portales, conocidos desde el siglo XIX como “de los Evangelistas”, fueron construidos en el siglo XVII, y el enorme edificio de enfrente, que durante mucho tiempo fue la Aduana y hoy forma parte de la Secretaría de Educación Públi-



Figura 5. Portales de Santo Domingo y fuente de la Corregidora. Foto: Martha Fernández.

ca, fue edificado en el siglo XVIII. En ese mismo tiempo se erigió en el centro de la plaza una fuente conocida como “del aguilita”, que en 1890 fue sustituida por otra que conservamos en la actualidad y que tiene al centro la imagen de la Corregidora, doña Josefa Ortiz de Domínguez. De hecho, éste es el nombre oficial de la plaza; sin embargo, todavía la conocemos como de Santo Domingo.

De los diversos claustros que tuvo el convento de los frailes, se mantienen arcos en el interior de varios edificios y vecindades de los alrededores; de las ruinas subsiste el espacio más importante que hoy alberga el Centro Cultural del México Contemporáneo, fundado por el Sindicato Nacional de Trabajadores de la Educación. Su portada la constituye lo que fue, en el siglo XVIII, el arranque y el desembarque de la escalera del claustro principal. Los arcos que se levantan en el costado poniente de la iglesia son una reconstrucción de la antigua portería del convento, realizada en el año de 1968, y detrás de ellos se encuentra una reproducción moderna de la antigua “fuente del aguilita”. Finalmente, el edificio que hoy ocupa el Museo de Medicina y Protomedicato de la UNAM, y que fue sede del Tribunal de la Inquisición, fue construido en el siglo XVIII por el arquitecto Pedro de Arrieta.

Es así que a través de sus cambios y de los diversos significados que con ellos se le han otorgado, la plaza de Santo Domingo se ha convertido en pieza fundamental de la memoria histórica de México.

Martha Fernández es investigadora del Instituto de Investigaciones Estéticas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y maestra en la Facultad de Filosofía y Letras de la misma institución. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, de la Academia Mexicana de Ciencias, del Comité Mexicano de Historia del Arte y del Comité Mexicano del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS). Ha escrito más de una docena de libros, publicado artículos en revistas especializadas y participado en gran cantidad de congresos internacionales. Entre sus publicaciones más recientes se encuentran: *La imagen del Templo de Jerusalén en la Nueva España* (Coordinación de Humanidades, UNAM, 2003), *Recintos parlamentarios* (Cámara de Senadores, 2010) y *Estudios sobre el simbolismo en la arquitectura novohispana* (Instituto de Investigaciones Estéticas, UNAM/Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2011). En 2013 obtuvo el Reconocimiento Sor Juana Inés de la Cruz y en 2014 recibió el Premio Universidad Nacional en el Área de Investigación en Artes, ambos otorgados por la UNAM.
marafermx@yahoo.com

Lecturas recomendadas

- Berlin-Neuhart, H. (1974), *Iglesia y convento de Santo Domingo en la Ciudad de México*, S. Montañón de Foncerrada (trad.), Upsala, Almqvist & Wiksell.
- Cervantes de Salazar, F. (1985), *México en 1554 y Tímulos Imperial*, 6a ed., E. O’Gorman (edición, prólogo y notas), México, Porrúa.
- De la Cruz y Moya, J. (1954), *Historia de la Santa y Apostólica Provincia de Santiago de Predicadores de México en la Nueva España*, 2 tomos, G. Saldívar (introducción e índices), México, Librería Manuel Porrúa.
- De la Maza, F. (1946), *Las piras funerarias en la historia y en el arte de México. Grabados, litografías y documentos del siglo XVI al XIX*, México, Imprenta Universitaria (Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas).
- De la Maza, F. (1968), “Bosquejo histórico de la plaza de Santo Domingo”, *Artes de México*, año XV, núm. 110.
- Del Valle Arizpe, A. (2008), *Historia, tradiciones y leyendas de las calles de México*, 2 tomos, G. Argueta (prólogo), México, Lectorum.

- González Obregón, L. (1979), *México viejo*, F. M. Hurtado (prólogo), México, Promexa Editores.
- Lazcano, M. E. (1978), *El templo de Santo Domingo de México*, tesis, México, Facultad de Filosofía y Letras-UNAM.
- Marroquí, J. M. (1969), *La Ciudad de México. Contiene: el origen de los nombres de muchas de sus calle y plazas, del de varios establecimientos públicos y privados, y no pocas noticias curiosas y entretenidas*, 3 vols., 2a ed. facsimilar, México, Jesús Medina Editor.
- Seminario de Historiografía de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional Autónoma de México (1970), *Guía de las Actas de Cabildo de la Ciudad de México. Siglo XVI*, E. O’Gorman (dir.), S. Novo (col.), México, Fondo de Cultura Económica.

Rodolfo Palomo Briones, Emilia Ríos del Toro, Luis Fernando Calderón Soto,
Ángela Patricia Bravo Vidales, Cintia Noemí Gómez Muñoz y Edén Ocegüera Contreras



Compuestos contaminantes de la atmósfera: ¿cuáles son **sus efectos**? y, sobre todo, ¿**cómo eliminarlos**?

La contaminación atmosférica es un problema mundial por sus efectos sobre el ambiente y la salud humana. Las medidas para controlar la emisión de gases de efecto invernadero y compuestos orgánicos volátiles, entre otros contaminantes, resultan muy complejas; sin embargo, existen otras alternativas para el tratamiento de los contaminantes atmosféricos, que además pueden brindar beneficios adicionales.



Introducción

La contaminación del aire es un problema ambiental que en los últimos años se ha convertido en una cuestión crítica para la salud humana. El Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) reporta que alrededor de 7 600 personas fallecen anualmente en el país a causa de las partículas contaminantes presentes en ambientes exteriores (IMCO, 2014). Anteriormente, la Secretaría de Salud reportó más de 6 700 muertes atribuibles a la mala calidad del aire, tanto en exteriores (al aire libre) como en interiores (dentro de casas, edificios, centros de trabajo, etc.). Tales números posicionan a la contaminación del aire como uno de los diez principales factores de riesgo en el país, apenas por detrás de las enfermedades cardiovasculares, la diabetes, el alcoholismo y el tabaquismo (Semarnat, 2006; Secretaría de Salud, 2005).

En el aspecto económico, la contaminación atmosférica es también un tema de relevancia. Las estimaciones indican que el impacto de la contaminación del aire sobre la productividad económica del país asciende a más de 5 000 millones de pesos. Adicionalmente, los gastos derivados de consultas y hospitalizaciones se estiman por encima de los 640 millones de pesos. En suma, la contaminación atmosférica tiene un costo anual de más de 5 600 millones de pesos (IMCO, 2014).





La contaminación del aire es un tema bien conocido en las principales ciudades del país, donde la población tiene una percepción generalmente mala sobre la calidad del aire y sus efectos en la salud. Por ejemplo, aproximadamente 84% de la población adolescente en la Ciudad de México considera que la contaminación del aire es alta o muy alta y, además, estima que es el segundo mayor problema que enfrenta su ciudad, tan sólo por debajo de la inseguridad, que se ubica en el primer puesto (Catalán-Vázquez *et al.*, 2009).

Sin embargo, aunque los centros urbanos son grandes puntos de emisión de contaminantes, la contaminación atmosférica no se genera exclusivamente en dichos asentamientos. Las zonas rurales también producen una gran diversidad de contaminantes atmosféricos, como el metano (CH_4) derivado de la ganadería o el bióxido de carbono (CO_2) y los compuestos aromáticos generados por el funcionamiento de tractores, camiones, cosechadoras, fertilizadoras, etcétera.

En realidad, está claro que la contaminación del aire no es un problema exclusivo de algunas regiones, países o ciudades. Por el contrario, es un problema global que puede afectar a una gran proporción de la población mundial, ya sea por el contacto directo con los contaminantes, o bien a través de alguno de los múltiples efectos en el clima que se explicarán más adelante.

En general, los contaminantes atmosféricos pueden agruparse en las siguientes categorías: aerosoles, par-

tículas suspendidas, compuestos inorgánicos, compuestos orgánicos y gases de efecto invernadero, entre otros. Desde luego, sería muy complicado e incluso tedioso comentarlos todos aquí, así que nos enfocaremos en dos grupos que son de gran importancia desde el punto de vista ambiental y de la salud humana.

Contaminantes y sus efectos

a) Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero son aquellos compuestos gaseosos que al acumularse en la atmósfera evitan que el calor proveniente del Sol escape del planeta y vuelva al espacio (Figura 1). Esto provoca que, con el tiempo, la temperatura media de la tierra se incremente (así como la de los océanos y la atmósfera) y con ello se acentúen ciertos fenómenos climáticos, como los huracanes y las sequías. El incremento de la temperatura, acompañado de un desequilibrio climatológico, derivaría también en cambios drásticos en los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Los gases más relevantes por su efecto invernadero son el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido de nitrógeno (N_2O), los fluorocarbonos y el vapor de agua. Sin embargo, no todos los gases de efecto invernadero son igualmente dañinos. Para hacer una comparación entre ellos y saber cuál tiene mayores

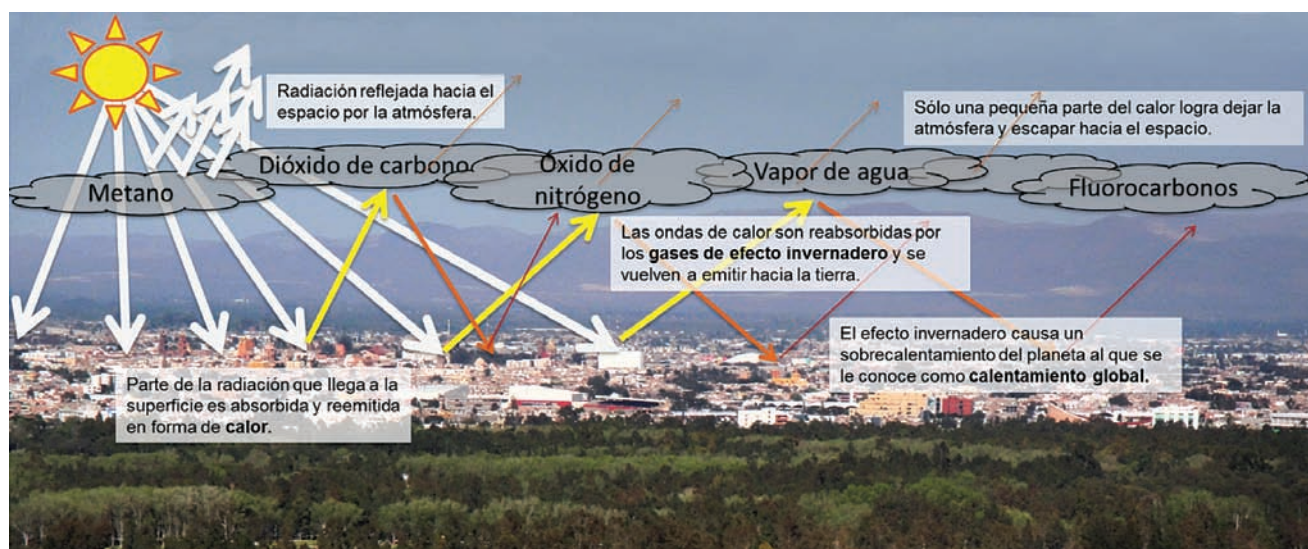


Figura 1. Efecto invernadero.

efectos en el equilibrio de la atmósfera, es necesario considerar dos características importantes: la capacidad de los gases para absorber energía y su tiempo de vida en la atmósfera antes de degradarse.

Con base en estas dos características es posible estimar que, por ejemplo, el potencial de calentamiento de un kilogramo de CH_4 emitido a la atmósfera es 21 veces más dañino que un kilogramo de CO_2 . El grupo más notable en este sentido es el de los fluorocarbonos (compuestos químicos orgánicos que contienen enlaces carbono-flúor). ¡Un kilogramo de estos compuestos puede causar el mismo daño que diez toneladas de CO_2 ! Afortunadamente, las regulaciones en muchos países –incluido México– ya prohíben su uso. Aunque, debido a su largo tiempo de vida, estos compuestos siguen en la atmósfera, no sólo reteniendo el calor, sino también destruyendo la capa de ozono (EPA, 2014; Quéré *et al.*, 2013).

En la Figura 2 se muestra un gráfico comparativo de los diferentes gases de efecto invernadero y sus efectos en el calentamiento global. El CO_2 se usa como base porque es un gas con un efecto específico (por kg) menor al resto; sin embargo, es considerado como el compuesto más importante por ser causante de más de 70% del efecto invernadero. Esto se debe a que el CO_2 es emitido en cantidades sumamente grandes. En 2012 la emisión de CO_2 fue de 9 700 millones de toneladas tan sólo de la quema de combustibles fósiles como la gasolina (Quéré *et al.*, 2013).

b) Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles son definidos como compuestos que tienen uno o más átomos de carbono en su estructura y que liberan vapores bajo condiciones normales de presión y temperatura (25 °C y 1 atm). Este grupo de contaminantes es particularmente extenso, con más de 180 sustancias registradas como peligrosas, como son: el acetaldehído, utilizado en la síntesis de plásticos, pinturas y solventes; el benceno, utilizado en la fabricación de plásticos y telas sintéticas; o el metanol, que es un subproducto de la fabricación de papel.

La importancia de este tipo de contaminantes atmosféricos radica principalmente en sus posibles efectos sobre la salud humana. Estos últimos pueden ir desde simple irritación de ojos, nariz y garganta; pasando por dolor de cabeza, náuseas y mareos; hasta problemas crónicos, como daños renales, del hígado, daños neuronales y cáncer. Algunos de estos problemas de salud están ilustrados en la Figura 3.

La exposición a este tipo de contaminantes puede ser más común de lo que podríamos imaginar, debido a que muchas fuentes de emisión de compuestos orgánicos volátiles se encuentran en los ambientes interiores de las casas habitación; por ejemplo, muebles de madera, pinturas, barniz para madera, limpiadores, desinfectantes, cosméticos, periódicos, calentadores de gas, estufas, impresoras y multifuncionales, entre muchos otros.

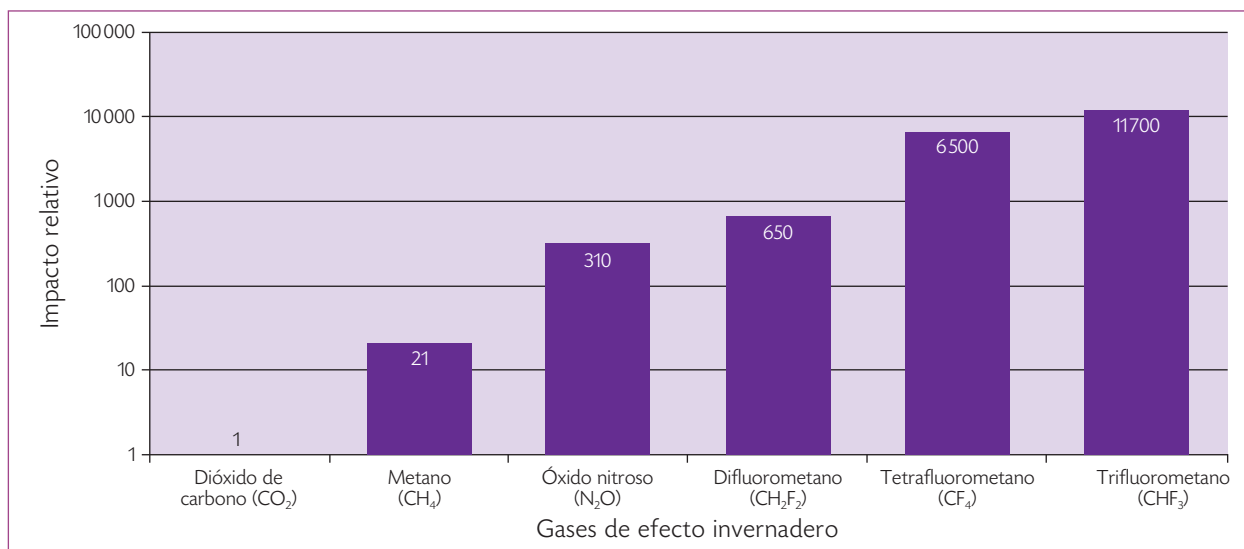


Figura 2. Comparativo del daño causado por los principales gases de efecto invernadero, si fueran emitidos en cantidades iguales.

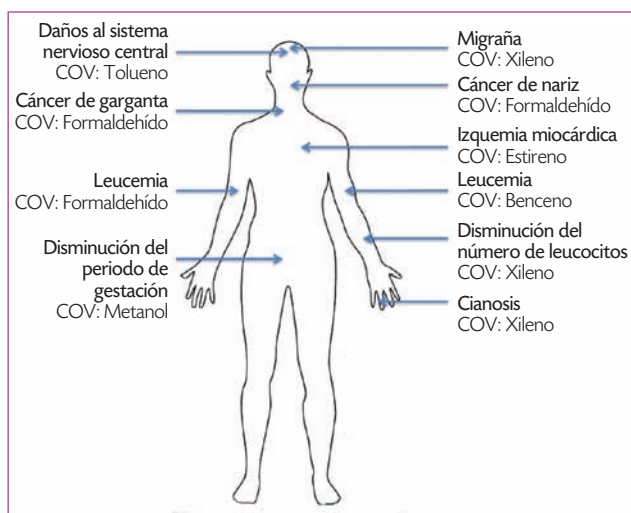


Figura 3. El cuerpo humano y las enfermedades causadas por los compuestos orgánicos volátiles (cov).

Es por esta razón, y por el hecho de que nuestras actividades se desarrollan principalmente en el hogar (aproximadamente dos terceras partes del tiempo), que el estudio de la contaminación en ese tipo de ambientes interiores ha cobrado mucha relevancia. Sin embargo, además del ambiente en el hogar, también es preocupante la situación de quienes realizan trabajos de pintura o decoración de manera regular, o quienes trabajan en las propias fábricas de los productos de pintura, limpieza y cosméticos enlistados en el párrafo anterior, así como de otros sectores como los combustibles. Otro grupo de interés son los trabajadores de oficina, que suelen pasar jornadas completas a escasos metros de impresoras y copiadoras con uso intenso.

Desde luego, no se pretende dar a entender que los compuestos orgánicos volátiles son la causa más importante de las enfermedades mencionadas anteriormente. Pero, sin duda, debemos considerarlas como sustancias potencialmente peligrosas y tomar las medidas preventivas necesarias. Probablemente, esas medidas incluirán la ventilación apropiada del hogar, lugares de trabajo y demás ambientes interiores, así como la utilización de mascarillas que limiten el ingreso de los contaminantes a las vías respiratorias.

Más allá de las medidas precautorias que podamos implementar, existen dos más para lograr controlar no sólo los compuestos orgánicos volátiles y gases de efecto invernadero, sino también otro tipo de contaminan-

tes que no hemos comentado en este escrito (por ejemplo, aerosoles, metales pesados, partículas suspendidas, entre otros): 1) evitar su producción y 2) efectuar su tratamiento. Por razones de complejidad, es mucho menos probable que se realice la primera opción que la segunda, al menos en el corto plazo. Por lo tanto, en la siguiente sección hablaremos brevemente sobre las alternativas para el tratamiento de contaminantes atmosféricos.

Dos tecnologías para el tratamiento

Las tecnologías para el tratamiento de los contaminantes atmosféricos pueden dividirse en dos tipos: tecnologías fisicoquímicas y tecnologías biológicas.

Las primeras se basan principalmente en la capacidad de ciertos materiales para atrapar en su superficie diversas sustancias contaminantes. El más conocido de estos materiales es, sin duda, el carbón activado, que es un material con un área superficial en el orden de los cientos de metros cuadrados por gramo. Esta característica permite utilizar una pequeña cantidad del material para atrapar un gran volumen de contaminante. Sin embargo, las tecnologías fisicoquímicas —como la adsorción en carbón activado— en el mediano plazo representan un gasto hasta seis veces mayor que su contraparte, las tecnologías biológicas (Estrada, 2014).

Las tecnologías biológicas, o biotecnologías, sustentan su funcionamiento en la utilización de microorganismos (por ejemplo, bacterias) que son capaces de consumir contaminantes. Para esto es necesario conocer de dónde se pueden extraer tales microorganismos, lo cual no es tarea sencilla. Comúnmente se recurre a microorganismos que se encuentran en la naturaleza y que viven en contacto con sustancias similares a las que se desea degradar. Para el caso del metano, por ejemplo, se utilizan microorganismos degradadores de metano que se encuentran normalmente en el suelo.

Posteriormente, los microorganismos seleccionados para degradar el contaminante de interés son introducidos en biorreactores, en los cuales tendrán las condiciones ideales para crecer y reproducirse: disponibilidad de vitaminas y minerales, temperatura apropiada, acidez adecuada y, sobre todo, una fuente vasta de carbono y energía. Generalmente, la fuente de carbono

y energía que se agrega al biorreactor es el compuesto contaminante que se busca degradar.

No obstante, las tecnologías biológicas enfrentan diferentes retos cuando trabajan bajo condiciones reales. Por ejemplo, el metano es un compuesto que puede degradarse por microorganismos mediante una ruta que es relativamente simple, pero para que ello ocurra es necesario que el metano pase del aire al líquido en donde se encuentran los microorganismos. Y este hecho es bastante difícil de alcanzar porque el metano es muy poco soluble. Otro problema es que en algunos sistemas biológicos, como los biofiltros, los microorganismos crecen hasta un punto en el que el filtro se tapa y entonces la circulación del aire se obstruye.

Estos problemas han sido abordados por los investigadores de maneras muy creativas. Para mejorar el transporte de los contaminantes poco solubles, como el metano y el benceno, algunos investigadores han sugerido utilizar aceite de silicón, un compuesto que no es soluble en agua pero que, en cambio, puede disolver a los contaminantes antes mencionados. Una vez disueltos en el aceite, los microorganismos entran en contacto con el contaminante y lo degradan.

En el caso de la acumulación de biomasa existen distintas alternativas, como la adición de sustancias

químicas que eliminan parte de la biomasa o, más recientemente, la adición de ozono. Esta última alternativa ha mostrado excelentes resultados al eliminar solamente a las sustancias extracelulares que se acumulan y no a las células, por lo que la eficiencia de los sistemas se mantiene sin alteración.

En conclusión, la remoción de contaminantes, aun bajo situaciones complicadas, puede llevarse a cabo. Sin embargo, la tarea se dificulta por el gran número de contaminantes que se emiten día con día, cada uno con diferentes propiedades. Los investigadores y tecnólogos trabajan para hacer frente a estos problemas, pero también sabemos que no todos los que generan la contaminación están dispuestos a implementar dichas tecnologías, porque de una forma u otra representan un gasto más para ellos. La solución está, al menos en parte, en la creación de regulaciones más estrictas en materia ambiental y en una adecuada aplicación de las mismas, pero ése es un tema político que hoy queda lejos de los alcances de este escrito.

Investigación en el IPICYT

En el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), ubicado en el estado de San





Luis Potosí, la doctora Sonia Arriaga investiga el uso de biofiltros para la eliminación de distintos compuestos contaminantes, como ácido sulfhídrico, metanol, formaldehído, hexano y tolueno. Además, en años recientes se ha buscado el desarrollo de tecnologías que ofrezcan no sólo el beneficio de degradar algún contaminante de la atmósfera, sino también el de generar productos derivados de la misma actividad biológica. Tal es el caso de la biofiltración acoplada a la producción de proteínas, en donde la tecnología de eliminación de un contaminante en fase gas (metanol) es acoplada a otra para la producción de una proteína de interés comercial. De este modo, el beneficio es doble: por un lado, la depuración de una corriente de gas contaminado y, por el otro, la generación de un producto con valor económico.

Prismatic es una asociación de estudiantes del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, dedicada a la elaboración de material escrito y audiovisual sobre temas de investigación científica en el mundo, con especial interés en la investigación de origen mexicano.

Rodolfo Palomo Briones es ingeniero bioquímico por el Instituto Tecnológico de Morelia, y maestro en Ciencias Ambientales por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Actualmente es estudiante de doctorado en Ciencias Ambientales en el IPICYT.
rodolfo.palomo@ipicyt.edu.mx

Esther Emilia Ríos del Toro es actualmente estudiante del doctorado en Ciencias Ambientales en el IPICYT. Su principal tema de interés es el ciclo del nitrógeno, en el que se encuentra el proceso Anammox, que es su tema de tesis.
esther.rios@ipicyt.edu.mx

Luis Fernando Calderón Soto es ingeniero en mecánica y maestro en biotecnología, ambos por la Universidad Politécnica de Pachuca. Actualmente es estudiante del doctorado en Control y Sistemas Dinámicos en el IPICYT.
luis.calderon@ipicyt.edu.mx

Ángela Patricia Bravo Vidales es ingeniera en mecánica por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Actualmente cursa la maestría en Control y Sistemas Dinámicos en el IPICYT.
angela.bravo@ipicyt.edu.mx

Cintia Noemí Gómez Muñoz es estudiante de doctorado en Biología Molecular en el IPICYT. Sus áreas de interés son la genómica de levaduras y la divulgación de la ciencia.
cintia.gomez@ipicyt.edu.mx

Edén Ocegüera Contreras es licenciado en Biomedicina por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, doctor en Ciencias en Biología Molecular en Medicina por la Universidad de Guadalajara y realizó una estancia posdoctoral en la División de Biología Molecular del IPICYT.
eden.oceguera@ipicyt.edu.mx

Lecturas recomendadas

- Catalán-Vázquez, M., H. Riojas-Rodríguez, E. Jarillo-Soto y H. Delgadillo-Gutiérrez (2009), "Percepción de riesgo a la salud por contaminación del aire en adolescentes de la Ciudad de México", *Salud Pública Mex.*, 51:148-156. Disponible en: <<http://bvs.insp.mx/rsp/articulos/articulo.php?id=002312>>.
- EPA (2014), *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. Disponible en: <<http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/calculator.html#results>>.
- Estrada, J. (2014), *Biotechnologías para el tratamiento de la contaminación atmosférica: superando las limitaciones de diseño y operación*, tesis de doctorado, España, Universidad de Valladolid. Disponible en: <<http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/4977/1/TESIS544-140623.pdf>>.
- IMCO (2014), *¿Cuánto nos cuesta la contaminación del aire en México?*, Instituto Mexicano para la Competitividad. Disponible en: <<http://imco.org.mx/calculadoraaire/>>.
- Quéré, G., R. Andrés, T. Boden *et al.* (2013), "Global Carbon Budget 1959-2011", *Earth System Science Data*, 5:165-185. Disponible en: <<http://www.earth-syst-sci-data.net/5/165/2013/essd-5-165-2013.pdf>>.
- Secretaría de Salud (2005), *Mexico Health Metrics Report*. México. Disponible en: http://sinais.salud.gob.mx/descargas/pdf/r05_tratoadecuado.pdf
- Semarnat (2006), *La gestión ambiental en México*, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06_otras/Gestion_Ambiental.pdf>.



LO NUESTRO

CORRESPONDENCIA

José de Jesús Medel Juárez y Consuelo Varinia García Mendoza

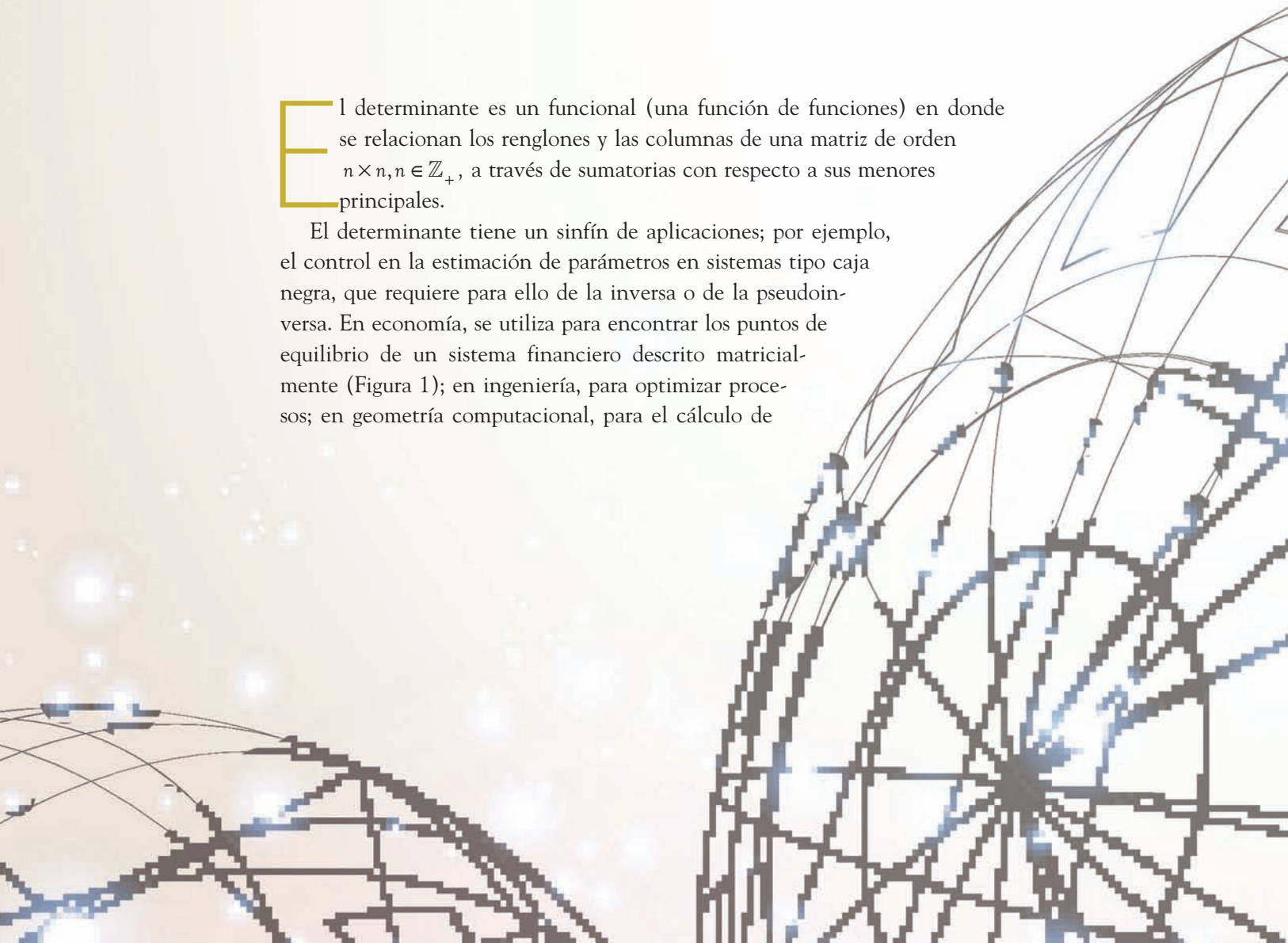


Historia del **DETERMINANTE**

En el área de las matemáticas, y otras afines, el determinante tiene un sinnúmero de aplicaciones; gracias a su versatilidad se puede conocer la relación de los estados de cualquier sistema. En esta reseña se presenta el desarrollo de la teoría de los determinantes, resultado del trabajo y las contribuciones de muchos científicos desde el siglo III antes de nuestra era.

El determinante es un funcional (una función de funciones) en donde se relacionan los renglones y las columnas de una matriz de orden $n \times n, n \in \mathbb{Z}_+$, a través de sumatorias con respecto a sus menores principales.

El determinante tiene un sinnúmero de aplicaciones; por ejemplo, el control en la estimación de parámetros en sistemas tipo caja negra, que requiere para ello de la inversa o de la pseudoinversa. En economía, se utiliza para encontrar los puntos de equilibrio de un sistema financiero descrito matricialmente (Figura 1); en ingeniería, para optimizar procesos; en geometría computacional, para el cálculo de

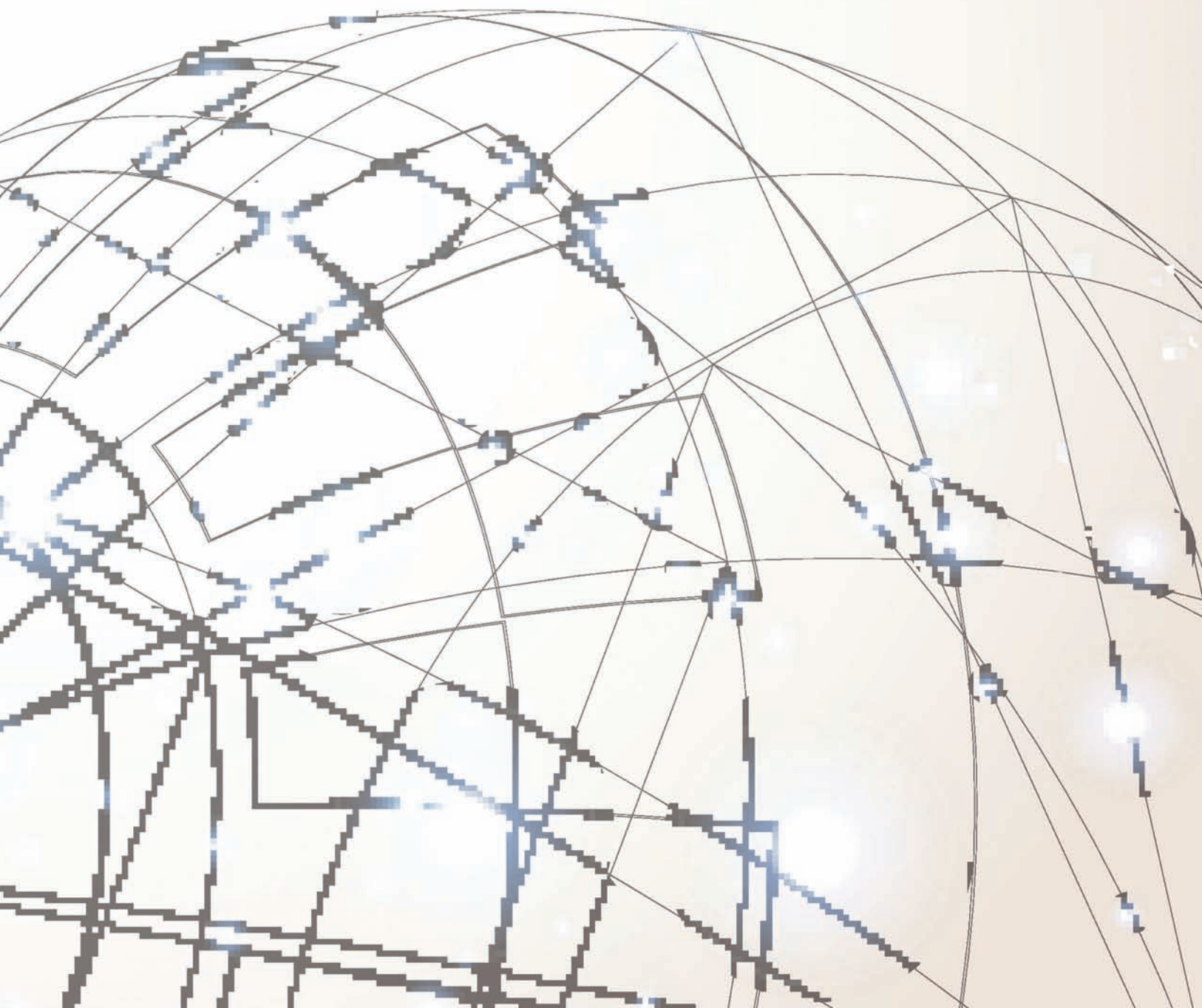


cascos convexos y diagramas de Voronoi (Figura 2). Y en general, en matemáticas se utiliza para saber si un sistema de ecuaciones tiene solución, en el cálculo de áreas y volúmenes (Figura 3), así como en la formulación de ecuaciones de objetos geométricos como rectas, círculos, elipses, parábolas, planos, esferas, etcétera.

La versatilidad de la teoría alrededor del determinante y sus múltiples aplicaciones nos permiten conocer la relación de los estados de cualquier sistema. Esta teoría es resultado del trabajo de muchos científicos desde el siglo III antes de nuestra era.

Aportaciones en Asia

La primera cultura de la que se tiene registro que incursionó en el planteamiento de sistemas de ecuaciones y su solución fue la china, ya que en ella se





desarrolló el interés por describir y resolver sistemas de ecuaciones relacionadas con la obtención de cuadrados mágicos. De ello dejaron registro en cañas de bambú encontradas en diferentes lugares con una tabla de

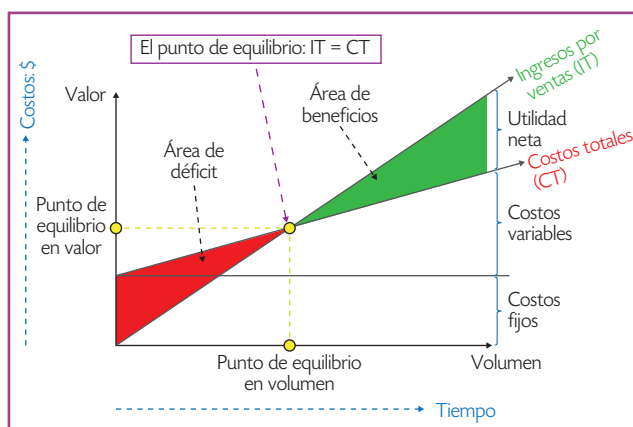


Figura 1. Puntos de equilibrio.

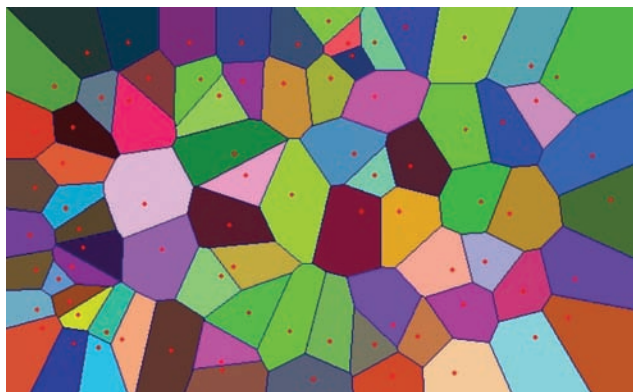


Figura 2. Diagramas de Voronoi.

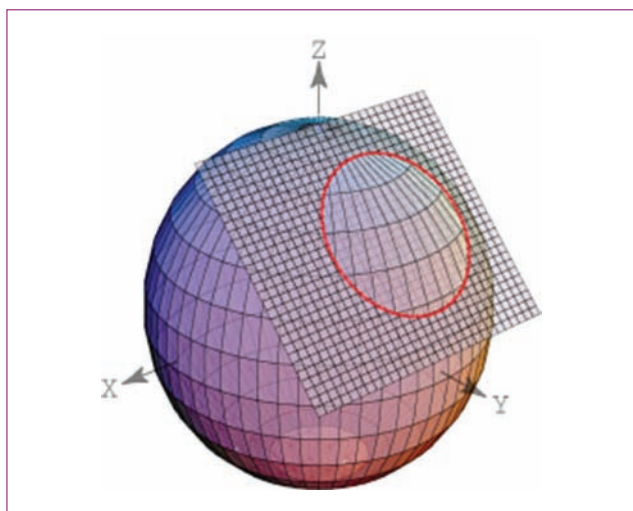


Figura 3. Volumen de una esfera.

cálculo con los coeficientes de las incógnitas de un sistema de ecuaciones lineales; restando filas y columnas, desarrollaron así una forma sencilla de resolver un sistema de ecuaciones. Otra evidencia de la incursión de dicha cultura en este tema se encuentra en el último problema del octavo capítulo del libro *Jiuzhang Suanshu* (Nueve capítulos del arte matemática) (Figura 4), escrito en el siglo III a. n. e., donde se plantea la resolución de un sistema de cuatro ecuaciones con cinco incógnitas.

La segunda cultura que abordó este tema fue la japonesa. Al matemático y samurái Seki Kowa (1642-1708) se le da el crédito por la invención de los determinantes. Seki emprendió estudios sobre la teoría de las ecuaciones según los métodos de los matemáticos chinos. En 1683 introdujo el tema de los determinantes en el *Kai Fukundai no Ho* (Método de solución de problemas Fukundai). Con el proceso llamado *tatmu*, derivó las ecuaciones lineales de dos ecuaciones cuadráticas y encontró su determinante. También simplificó determinantes de grado mayor a 2 al identificar el factor co-

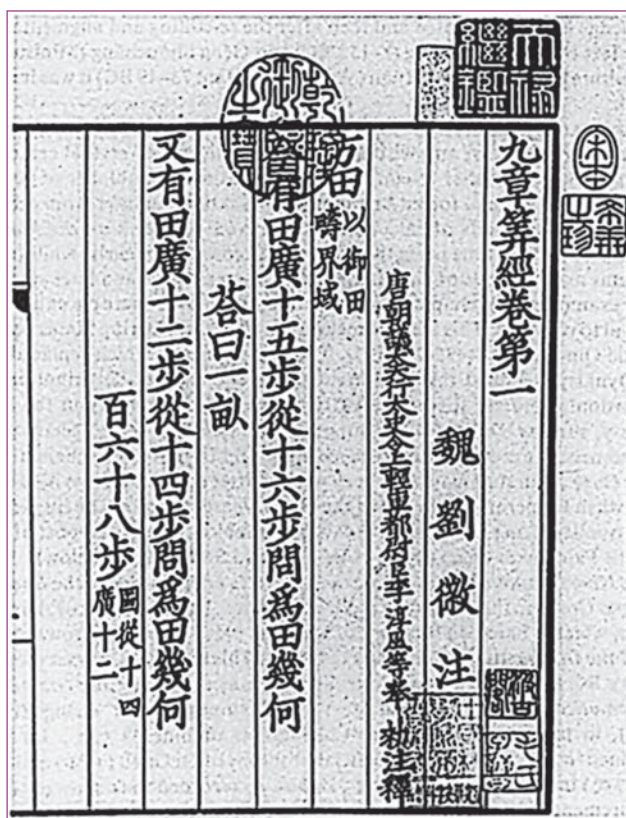


Figura 4. Una página de Nueve capítulos del arte matemática.

mún de una determinada fila. Seki formuló el concepto de *determinante* y estableció muchas de sus propiedades, así como la forma de describir qué términos son positivos y cuáles son negativos en la expansión a través de sus menores principales.

Aportaciones en Europa

En Europa, los determinantes aparecieron en la literatura matemática más de un siglo antes que las matrices. El término *matriz* fue usado por primera vez por James Joseph Sylvester (1814-1897).

El 28 de abril de 1693, el diplomático y filósofo alemán Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) escribió una carta a Guillaume François Antoine (1661-1704), marqués de l'Hôpital, en la que resolvía el sistema de ecuaciones (1), (2) y (3).

$$10 + 11x + 12y = 0 \quad (1)$$

$$20 + 21x + 22y = 0 \quad (2)$$

$$30 + 31x + 32y = 0 \quad (3)$$

Describió la disposición de los coeficientes de (1), (2) y (3) con números con subíndices. El número indica la ecuación a la que pertenece y el subíndice señala el elemento dentro de la ecuación, como se observa en (4).

$$\begin{array}{ccc} 1_0 & 1_1 & 1_2 \\ 2_0 & 2_1 & 2_2 \\ 3_0 & 3_1 & 3_2 \end{array} \quad (4)$$

Esto corresponde término a término entre (1), (2), (3) a (4), como se observa en (5).

$$\begin{array}{l} 1_0 = 10, 1_1 = 11, 1_2 = 12; \\ 2_0 = 20, 2_1 = 21, 2_2 = 22; \\ 3_0 = 30, 3_1 = 31, 3_2 = 32. \end{array} \quad (5)$$

Para explicar lo que hizo Leibniz, en (6) se desarrolla de manera ampliada.

$$\begin{array}{ccccccc} 1_0 & 1_1 & 1_2 & 1_0 & 1_1 & 1_2 \\ 2_0 & 2_1 & 2_2 & 2_0 & 2_1 & 2_2 \\ 3_0 & 3_1 & 3_2 & 3_0 & 3_1 & 3_2 \end{array} \quad (6)$$

El producto en (6) se describe a continuación:

$$1_0 * 2_1 * 3_2 + 1_1 * 2_2 * 3_0 + 1_2 * 2_0 * 3_1 - 3_0 * 2_1 * 1_2 - 3_1 * 2_2 * 1_0 - 3_2 * 2_0 * 1_1.$$

Y corresponden (7) a (6) con respecto a las ecuaciones (1), (2) y (3).

$$10 * 21 * 32 + 11 * 22 * 30 + 12 * 20 * 31 - 30 * 21 * 12 - 31 * 22 * 10 - 32 * 20 * 11 = 0. \quad (7)$$

Leibniz identificó que los productos señalados con las flechas hacia abajo (color azul) eran equivalentes a los productos de las flechas hacia arriba (color rojo). Concluyó que existen una x y una y que satisfacen a (1), (2) y (3), con lo que proporcionó la noción de la descripción del determinante por permutaciones que actualmente se utiliza.

En 1748, dos años después de la muerte del matemático británico Colin Maclaurin (1698-1746), se publicó su tratado de álgebra, donde exponía la resolución de sistemas de dos y tres ecuaciones con el mismo número de incógnitas; así llegó a lo que hoy conocemos como el determinante de segundo y tercer grado.

Por su parte, el matemático suizo Gabriel Cramer (1704-1752) publicó en 1750 el tratado de geometría *Introducción al análisis de las líneas curvas algebraicas* (Figura 5), donde proponía la solución de sistemas de ecuaciones lineales con el mismo número de incógnitas y ecuaciones. El método es similar al publicado en el tratado de álgebra de Maclaurin, pero es más conocido por su claridad de notación y generalización.

Cramer desarrolló la notación de ecuaciones lineales de acuerdo con (8), donde se representan los coeficientes como letras con superíndices y donde las letras mayúsculas indican la columna y el superíndice, el renglón.

$$\begin{array}{l} A^1 = Z^1z + Y^1y + X^1x + V^1v + \dots \\ A^2 = Z^2z + Y^2y + X^2x + V^2v + \dots \\ A^3 = Z^3z + Y^3y + X^3x + V^3v + \dots \end{array} \quad (8)$$

Utilizando esta notación, propuso la solución del sistema de ecuaciones (9) y (10) a través de (11) y (12); al igual que el de (13), (14) y (15) por medio de (16), (17) y (18).

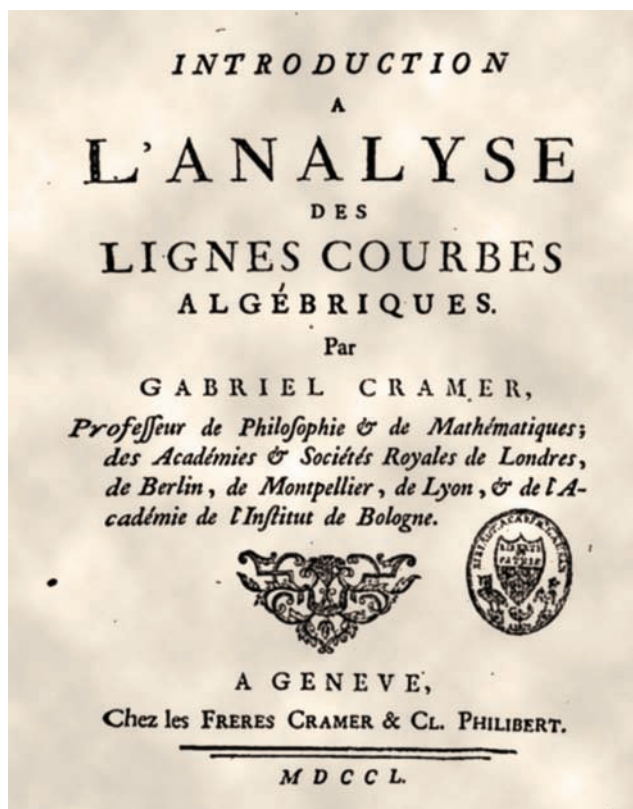


Figura 5. Tratado de geometría de Cramer (1750).

$$A^1 = Z^1z + Y^1y \quad (9)$$

$$A^2 = Z^2z + Y^2y \quad (10)$$

$$z = \frac{A^1Y^2 - A^2Y^1}{Z^1Y^2 - Z^2Y^1} \quad (11)$$

$$y = \frac{Z^1A^2 - Z^2A^1}{Z^1Y^2 - Z^2Y^1} \quad (12)$$

$$A^1 = Z^1z + Y^1y + X^1x \quad (13)$$

$$A^2 = Z^2z + Y^2y + X^2x \quad (14)$$

$$A^3 = Z^3z + Y^3y + X^3x \quad (15)$$

$$z = \frac{A^1Y^2X^3 - A^1Y^3X^2 - A^2Y^1X^3 + A^3Y^1X^2 + A^2Y^3X^1 - A^3Y^2X^1}{Z^1Y^2X^3 - Z^1Y^3X^2 - Z^2Y^1X^3 + Z^2Y^3X^1 + Z^3Y^1X^2 - Z^3Y^2X^1} \quad (16)$$

$$y = \frac{Z^1A^2X^3 - Z^1A^3X^2 - Z^2A^1X^3 + Z^3A^1X^2 + Z^2A^3X^1 - Z^3A^2X^1}{Z^1Y^2X^3 - Z^1Y^3X^2 - Z^2Y^1X^3 + Z^2Y^3X^1 + Z^3Y^1X^2 - Z^3Y^2X^1} \quad (17)$$

$$x = \frac{Z^1Y^2A^3 - Z^1Y^3A^2 - Z^2Y^1A^3 + Z^3Y^1A^2 + Z^2Y^3A^1 - Z^3Y^2A^1}{Z^1Y^2X^3 - Z^1Y^3X^2 - Z^2Y^1X^3 + Z^2Y^3X^1 + Z^3Y^1X^2 - Z^3Y^2X^1} \quad (18)$$

De esta forma se resuelve un sistema de ecuaciones lineales con el mismo número de incógnitas y ecuaciones.

En 1771 Alexandre-Théophile Vandermonde (1735-1796) realizó la primera exposición lógica y formal de la teoría de los determinantes, reconociéndolos como funciones independientes. Describió la matriz –que ahora lleva su nombre– como la matriz cuadrada (19).

$$V_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_1^0 & a_2^0 & a_3^0 & a_4^0 & \cdots & a_n^0 \\ a_1^1 & a_2^1 & a_3^1 & a_4^1 & \cdots & a_n^1 \\ a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 & a_4^2 & \cdots & a_n^2 \\ a_1^3 & a_2^3 & a_3^3 & a_4^3 & \cdots & a_n^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1^n & a_2^n & a_3^n & a_4^n & \cdots & a_n^n \end{bmatrix} \quad (19)$$

Los elementos de la matriz (19) son descritos de la forma $a_{\text{columna}}^{\text{ renglón}}$; es decir, se utilizan los subíndices y superíndices para indicar la disposición de cada elemento en la matriz $V_{n \times n}$. De tal forma, el determinante de la matriz (19) es descrito en (20).

$$\prod_{i=1}^{n-1} (a_j - a_i) \quad (20)$$

Para clarificar este método, daremos un ejemplo. Supongamos que se quiere encontrar el determinante de la matriz descrita en (21).

$$A_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a_1^1 & a_2^1 & a_3^1 \\ a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

De acuerdo con lo que escribió Vandermonde, el determinante en (21) es descrito por el producto de los



binomios en (22), donde se cumple que $i = 1, (n-1)$ sea para $j > 1$ y $j \uparrow n \in \mathbb{Z}_+$, de acuerdo con (20).

$$|A| = (a_2 - a_1)(a_3 - a_1)(a_3 - a_2) \quad (22)$$

Al desarrollar (22), se tiene (23), que equivale a calcular el determinante por sus menores.

$$|A| = a_3^2 a_2^1 - a_2^2 a_3^1 - a_3^2 a_1^1 + a_1^2 a_3^1 + a_2^2 a_1^1 - a_1^2 a_2^1 \quad (23)$$

Ahora para la matriz $|A|_{2 \times 2}$:

$$|A|_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} a_1^0 & a_2^0 \\ a_1^1 & a_2^1 \end{bmatrix}$$

Su menor, que en este caso corresponde al determinante de la matriz $A_{2 \times 2}$, está descrito en (24).

$$|A| = (a_1 - a_2)(a_1 - a_0) \quad (24)$$

Al desarrollar, el producto de (24) corresponde a (25).

$$|A| = a_1^0 a_2^1 - a_1^1 a_2^0 \quad (25)$$

En el caso del sistema (1), (2) y (3), éste corresponde al sistema (26).

$$\begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 \\ 20 & 21 & 22 \\ 30 & 31 & 32 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Si consideramos que:

$$A = \begin{bmatrix} 10 & 11 & 12 \\ 20 & 21 & 22 \\ 30 & 31 & 32 \end{bmatrix}$$

y su determinante descrito con (23), se tiene (27).

$$|A| = (32)(21) - (22)(31) - (20)(32) + (22)(31) + (31)(20) - (20)(31) \quad (27)$$

El resultado de (27) es $|A| = 0$.

En 1772 Pierre-Simon Laplace (1749-1827) generalizó el método de Vandermonde para el desarrollo de

los determinantes en productos de menores, y presentó el método general de la expansión de un determinante en términos de sus menores complementarios.

Al año siguiente Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813) expuso la solución de determinantes de segundo y tercer orden y los utilizó para fines distintos al de la solución de ecuaciones simultáneas.

En 1801 Carl Friedrich Gauss (1777-1855) utilizó la palabra *determinante* en su teoría de números. Se refirió al *discriminante cuántico*, con lo que se acercó al teorema de multiplicación de determinantes. Para 1812, Jacques Philippe Marie Binet (1786-1856) presentó en la Academia de Ciencias de Francia un artículo con el teorema de la multiplicación de determinantes. El mismo día, el también matemático francés Agustin Louis Cauchy (1789-1857) publicó en la misma academia un artículo sobre el mismo teorema. Utilizaba la palabra *determinante* de Gauss en su sentido actual, con lo que mejoró la notación, y presentó una prueba más satisfactoria que la de Binet.

En 1815 Cauchy publicó una memoria en la que mejoraba el desarrollo de Laplace; en ella proporcionaba la primera exposición sistemática de los determinantes mediante la disposición de los elementos en filas y columnas y la notación de los índices dobles a_i^j , así como con el término *ecuación característica* para $p(\lambda) = 0$, donde p representa un polinomio característico matricial. En esa memoria se encuentran numerosos teoremas generales, como el de la multiplicación de los determinantes descrito en (28).

$$|a_i^j| \cdot |b_i^j| = |c_i^j| \quad (28)$$

donde $|a_i^j|$ y $|b_i^j|$ son determinantes de orden n y

$$c_i^j = \sum_k a_i^k b_k^j.$$

El término de fila i y columna j del producto es la suma de los productos de los elementos correspondientes de la fila i de $|a_i^j|$ y de la columna j de $|b_i^j|$. Así, Cauchy mejoró el desarrollo de Laplace de los determinantes.

En 1829 el matemático alemán Carl Gustav Jakob Jacobi (1804-1851) utilizó por primera vez los determinantes funcionales, que más tarde fueron llamados *jacobianos* por Sylvester en sus memorias del *Journal*



Crelle en 1841. Sylvester también contribuyó al estudio de los determinantes de una manera continua durante más de 50 años. Una de sus aportaciones principales a esta teoría consiste en un método más eficaz para eliminar la incógnita de dos ecuaciones polinómicas de grados n y m .

Veamos ahora el sistema descrito en (29), (30) y (31).

$$4x + 7y + 3z = -6 \quad (29)$$

$$7x + 3y + 6z = 0 \quad (30)$$

$$x + 5y + 9z = -1 \quad (31)$$

Éste se ve en forma matricial en (32).

$$\begin{bmatrix} 4 & 7 & 3 \\ 7 & 3 & 6 \\ 1 & 5 & 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -6 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Lo que se puede ver simbólicamente en (33).

$$[A]_{r=3 \times c=3} [C]_{r=3 \times c=1} = [B]_{r=3 \times c=1} \quad (33)$$

En (33) r indica el número de renglón; y c , el número de columna de cada matriz.

El sistema (29), (30) y (31), representado matricialmente en (32), tiene solución si el determinante de $[A]$ es diferente de 0 (se escribe simbólicamente como $\det[A] \neq 0$), ya que la inversa de $[A]$ para encontrar al vector $[X]$ está definida por el cociente de la adjunta de $[A]$ (que simbólicamente es $\text{Adj}[A]$) con respecto al determinante de $[A]$; es decir, $\frac{\text{Adj}[A]}{\det[A]}$, en donde la matriz adjunta está definida por la matriz transpuesta de la matriz de cofactores ($\text{Adj}[A] = (\text{Cof}[A])^T$) y la matriz de cofactores $\text{Cof}[A]$ se construye a través de los determinantes de los menores de $[A]$. Cada menor de la matriz $[A]$ se describe en (34); se indica con r al renglón y con c a la columna, en ambos casos, tomando en cuenta la ubicación del menor considerado.

$$\begin{bmatrix} [(-1)^{r=1+c=1}] \det \begin{bmatrix} 3 & 6 \\ 5 & 9 \end{bmatrix} & [(-1)^{r=1+c=2}] \det \begin{bmatrix} 7 & 6 \\ 1 & 9 \end{bmatrix} & [(-1)^{r=1+c=3}] \det \begin{bmatrix} 7 & 3 \\ 1 & 5 \end{bmatrix} \\ [(-1)^{r=2+c=1}] \det \begin{bmatrix} 7 & 3 \\ 5 & 9 \end{bmatrix} & [(-1)^{r=2+c=2}] \det \begin{bmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 9 \end{bmatrix} & [(-1)^{r=2+c=3}] \det \begin{bmatrix} 4 & 7 \\ 1 & 5 \end{bmatrix} \\ [(-1)^{r=3+c=1}] \det \begin{bmatrix} 7 & 3 \\ 3 & 6 \end{bmatrix} & [(-1)^{r=3+c=2}] \det \begin{bmatrix} 4 & 3 \\ 7 & 6 \end{bmatrix} & [(-1)^{r=3+c=3}] \det \begin{bmatrix} 4 & 7 \\ 7 & 3 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (34)$$

De donde (34) se reduce a la forma (35).

$$\begin{bmatrix} [(-1)^2](-3) & [(-1)^3](57) & [(-1)^4](32) \\ [(-1)^3](48) & [(-1)^4](33) & [(-1)^5](13) \\ [(-1)^4](54) & [(-1)^5](3) & [(-1)^6](-37) \end{bmatrix} \quad (35)$$

Y la matriz de cofactores (35) se reduce aún más considerando los signos con sus exponentes, como se observa en (36).

$$\text{Cof}[A] = \begin{bmatrix} -3 & -57 & 32 \\ -48 & 33 & -13 \\ 54 & -3 & -37 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Ahora la matriz adjunta es la transpuesta de la matriz de cofactores, como se observa en (37).

$$\text{Adj}[A] = \begin{bmatrix} -3 & -48 & 54 \\ -57 & 33 & -3 \\ 32 & -13 & -37 \end{bmatrix} \quad (37)$$

De acuerdo con (32), el determinante de A se describe por los menores principales y sus coeficientes, en (38).

$$\begin{aligned} \det(A) &= [(-1)^{r=1+c=1}] * 4 * \det \begin{bmatrix} 3 & 6 \\ 5 & 9 \end{bmatrix} + \\ & [(-1)^{r=1+c=2}] * 7 * \det \begin{bmatrix} 7 & 6 \\ 1 & 9 \end{bmatrix} + \\ & [(-1)^{r=1+c=3}] * 3 * \det \begin{bmatrix} 7 & 3 \\ 1 & 5 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (38)$$

Esto da como resultado -315 unidades. Al realizar la división de (37) con respecto a (38), se tiene la inversa de la matriz $[A]$ en (39).

$$\text{Inv}[A]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.0095 & 0.1524 & -0.1714 \\ 0.1810 & -0.1048 & 0.0095 \\ -0.1016 & 0.0413 & 0.1175 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Y al multiplicar a (39) por el vector

$$[b]_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} -6 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

se tiene la solución del sistema planteado en (32), en donde $[X]_{3 \times 1} = \text{inv}[A]_{3 \times 3}[b]_{3 \times 1}$, y da como resultado el descrito en (40).

$$\begin{bmatrix} x^3 \\ x^2 \\ x \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} 0.1143 \\ -1.0952 \\ 0.7270 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Sylvester encontró que si el determinante de (38) era nulo, era condición necesaria y suficiente para que el sistema de ecuaciones (29), (30) y (31), descrito en (32), matemáticamente tuviera una raíz en común.

Entre las aportaciones de Arthur Cayley (1821-1895), fundador de la teoría de las matrices, se encuentra la notación de matrices que actualmente utilizamos, la matriz nula y unitaria, y la inversa de una matriz. Con su trabajo enriqueció la teoría de los determinantes. Durante el último cuarto del siglo XIX, el matemático británico Charles Lutwidge Dogson (1832-1898) —mejor conocido por el seudónimo de Lewis Carroll— y algunos otros estudiosos, también enriquecieron la teoría de los determinantes con operaciones numéricas, así como con resultados nuevos y complementarios a los ya desarrollados por sus antecesores.

José de Jesús Medel Juárez es doctor en Ciencias en Control Automático, egresado del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav-IPN), unidad Distrito Federal. Es ingeniero aeronáutico por la Escuela Superior de Ingenieros Mecánicos y Eléctricos (ESIME-IPN), unidad Ticomán. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores y de la Academia Mexicana de Ciencias. Ha sido reconocido por *Who's Who* en Ciencias y en Ingeniería. Actualmente tiene tres patentes de su autoría, otorgadas por el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial; cuenta con una gran variedad de artículos de investigación incluidos en diversos índices; ha publicado libros, impartido conferencias y graduado a más de 35 alumnos, entre maestros y doctores. Es Profesor Investigador del IPN, adscrito al Centro de Investigación en Computación. Sus temas de investigación son el filtrado digital, el control automático, la lógica difusa y la integración entre ellas.

jjmedelj@yahoo.com.mx

Consuelo Varinia García Mendoza es ingeniera en sistemas computacionales por la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Obtuvo su maestría y doctorado en Tecnología Avanzada por el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN, unidad Legaria. Actualmente es profesora de la Escuela Superior de Cómputo del IPN. Su tema de investigación es el filtrado digital de señales y sistemas de información. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

consuelo.varinia@gmail.com

Lecturas recomendadas

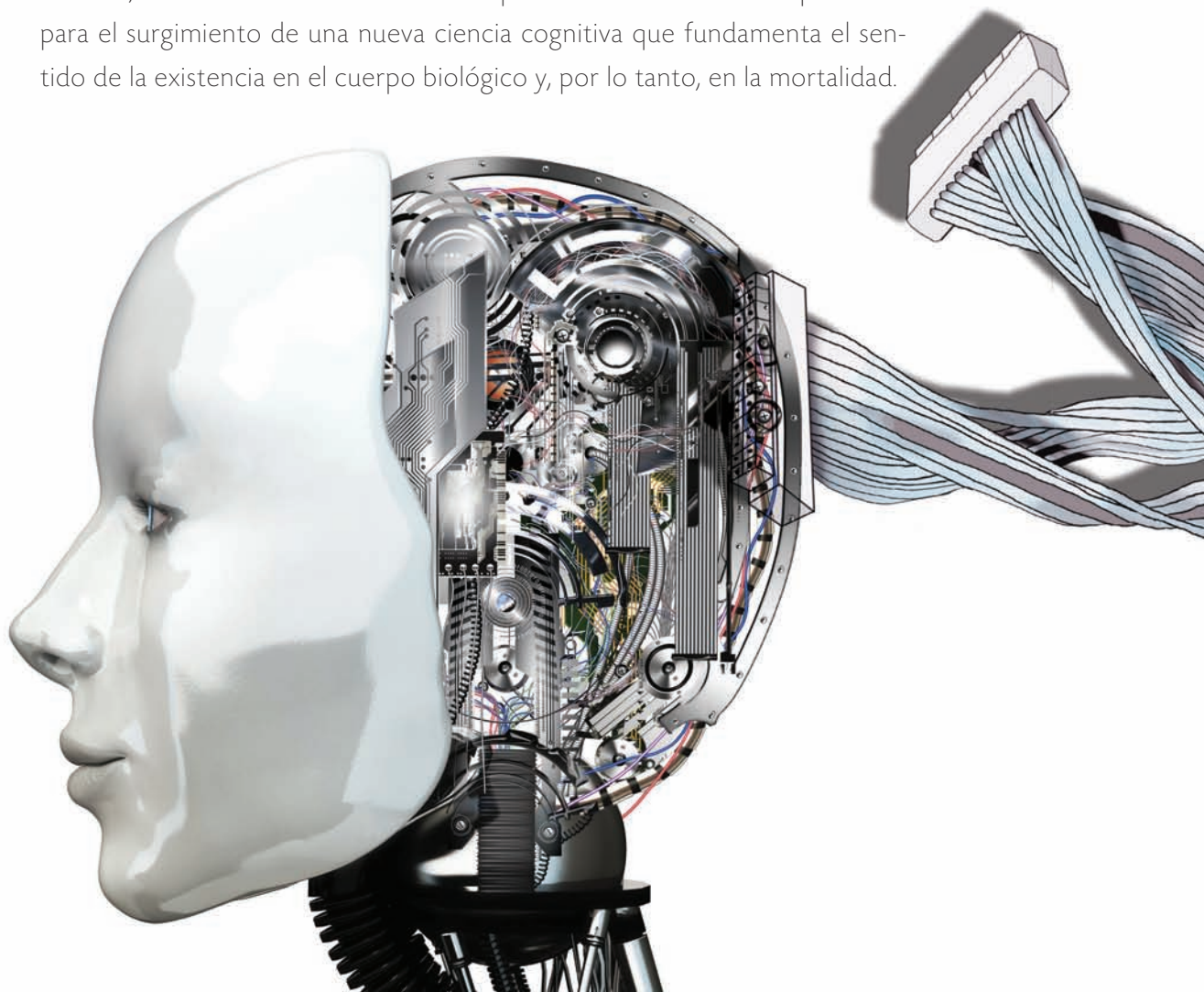
- Cajori, F. (2007), *A History of Mathematical Notations*, Nueva York, Cosimo, pp. 87-105.
- Collete, J. P. (1993), *Historia de las matemáticas*, vol. 2, Madrid, Siglo XXI Editores.
- Cullen, Ch. (2007), "The Suàn shù sh, 'Writings on reckoning': Rewriting the history of early Chinese mathematics in the light of an excavated manuscript", *Historia Mathematica*, 34(1):10-44.
- Pla I Carrera, J. (2009), *Liu Hui: Nueve capítulos de la matemática china*, Madrid, Nivola.
- Weld, L. G. (1906), *Determinants*, Nueva York, John Wiley & Sons.

Tom Froese



De la **cibernética** a la nueva **ciencia cognitiva**

El cibernético mexicano Rosenblueth y sus colegas Wiener y Bigelow argumentaban que el comportamiento dirigido a metas puede ser explicado por la retroalimentación negativa. Esta propuesta revolucionaria implicaba que nuestra experiencia al actuar intencionadamente podía hacerse compatible con una visión del mundo estrictamente científica, en la cual la naturaleza física no sigue ningún propósito. Años después, Wiener fundaría la cibernética bajo el principio de *autogobierno*, por ejemplo, con el uso de “bucles” de retroalimentación negativa para el control de máquinas. Sin embargo, los seres vivos no sólo son autogobernantes, sino que también, a través del metabolismo, son individuos físicamente autoproductivos. Esto es de importancia para el surgimiento de una nueva ciencia cognitiva que fundamenta el sentido de la existencia en el cuerpo biológico y, por lo tanto, en la mortalidad.

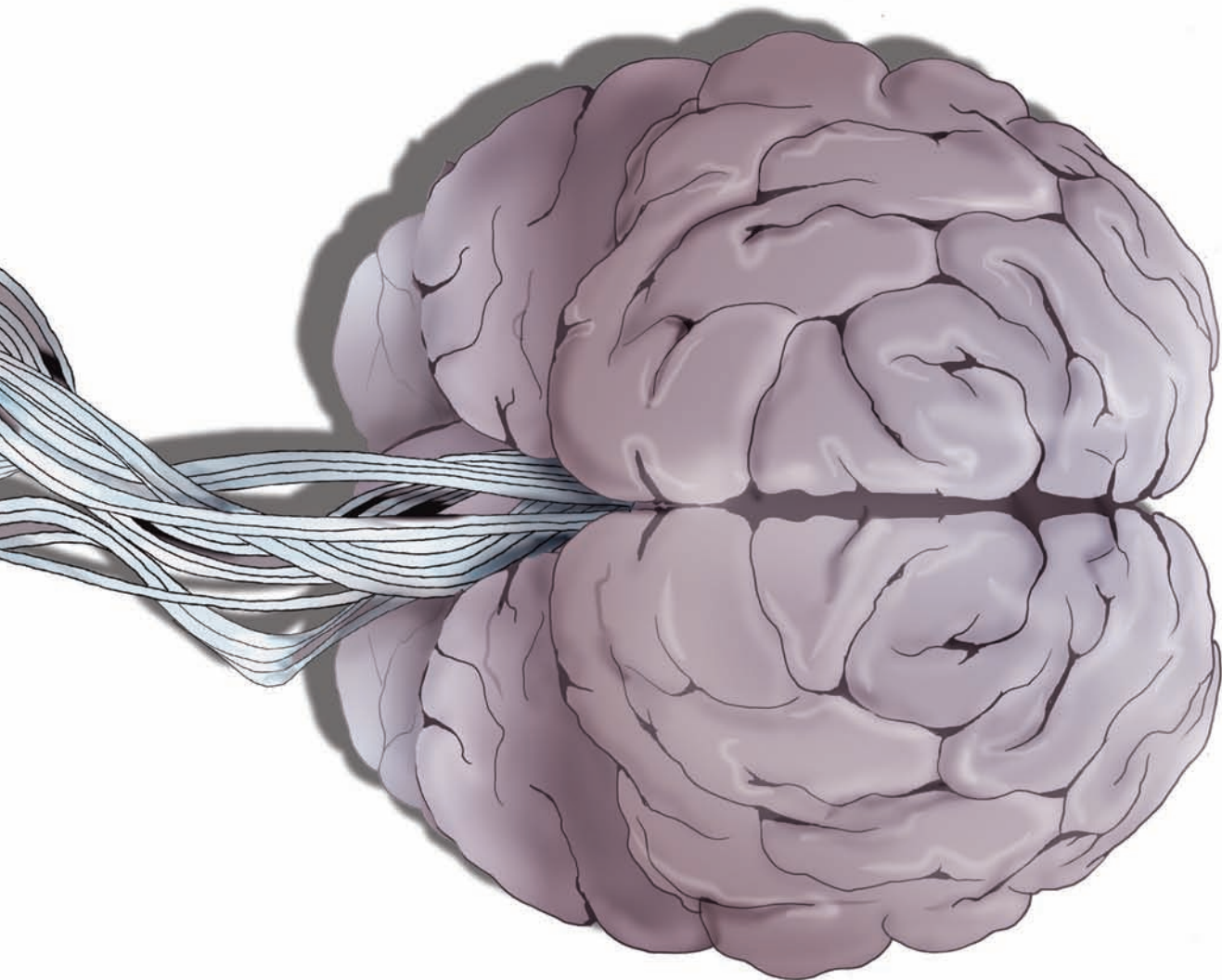


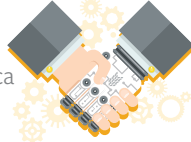
Introducción

En 1943 Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener y Julian Bigelow publicaron uno de los artículos científicos más famosos de la época (Rosenblueth *et al.*, 1943). Su contribución fue parte fundacional de una agrupación de investigadores increíblemente transdisciplinaria que desde 1948 se denominaría *cibernética*, en seguimiento a la propuesta hecha por Wiener. El artículo presentaba un análisis teórico del comportamiento orientado a una meta y sobre cómo éste se manifiesta en todos los seres vivos y también en algunos dispositivos diseñados para actuar automáticamente.

La gran innovación fue acercar la ciencia, con sus métodos y teorías, al estudio del fenómeno psicológico y subjetivo de seguir un fin u objetivo. En general, las metas son asociadas a condiciones de satisfacción y de la posibilidad de fracaso, algo que no se aplica a fenómenos del dominio de la física pura, como por ejemplo, la trayectoria de un planeta. Con base en la aplicación de la teoría de la retroalimentación negativa, Rosenblueth y sus colegas fueron más allá del reduccionismo clásico para fundar el estudio de la mente como tal. Éste fue un paso importante para superar el gran reto de investigar la relación mente-cuerpo.

Sin embargo, en retrospectiva, la aplicación de la teoría de la retroalimentación negativa era demasiado general. No existe duda de que podemos experimentar en nosotros mismos el fenómeno de tener metas propias y de preocuparnos





por su éxito; ¿pero qué tal un termostato diseñado para mantener la temperatura por medio de la retroalimentación negativa? ¿Es correcto decir que el termostato también tiene fines propios, o bien fines *intrínsecos*, como dijeron Rosenblueth y sus colegas? Algunos investigadores en el campo de la inteligencia artificial contemporánea siguen estando de acuerdo en que no hay ninguna diferencia esencial entre un termostato y un ser vivo (incluidos los seres humanos). Sin embargo, un movimiento importante en la nueva ciencia cognitiva –a veces llamado *enactivismo*, el cual sigue la propuesta del biólogo chileno Francisco Varela y sus colegas (1992)– plantea que existen diferencias fundamentales que separan la organización de los seres vivos y la de los sistemas que son definidos básicamente por la retroalimentación negativa.

Desde la década de 1970, los biólogos chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela han destacado que los seres vivos deben estar definidos como seres *autopoieticos* (su término *autopoiesis* equivale a *autoproducción*) (Maturana y Varela, 1973). Además, según el nuevo enactivismo –por la necesidad de crear y mantener constantemente su organización física y evitar la desintegración y la muerte–, un organismo también genera una perspectiva de preocupación sobre su ambiente, con lo cual se ubica en un mundo significativo. En este sentido, la nueva ciencia cognitiva argumenta que solamente los seres vivos tienen fines propios de una manera intrínseca y subjetiva. La implicación es que somos más que nuestras máquinas porque somos individuos mortales (Di Paolo, 2015).

De la retroalimentación negativa a la retroalimentación doble

La retroalimentación negativa puede usarse para corregir errores, lo cual es útil si queremos crear sistemas autorreguladores. Consideremos de nuevo el caso del termostato. Por ejemplo, imaginemos que la llegada del verano provoca en la casa un incremento en la temperatura, que es medida por el termómetro. El termostato compara esta medición con el valor deseado para el cual ha sido programado. En este caso, la medida va a ser muy alta. Un regulador contrarresta esta divergencia, por ejemplo, al incrementar la salida



del sistema de enfriamiento. La influencia del calor externo es, por lo tanto, reducida de forma automática.

Desde la perspectiva de los habitantes de la casa, este sistema se está comportando intencionadamente y siguiendo una meta: mantener la temperatura alrededor de cierto punto establecido. Pero ¿comparte el sistema este punto de vista sobre sus operaciones? Una manera de revelar el hecho de que en realidad al sistema no le importa esto es exponiéndolo a una fuerte perturbación, que tiene el efecto de frustrar su “meta” y ver cómo reacciona.

Imaginemos que abrimos la caja con el sistema de control del clima en la casa y cambiamos un par de cables, de tal manera que el sistema envía exactamente la señal opuesta al sistema de enfriamiento. Al siguiente día, cuando el calor en la casa empieza a volverse demasiado alto, el termostato otra vez detecta una divergencia del valor deseado y activa el regulador. Pero ahora esto va a tener el efecto de reducir, en lugar de incrementar, la salida del sistema de enfriamiento. Así, aumentará más la temperatura. Por lo tanto, el termostato va a enviar una respuesta aún mayor al regulador, y esto va a reducir todavía más la salida del sistema de

enfriamiento, y así de manera reiterada. Podemos imaginar que el “bucle” va a continuar hasta que en cierto momento, el sistema se sobrecaliente y se quiebre.

La situación es muy diferente en el caso de los organismos vivos. Nuestra temperatura es una variable esencial que el cuerpo debe regular para mantener ciertos estados fisiológicos. Por ejemplo, las personas que tuvieron que enfrentar las consecuencias del sistema de clima reconfigurado deben tener calor. Eventualmente, esto debe de haber desencadenado un caso biológico de retroalimentación negativa. Una vez que nuestro cuerpo se calienta demasiado, empieza a sudar, y la evaporación del sudor tiene un efecto de enfriamiento en nuestra piel. ¿Pero qué pasa cuando esta retroalimentación negativa no sirve? Si el cuerpo se sobrecalienta, va a llegar un punto en el que colapse e incluso muera. Sin embargo, antes de este momento final vamos a empezar a sentir malestar y vamos a tratar de reducir el impacto del calor de otra forma. Podemos abrir ventanas, apagar el sistema de control de la temperatura que funciona mal o simplemente salir de la casa. Para explicar esta notable capacidad indefinida de adaptación, necesitamos más que la retroalimentación negativa.

El psiquiatra y cibernético inglés W. Ross Ashby (Figura 1) dedicó una gran parte de su vida profesional a explicar cómo es posible que los animales puedan adaptar su conducta a circunstancias imprevistas. Pro-

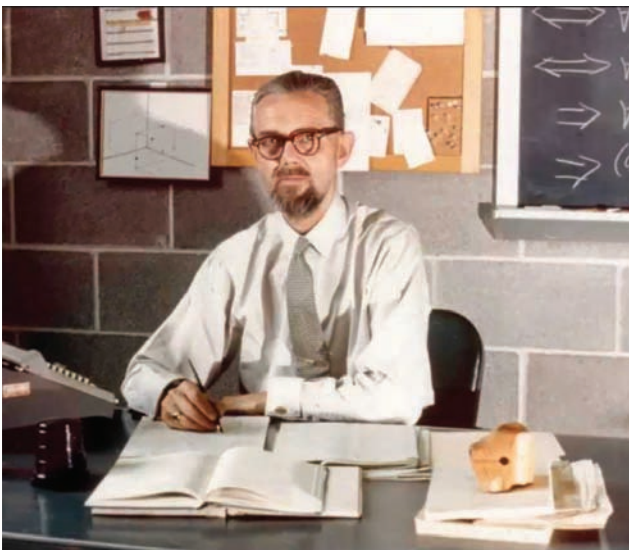


Figura 1. W. Ross Ashby (tomada de www.rossashby.info).

ponía que cuando el comportamiento no es efectivo para contrarrestar una perturbación, la organización interna podría ser ajustada automáticamente hasta encontrar un nuevo comportamiento efectivo. En lugar de mera estabilidad, Ashby estaba interesado en lo que llamó *ultraestabilidad* (Ashby, 1960).

Así, logró diseñar y construir un sistema mecánico –hecho con materiales excedentes de la Segunda Guerra Mundial– que podía adaptar espontáneamente su organización interna de modo que sus variables esenciales volvieran a estabilizarse cuando excedían sus límites. Este aparato innovador es conocido como *homeostato*. No necesitamos entrar en los detalles de su funcionamiento aquí; es suficiente que tengamos una comprensión general del concepto de *ultraestabilidad* de Ashby, como se ilustra en la Figura 2.

En el sistema, la parte responsable de regular la interacción sensoriomotora es representada por (R), mientras que el ambiente externo es representado por (E). Las dos partes están acopladas mediante movimientos (M) desempeñados por el sistema, y las sensaciones (S) recibidas por su entorno. Esto puede ser la base de un “bucle” de retroalimentación negativa. La forma precisa de comportamiento está determinada por parámetros (P), indicados por una flecha que va de (P) a (R). El sistema también incluye una variable esencial, que interpretaremos aquí como la temperatura de nuestro cuerpo. Este tipo de variable esencial es

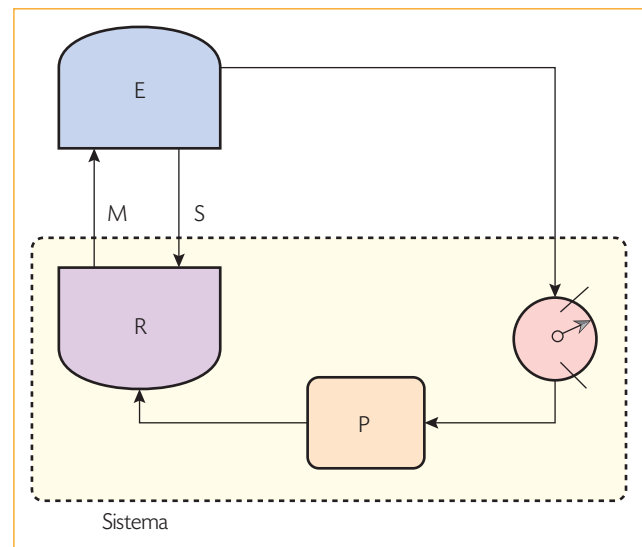
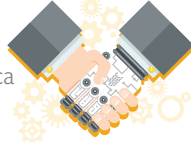


Figura 2. Esquema de un sistema caracterizado por la ultraestabilidad.



ilustrada como un reloj comparador con una flecha que debe quedarse entre dos límites marcados en su orilla.

El gran logro en el entendimiento de Ashby fue que la ultraestabilidad podía ser implantada al introducir un segundo “bucle” de retroalimentación, conectando así el estado de la variable esencial con los parámetros (P). En particular, cada vez que la variable esencial se escapa de sus límites, el valor de uno de los parámetros (P) es modificado aleatoriamente. Este diseño de retroalimentación doble tiene implicaciones profundas en términos de estabilidad.

Imaginemos que el termostato descompuesto ha sido remplazado por un nuevo sistema diseñado para ser ultraestable. ¿Qué pasa si una vez más cambiamos el cableado? Eventualmente la variable esencial —la temperatura— va a salirse de su rango de variabilidad. Y esto a su vez detonará un cambio aleatorio en uno de los parámetros del sistema. En este punto, dos cosas pueden pasar: o bien este cambio en la organización del comportamiento del sistema lleva a una mejora, y en este caso la variable esencial regresa a sus límites; o la situación continúa siendo insostenible, y en dado caso habrá otro cambio en la organización del sistema. En efecto, el sistema continuará cambiando la forma de su comportamiento hasta encontrar una nueva organización estable.

De la ultraestabilidad a la autopoiesis

Hemos visto cómo los cibernéticos han tratado de explicar el comportamiento intencionado —dirigido a metas intrínsecas— y la autoadaptación interna en términos de diferentes tipos de retroalimentación. Pero aún existe una diferencia crucial entre estos sistemas artificiales y los seres vivos, que está relacionada con el origen de su identidad, la cual define el tipo de sistemas que son. Aunque algunos artefactos pueden autorregularse y autoadaptarse, la noción de su “sí mismo” se mantiene elusiva. En el análisis final, éstos siguen recibiendo su identidad y existencia por parte de los ingenieros que los construyen y diseñan, y su frontera es arbitraria.

Un organismo, por otro lado, está obligado a mantener su identidad física mediante la regulación de sus procesos metabólicos y adaptativos, que se remontan a

una forma de autoproducción de su identidad como un sistema. Fue otra gran contribución latinoamericana el resaltar esta importante diferencia entre artefactos cibernéticos y sistemas vivos, y darle una nueva etiqueta: autopoiesis (Maturana y Varela, 1973). Para Maturana (Figura 3) y Varela —quien era estudiante del primero—, la autopoiesis era la fundación sistémica de la autonomía biológica. *Autoproducción* significa que la identidad y el comportamiento de un ser vivo están intrínsecamente determinados por ese organismo en sí mismo. En el caso de los seres vivos, mas no de los mecanismos artificiales, ser y hacer son interdependientes (Froese y Ziemke, 2009).

Maturana y Varela tenían la intención de que su teoría de la autopoiesis fuera solamente sobre la organización de los seres vivos, sin comprometerse a cualquier especulación sobre sus potenciales consecuencias subjetivas. Sin embargo, durante la era de la cibernética había también un movimiento en la filosofía continental que sostenía que la perspectiva del sujeto (su fenomenología) podía estar establecida en la constitución corpórea de lo vivo. Desde la perspectiva de la nueva ciencia cognitiva, el filósofo alemán Hans Jonas proveyó de algunas de las más importantes contribuciones al respecto (Jonas, 2000). Argumentó que experimentamos un mundo con significado y nuestra existencia nos concierne porque el cuerpo biológico es *precario*. Esencialmente, porque somos individuos

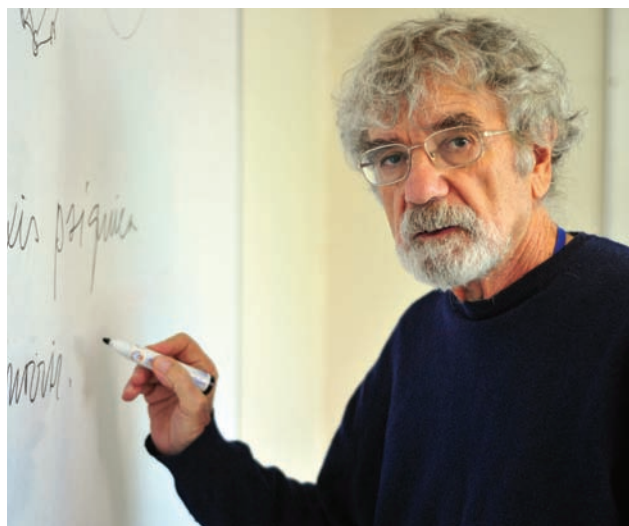


Figura 3. Humberto Maturana (tomada de www.mcafestival.cl/portal/images/stories/humberto%20%20maturana.jpg).

finitos constantemente amenazados por la posibilidad de no existencia, existencia que nos importa en primer lugar. El significado que experimentamos depende de la mortalidad.

Una de las contribuciones más importantes de Varela (Figura 4) hacia el final de su vida fue integrar estas comprensiones fenomenológicas con la teoría sistémica de la autopoiesis, con el argumento de que, de esta forma, la ciencia cognitiva será capaz de dar cuenta de la existencia humana en su totalidad, incluyendo los aspectos tanto objetivos como subjetivos (Froese, 2011). Esta propuesta se ha vuelto la fundamentación teórica de la nueva ciencia cognitiva enactiva.

Otro desarrollo reciente ha sido regresar a las ideas de la era de la cibernética en cuanto a la autorregulación y la autoadaptación. La autopoiesis como concepto categorial no nos dice nada sobre los estados posibles mientras un sistema se mantiene existiendo tras su autoproducción. Por ejemplo, podemos estar más o menos sanos, más o menos adaptados a las circunstancias. Para entender cómo puede ocurrir esta variabilidad, necesitamos combinar la autopoiesis con otro principio, uno que permita a un sistema medir grados de posibilidades. El científico argentino Ezequiel Di Paolo ha argumentado que esto se puede lograr si ponemos en claro que los seres vivos son agentes que tienden a regular sus interacciones sensoriomotoras en relación con sus variables esenciales (Di Paolo, 2015).



Figura 4. Francisco Varela (tomada de http://en.wikipedia.org/wiki/Francisco_Varela).

Esta idea de la *agencialidad* —es decir, ser agente— está ilustrada en forma de diagrama en la Figura 5.

El sistema autopoietico es dibujado como una flecha que se cierra a sí misma, formando así un círculo. Esto representa la autoproducción (AP). Al igual que en la Figura 2 de la ultraestabilidad, el sistema puede afectar al ambiente (línea ondulada) mediante el movimiento (M), y a cambio ser afectado por el ambiente mediante sensaciones (S). Y una vez más, el sistema puede regular (R) la forma particular de su acoplamiento sensoriomotor.

Hay, por lo tanto, muchas semejanzas entre la teoría de ultraestabilidad de Ashby y la teoría de la autopoiesis de Maturana y Varela, pero también existen diferencias importantes (Froese y Stewart, 2010). Ashby estaba interesado en entender la capacidad de un sistema para regular sus interacciones, pero esto sólo se mantuvo implícito en el trabajo de Maturana y Varela, hasta que Di Paolo de nuevo enfatizó su importancia. Por otra parte, la pregunta sobre la identidad de un sistema se mantuvo implícita en los trabajos de cibernéticos como Wiener y Ashby, hasta que fue destacada por Maturana y Varela. Finalmente, mientras Maturana y Varela inicialmente rechazaron cualquier interpretación subjetiva de la organización biológica, al final Varela se convenció de que la autoproducción y su precariedad son la clave para entender que somos individuos que llevan a cabo vidas significativas.

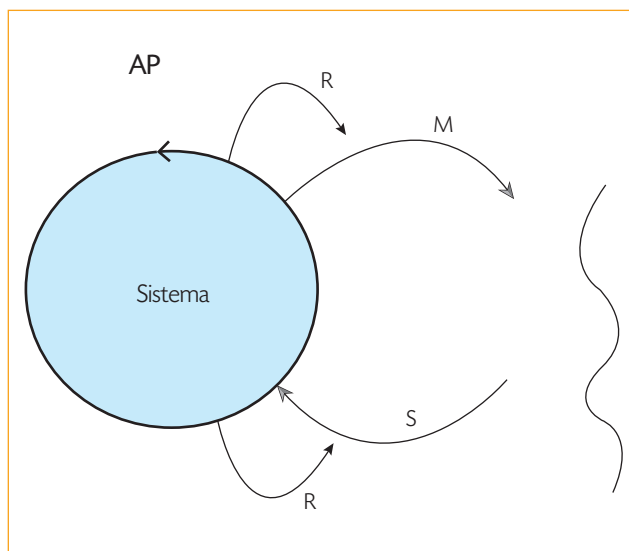
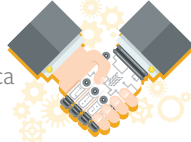


Figura 5. Esquema de un sistema caracterizado por agencialidad.



Conclusiones

Los últimos desarrollos en la ciencia cognitiva se establecen en una larga tradición de teorías revolucionarias que comenzaron en la primera mitad del siglo XX con lo que Wiener llamó cibernética (Froese, 2010). Como hemos visto, ha habido una aportación sustancial de Latinoamérica a esta historia, en particular por Rosenblueth, Maturana y Varela, y más recientemente por Di Paolo. Ellos han contribuido a avanzar en la búsqueda de una teoría de la subjetividad humana que logre hacer justicia a nuestra existencia tanto vivida (subjetiva) como viviente (objetiva). Al final, resulta que la mortalidad no es una consecuencia secundaria de nuestra existencia biológica que pudiera ser potencialmente evitada (como en el caso de los artefactos cibernéticos), sino precisamente aquello que en última instancia nos permite ser individuos interesados por el mundo y a quienes les importan los otros.

Esto abre un espacio para consideraciones éticas. La nueva ciencia cognitiva toma con seriedad el hecho de que participamos directamente en las vidas de otros, por ejemplo, por medio de la corregulación de nuestras interacciones sociales (De Jaegher, 2014). Paso a paso, la nueva ciencia cognitiva está poniéndose de acuerdo con toda la complejidad de la existencia humana.

Tom Froese es investigador en el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México, donde de 2012 a 2014 fue becario posdoctoral. También cuenta con estancias de posdoctorado en la Universidad de Tokio, Japón, de 2010 a 2012, y en la Universidad de Sussex, Inglaterra, en 2010. Obtuvo la maestría de Ingeniería en Ciencia de la Computación y en Cibernética en la Universidad de Reading, Inglaterra, en 2004, y el doctorado en Ciencia Cognitiva en la Universidad de Sussex, Inglaterra, en 2010. En su tesis de doctorado aplicó el método de la robótica evolutiva para resolver problemas teóricos en las ciencias de la mente. Actualmente su investigación está enfocada en entender mejor los aspectos distintivos de la mente humana relacionados con la cultura y la conciencia.

t.froese@unam.mx

El autor agradece el apoyo parcial de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) para poder realizar esta reseña; y a Héctor Gómez por su ayuda con la traducción al español.

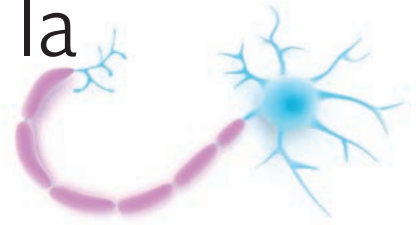
Lecturas recomendadas

- Ashby, W. R. (1960), *Design for a brain: the origin of adaptive behaviour*, Londres, Chapman & Hall.
- De Jaegher, H. (2014), "Enacción y autonomía: cómo el mundo social cobra sentido mediante la participación", en A. Casado da Rocha (ed.), *Autonomía con otros: ensayos sobre bioética*, Madrid, Plaza y Valdés, pp. 111-131.
- Di Paolo, E. A. (2015), "El enactivismo y la naturalización de la mente", en D. Pérez Chico y M. G. Bedia (eds.), *Nueva ciencia cognitiva: hacia una teoría integral de la mente*, Zaragoza, PUZ.
- Froese, T. y T. Ziemke (2009), "Enactive artificial intelligence: investigating the systemic organization of life and mind", *Artificial Intelligence*, 173:366-500.
- Froese, T. (2010), "From cybernetics to second-order cybernetics: a comparative analysis of their central ideas", *Constructivist Foundations*, 5:75-85.
- Froese, T. y J. Stewart (2010), "Life after Ashby: ultrastability and the autopoietic foundations of biological individuality", *Cybernetics & Human Knowing*, 17:83-106.
- Froese, T. (2011), "From second-order cybernetics to enactive cognitive science: Varela's turn from epistemology to phenomenology", *Systems Research and Behavioral Science*, 28:631-645.
- Jonas, H. (2000), *El principio Vida: hacia una biología filosófica*, Valladolid, Trotta.
- Maturana, H. R. y F. J. Varela (1973), *De máquinas y seres vivos: una teoría sobre la organización biológica*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria.
- Rosenblueth, A. N., N. Wiener y J. Bigelow (1943), "Behavior, purpose and teleology", *Philosophy of Science*, 10:18-24.
- Varela, F. J., E. Thompson y E. Rosch (1992), *De cuerpo presente: las ciencias cognitivas y la experiencia humana*, Barcelona, Gedisa.

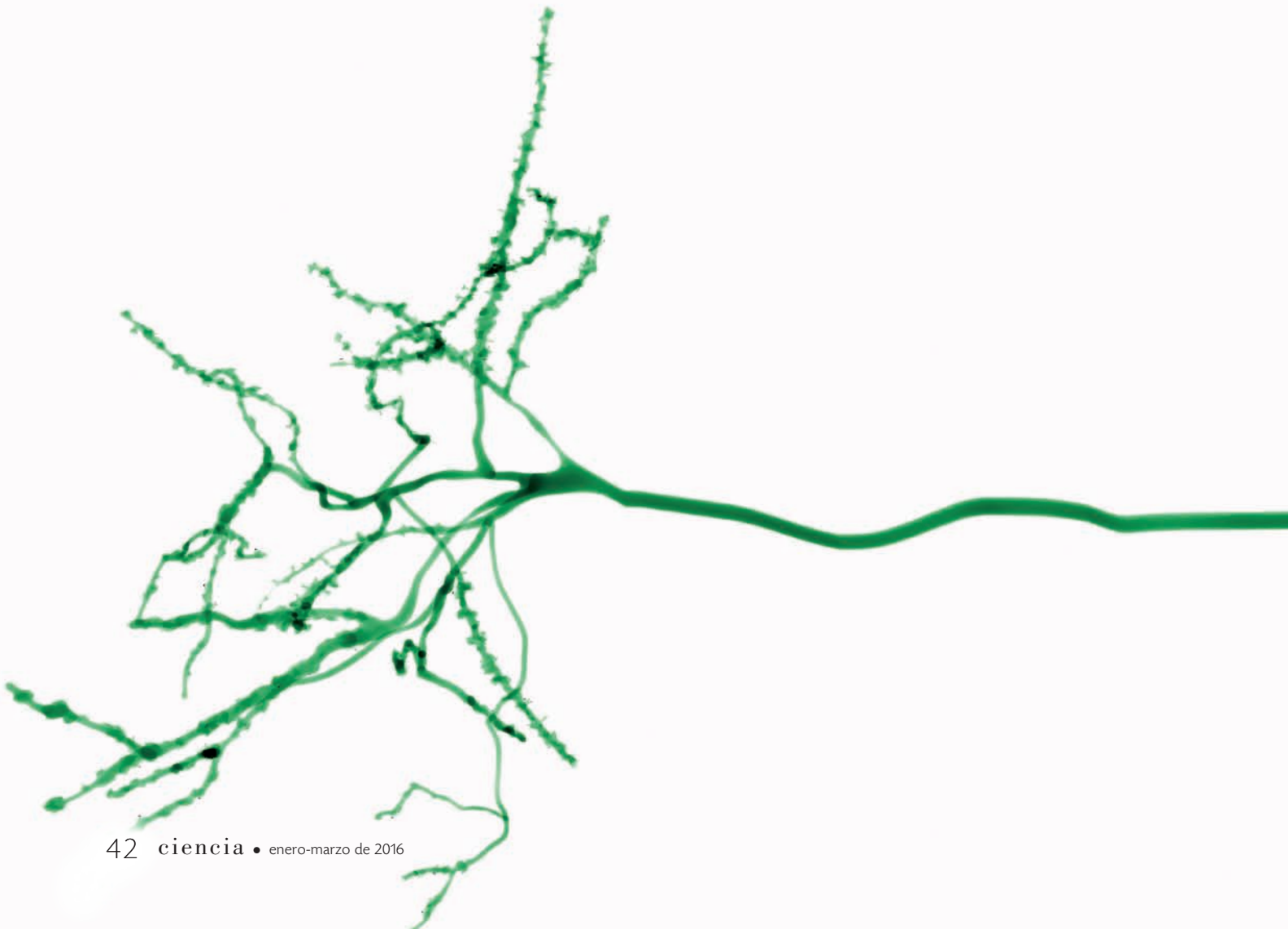




La **MENTE** en la máquina



Al principio de la década de los cuarenta del siglo xx, un conjunto de ideas surgidas de ámbitos muy diferentes convergió en el concepto que Norbert Wiener bautizó como *cibernética*. Algunas de estas ideas pretendían explicar, desde el punto de vista de la lógica, el funcionamiento del cerebro humano con base en el de sus componentes fundamentales: las neuronas. Surgieron así las redes neuronales, que hoy son uno de los modelos más útiles en el área de la inteligencia artificial.



El problema de McCulloch

13 de mayo de 1942. En algún salón del hotel Beekman en la ciudad de Nueva York, Warren Sturgis McCulloch escucha, sorprendido y extático, la conferencia inicial de la reunión convocada por la Fundación Macy para que un heterogéneo grupo de académicos discorra acerca del funcionamiento del cerebro. El que habla es un médico mexicano: Arturo Rosenblueth. Es un exalumno de Walter Cannon, con quien trabajó en Harvard en el problema de la transmisión química de impulsos nerviosos. Arturo habla en inglés no sólo con soltura, sino con vehemencia; en la mente de la audiencia sus palabras evocan conceptos filosóficos que habían sido desterrados del contexto científico desde hacía mucho tiempo, pero que en labios de Rosenblueth adquieren un nuevo sentido. Arturo ha trabajado recientemente con Norbert Wiener y Julian Bigelow sentando las bases de lo que será bautizado como *cibernética*, y es de eso de lo que habla. El público está conformado por un grupo de estudiosos de muy diversas disciplinas: antropólogos, economistas, psicólogos y médicos. Todos escuchan con avidez a Arturo; en las mentes de todos ellos quedará una huella indeleble de la reunión y de la revelación que experimentaron.

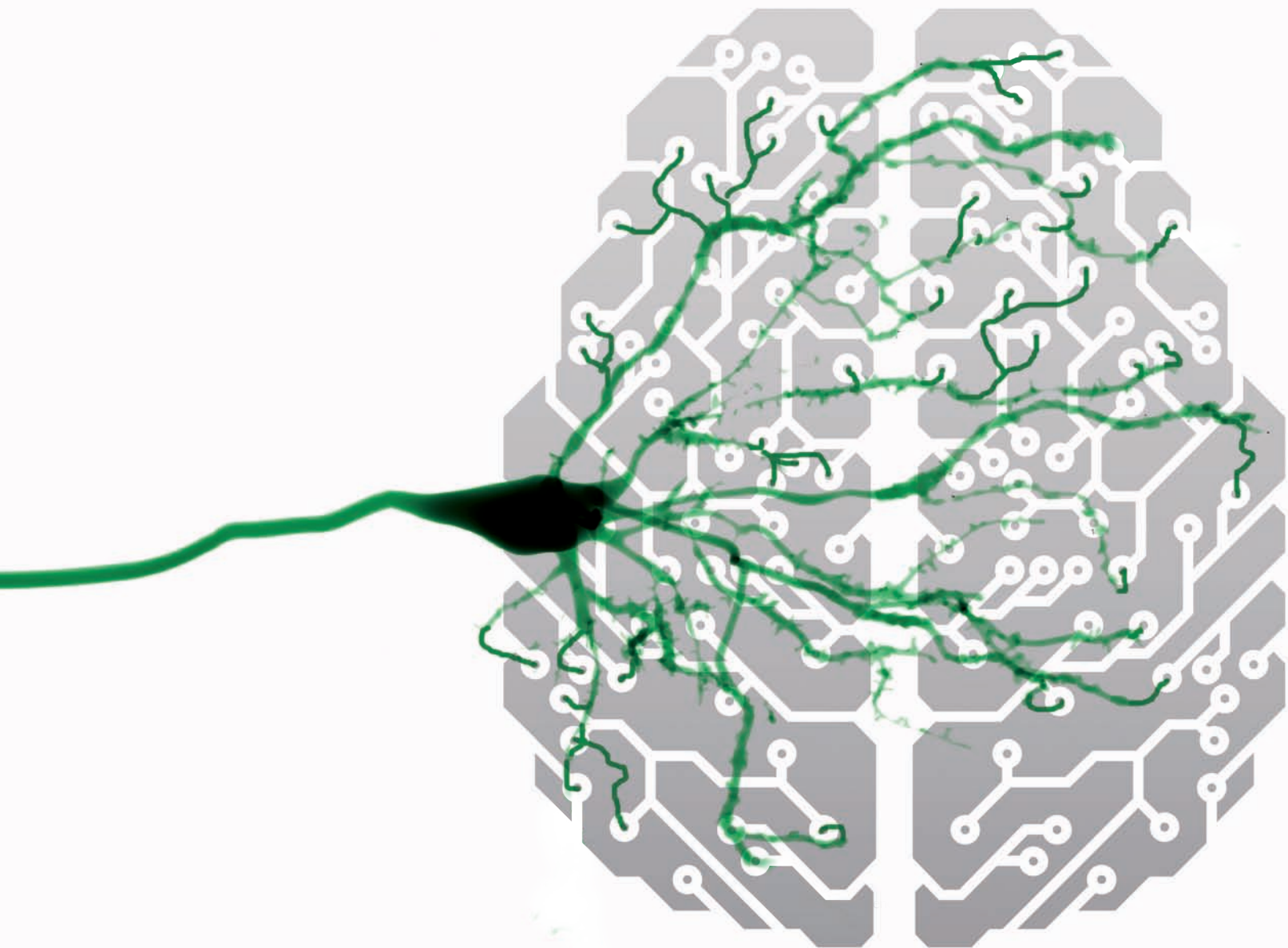




Figura 1. Arturo Rosenblueth.

Warren McCulloch ha estado trabajando en su problema, el que ha marcado la directriz de su trabajo desde hace más de 20 años, cuando estudiaba psicología y filosofía en Yale. Warren lo sintetiza con un par de preguntas: “¿Qué clase de cosa es un número, que un ser humano puede saber lo que significa?, y ¿qué clase de cosa es un ser humano, que puede saber lo que un número significa?” En términos más generales: ¿cómo es que los seres humanos llegamos a la abstracción?, ¿cuál es la estructura lógica de la mente humana? En vano agotó Warren bibliotecas enteras buscando respuestas. Ni la psicología ni la filosofía fueron capaces de contestar cabalmente; la matemática, sin embargo, en algo ayudó. En los tres volúmenes de los *Principia Mathematica* (obra a la que llamaremos *Principia*, en lo sucesivo), escritos por Bertrand Russell y Alfred Whitehead entre 1910 y 1913, los malabares formales de la lógica matemática atenuaron las preocupaciones de Warren.

La cábala de los *Principia*

La intención de los *Principia* fue mostrar que la matemática era un mecanismo perfecto. A lo largo de los miles de años en los que la humanidad la ha construido, la matemática ha acumulado un enorme acervo de conceptos. Algunos son piezas elementales indispensables que subyacen en el centro de casi toda teoría, como los engranes de una maquinaria, y hay, también, maneras bien definidas de tomar esos conceptos, combinarlos y transformarlos para generar nuevos, como las diferentes combinaciones de movimientos en el engranaje de un reloj. A los elementos esenciales se les suele llamar *axiomas* y las operaciones que permiten transformarlos y combinarlos son las reglas de la lógica matemática. Russell y Whitehead pretendían mostrar cuáles eran esos engranes fundamentales y los movimientos que permitían combinarlos de tal forma que, suponiendo a la matemática como un enorme y complejo mecanismo de relojería, se pudiera probar su perfecta coordinación, sin errores ni contradicciones. De lograr algo así, todo problema matemático sería soluble con sólo determinar si podía expresarse de tal forma que fuera posible encajarlo en el mecanismo y encontrar la combinación de engranes y de movimientos necesarios para representar el enunciado del problema como parte de la máquina; es decir, mediante el conjunto de axiomas y la secuencia de reglas por aplicar para llegar a la sentencia que, en el lenguaje de los símbolos de los *Principia*, formulara el problema por resolver. Resolver un problema matemático cualquiera equivaldría, entonces, a encontrar, de entre el inmenso pero finito número de permutaciones y combinaciones de símbolos, aquella que nos permitiera construirlo como una “frase” válida en el lenguaje de los *Principia*: una *fórmula*.

Afanes similares ocuparon a los cabalistas de la Edad Media y a quienes los siguieron: encontrar las palabras con las que Dios creó el mundo, los nombres verdaderos de las cosas, las combinaciones correctas de símbolos. La cábala buscaba desentrañar el misterioso lenguaje con el que la mente divina creó el cosmos; los *Principia*, develar el que la mente humana usa para crear la matemática. Si la lógica no es, a fin de cuentas, más que la representación del razonamiento humano, de la manera en que funciona nuestro cerebro, entonces las

respuestas que Warren buscaba podrían encontrarse si se lograba determinar cómo es que las operaciones de la lógica, el lenguaje de los *Principia*, son ejecutadas por nuestro cerebro.

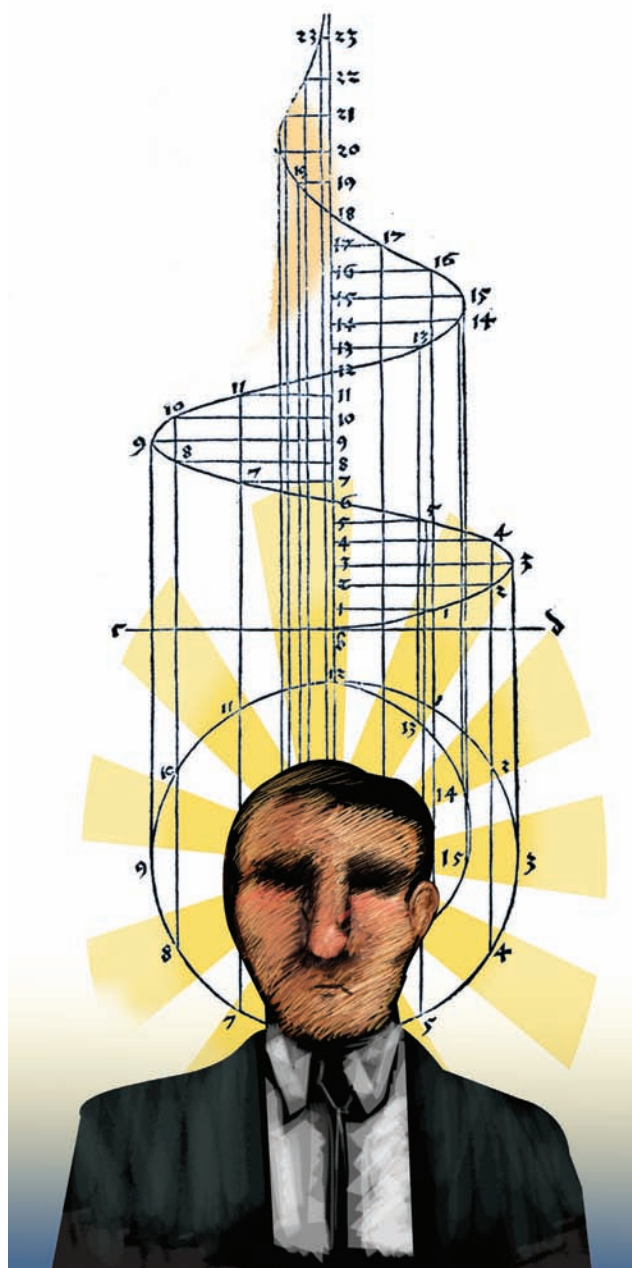
Con el tiempo, los cabalistas desistieron de su soberbio afán. El estudio denodado o la pureza de espíritu y el estricto apego a las leyes divinas probaron no ser suficientes para desentrañar el lenguaje de la Creación. Durante la década de los treinta del siglo xx, los *Principia* de Russell y Whitehead probaron ser también un ejercicio pueril. Los desarrollos de la lógica hechos en ese tiempo terminaron mostrando sus limitaciones y las de cualquier sistema que pretendiera alcanzar lo que los *Principia* se habían propuesto. Dos descubrimientos fueron cruciales:

- En 1931 Kurt Gödel demostró que no es posible construir un sistema de reglas y axiomas que sea capaz de contener toda la matemática; no si aspiramos a que sea consistente, esto es, si queremos que no sea posible que en su interior se escondan contradicciones.
- En 1936 Alan Turing demostró que dada una fórmula cualquiera en el lenguaje de la lógica de los *Principia*, no necesariamente existe una cadena de operaciones que lleven desde los axiomas hasta la fórmula dada.

Para lograr este último resultado, Turing tuvo que formalizar y definir con toda precisión lo que significaba esa “cadena de operaciones”. Hoy le llamamos *algoritmo* y es la esencia de lo *computable*. Cualquier programa de computadora, cualquier aplicación que se ejecuta en nuestros teléfonos inteligentes o en nuestras tabletas, es un algoritmo.

Para Warren, sin embargo, esto significaba que había una muy clara analogía entre los entonces incipientes dispositivos electrónicos de cómputo y el cerebro humano. Si nuestras computadoras y nuestros cerebros tenían un lenguaje común: el de la lógica, entonces, ¿qué podríamos averiguar de nuestros cerebros a través de los estudios acerca de cómo construir computadoras? Y, aún más interesante, ¿qué tanta de nuestra inteligencia les podríamos conceder a las computadoras, dado que, en apariencia, eran esencialmente lo mismo?

En la lógica simbólica usual, las proposiciones pueden ser calificadas como falsas o verdaderas; toda proposición tiene uno y sólo uno de estos llamados *valores de verdad*, y cualquier otra posibilidad está excluida. Esta característica de la lógica posee un más que aparente sustento en el comportamiento de las células que constituyen nuestro sistema nervioso, particularmente nuestro cerebro: las neuronas. En términos generales, una neurona recibe un conjunto de estímulos del exterior a través de sus conexiones con otras neuronas, en





lo que se conoce como *sinapsis*. Los estímulos recibidos pueden o no desatar a su vez la respuesta de la neurona que los recibe, dependiendo de si se sobrepasa cierto umbral de estímulo o no. Así, nuestras neuronas poseen, al igual que las proposiciones de la lógica, dos posibles respuestas. Esto es lo que señaló la dirección del trabajo de Warren: determinar los circuitos neuronales que calculan las operaciones elementales de la lógica; probar que nuestro cerebro es la maquinaria hecha para la lógica.

Retroalimentación y propósito

En la conferencia, Rosenblueth pone un ejemplo para ilustrar un par de conceptos. Uno de ellos proviene del trabajo real que Wiener y Bigelow comenzaron a hacer como parte del esfuerzo científico asociado a la guerra. Arturo tiene cuidado de no develar nada secreto, sólo usa lo necesario. Pide a la audiencia que imagine un proyectil de fuego antiaéreo, como los que usaron asiduamente los británicos hace un par de años en la Batalla de Inglaterra, y les pide que imaginen que el proyectil persigue a un avión que es su objetivo. Para hacerlo, debe dirigirse no a la posición donde está el avión, sino a aquella en la que estará cuando se encuentren las trayectorias del proyectil y

de su objetivo. Eso significa que este artefacto, el proyectil, es una entidad con un propósito, una finalidad que debe alcanzarse modificando su trayectoria con base en lo observado. Esto evoca uno de los conceptos que fueron desterrados del ámbito científico desde que el mundo occidental resurgió dificultosamente de la Edad Media: la finalidad de un sistema.

Para la escolástica era aceptable pensar que una entidad inteligente, un diseñador supremo, dirigía las cosas de acuerdo con un plan trazado: las rocas caen porque fueron hechas para estar con la tierra, que es su sustancia elemental; la finalidad de la semilla es ser árbol; la del Sol, dar calor a las criaturas de Dios. En el caso del proyectil, el hombre es quien le impone su finalidad, pero el concepto expuesto por Arturo abarca igualmente sistemas vivos. En este contexto, el sistema regulador de temperatura de los seres humanos también tiene un propósito: cuando la temperatura corporal excede cierto umbral, comenzamos a sudar; la finalidad es bajar la temperatura. Visto así, es un sistema con un propósito. Para llevar a cabo su labor, el proyectil debe percibir al objetivo; el cuerpo, su temperatura. Con base en estas lecturas se toman “decisiones” (cambiar la trayectoria y sudar, respectivamente); esto modifica las condiciones del entorno, lo que potencialmente amerita tomar acciones en consecuencia (nueva modificación de la trayectoria, incrementar la cantidad de sudor); finalmente, el sistema necesita retroalimentación, de alguna manera debe saber corregir sus acciones en un ciclo permanente de acción-retroalimentación.

Ciclo, esa palabra iluminó el rostro de Warren. Durante años había tropezado con el hecho de que las redes de neuronas frecuentemente presentan conexiones cíclicas. Si las redes neuronales estuvieran siempre calculando operaciones de la lógica de los *Principia*, no tendría por qué haber conexiones hacia “atrás”, hacia neuronas por las que ya había pasado el estímulo nervioso. Al principio Warren creyó que esto era exclusivo de las redes neuronales de individuos con alguna afección. Supuso, por ejemplo, que ésa era la causa de los temblores presentes en el mal de Parkinson: una especie de reverberación ocasionada por el estímulo que regresa. Pero ahora todo parecía más claro: los ciclos permiten retroalimentación, permiten tomar una ac-

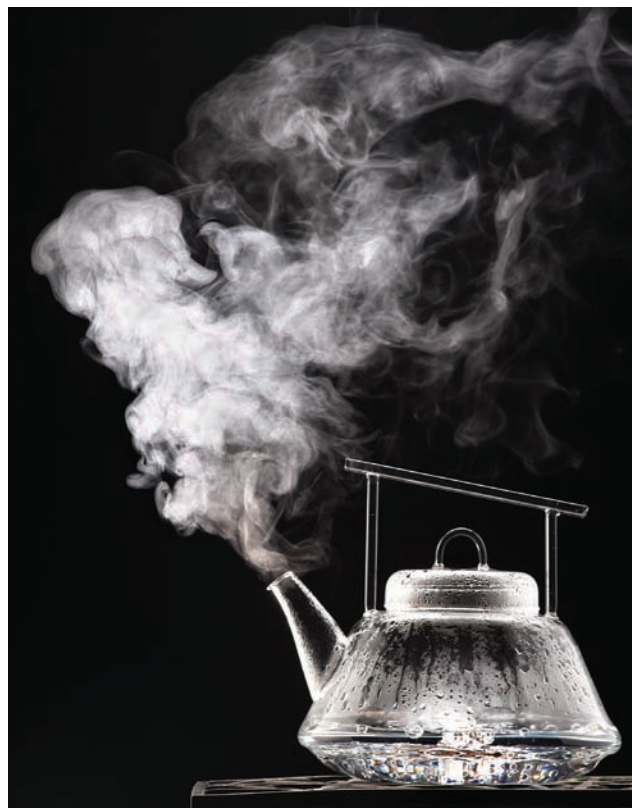


ción con base en la previa y en el resultado que se ha obtenido hasta ahora; permiten no olvidar el acierto o el error previo. Tenía que decirle esto a Pitts, juntos podrían incorporar la idea en el modelo lógico-neuronal que estaban construyendo.

Neuronas naturales y artificiales

Walter Pitts era un genio, no poseía educación formal, no había transitado nunca por el bachillerato. Él, como Warren, había devorado los *Principia* años atrás. Circunstancias azarosas los habían reunido y, a la fecha, Pitts vivía en la casa de los McCulloch, donde por las noches trabajaba con Warren desarrollando el modelo de redes neuronales basadas en la lógica.

El modelo que diseñaron corresponde bastante bien con nuestra experiencia cotidiana de la transmisión de estímulos nerviosos. Imaginemos un recipiente de metal que contiene agua caliente, por ejemplo, una tetera. Si el agua no está tan caliente, entonces podemos sostener la tetera con nuestras manos sin que nos cause una molestia significativa; no reaccionamos soltándola y quejándonos de dolor, cosa que haríamos si la tetera estuviera muy caliente. Las respuestas posibles al tocar la tetera son dos: soltarla o no. La que realmente tendrá lugar dependerá de si la temperatura a la que está excede cierto límite de tolerancia. Este límite, al que también podemos llamar *umbral*, es diferente para cada persona en general y, más aún, depende también



de la sensibilidad del área de la piel que toca la tetera: no es lo mismo usar las manos que los antebrazos, por ejemplo, pues las primeras soportan mayor temperatura que los segundos.

Podríamos pensar ahora en una neurona a medio camino entre nuestras extremidades superiores y el cerebro; esta neurona recibe estímulos provenientes de otras, posiblemente algunas de ellas en las manos y algunas otras en los antebrazos. Esta neurona debe transmitir al cerebro una señal de alarma si el estímulo recibido rebasa cierto umbral, para prevenir el daño a los tejidos expuestos al calor. Pero como la sensibilidad de las áreas expuestas es diferente, debe asignar una cierta prioridad a cada una: dado que el antebrazo es más sensible, recibe una prioridad mayor que las manos, que soportan mejor el calor. La neurona entonces *pondera* los estímulos de entrada recibidos y decide, con base en el estímulo total, si debe o no emitir una señal de alarma.

El modelo diseñado por McCulloch y Pitts se podría esquematizar como se muestra en la Figura 3. Una neurona en este modelo es una entidad que, como las

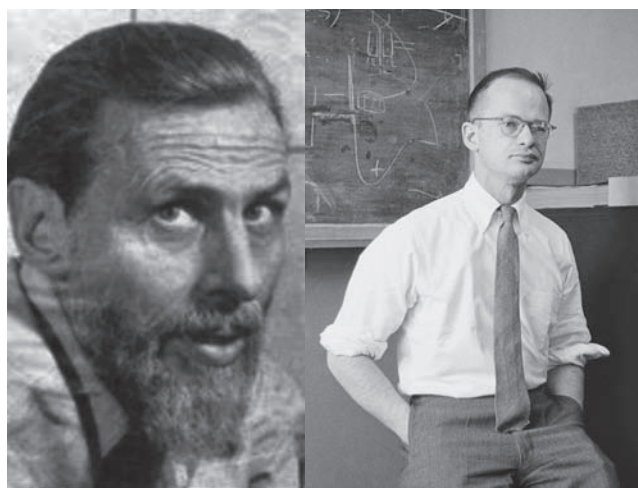


Figura 2. Warren Sturgis McCulloch, a la izquierda, y Walter Pitts, a la derecha.

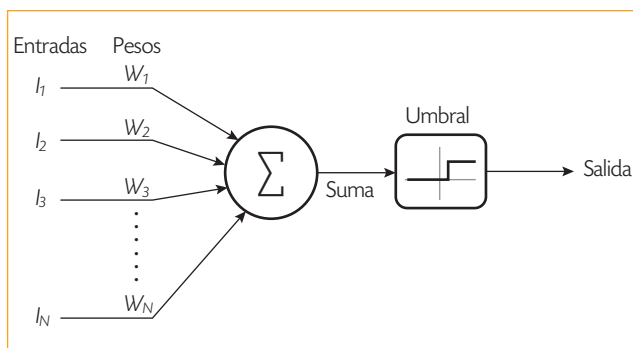


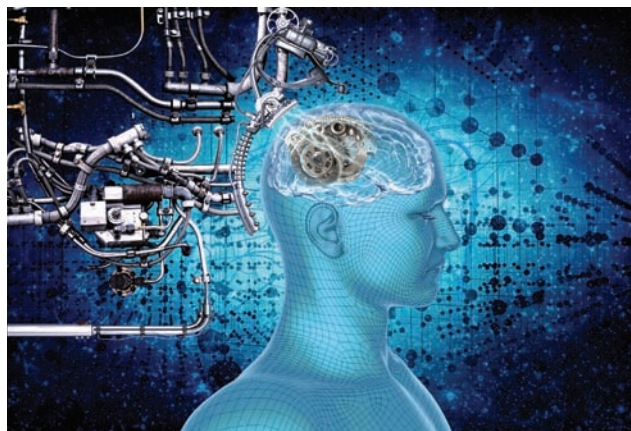
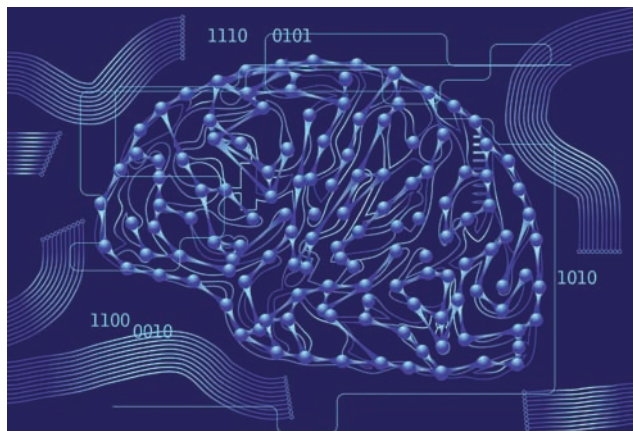
Figura 3. Esquema de una neurona en el modelo de McCulloch y Pitts.

neuronas naturales a través de las sinapsis, recibe estímulos del exterior y entrega como salida una respuesta a éstos. Tanto los estímulos recibidos como la respuesta son binarios: hay o no hay respuesta, 0 o 1, verdadero o falso, como se prefiera. La neurona asigna luego a cada una de sus sinapsis de entrada un cierto factor de importancia: 0 si hay que ignorarla, 1 si es muy relevante, y algún número entre esos dos en cualquier otro caso (así que un factor de importancia de 0.5 significa que el estímulo recibido por esa sinapsis es, digamos, medianamente importante). Para decidir si su salida será 0 o 1, la neurona calcula la suma ponderada de sus entradas y verifica si el resultado excede el valor de un cierto umbral (u). Es decir, calcula la suma de cada una de sus entradas luego de ser ponderadas por el factor de importancia. Si I_j es la j -ésima de estas entradas y ésta tiene asignado un factor de importancia W_j , la neurona calculará el producto de I_j y W_j , es decir: $I_j \times W_j$. Para cada entrada diferente, o sea, para cada valor distinto de j , existe un producto similar. Final-

mente, la neurona calcula la suma de estos productos y si el resultado excede el umbral predefinido u , entonces la neurona entrega un 1 como respuesta; de otro modo, entrega un 0. Por supuesto, esta salida producida por la neurona puede pasar a otras conectadas con ella, en lo que se denomina entonces una *red neuronal*. Si existe un cierto orden en las neuronas de una red, de tal forma que la respuesta producida por una neurona no pueda nunca regresar como entrada a neuronas previas, se dice que la red tiene alimentación hacia adelante; de otro modo, se dice que tiene *retroalimentación*, el concepto que explicó Rosenblueth en la reunión y que llamó tanto la atención de McCulloch.

Inteligencia artificial y Golem

En su trabajo de 1936, Alan Turing definió el conjunto de todos los números que pueden ser calculados por medio de un algoritmo. En el artículo escrito por McCulloch y Pitts, publicado en 1943 (al año siguiente de la reunión Macy), se muestra que cualquier número calculable en el sentido de Turing es también calculable por una red neuronal en el modelo de McCulloch y Pitts. Desde la perspectiva de los autores y, de hecho, de todos aquellos involucrados en el tema en esa época, esto tiene una enorme importancia tanto técnica como filosófica: si las redes neuronales no son más que modelos simples de cómo es que la lógica se encuentra inherentemente construida en el cerebro humano; y si, por otra parte, resulta que las redes neuronales no son otra cosa que ejecutoras de algoritmos, es decir, computadoras, entonces ciertamente no se ve lejano el



día en que nuestras computadoras puedan pensar como nosotros.

En su artículo de 1943, “Un cálculo lógico de las ideas inmanentes a la actividad nerviosa”, McCulloch y Pitts expusieron su modelo de redes neuronales. Ese mismo año también se publicó el primer artículo que exponía los conceptos que se llamarían cibernética: “Mecanismos teleológicos, causalidad circular y retroalimentación”, escrito por Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener y Julian Bigelow. Más tarde, en 1948, Wiener sintetizaría todos estos conceptos en una obra mayor, en la que también prestó atención al modelo neuronal. El libro se tituló *Cibernética: o el control y la comunicación en el animal y la máquina*.

Poco después, las redes neuronales adquirieron un aspecto muy similar al que poseen hoy: un conjunto de elementos o nodos de entrada cuya función es recibir los estímulos externos que provienen de los datos que se deben procesar y que, de alguna manera, constituyen una interrogante por resolver. En el otro extremo de la red están las neuronas de salida, generalmente menores en número que los sensores de entrada; éstas se encargan de proponer una respuesta a la interrogante formulada en aquéllos. Entre las neuronas de salida y los nodos de entrada hay una red de neuronas interconectadas que, en principio, permanecen ocultas para quien observa la red desde el exterior, y que suelen organizarse en capas. En la Figura 4 se muestra una red neuronal con sólo una capa oculta.

Entre los relatos que engendró la cábala medieval, sin duda el más famoso es el del Golem de Praga, el ser artificial que fue dotado de vida por el poder de las pa-

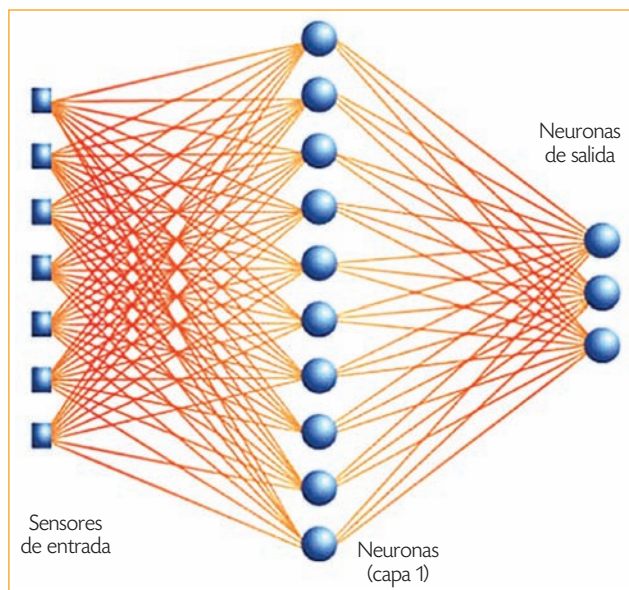
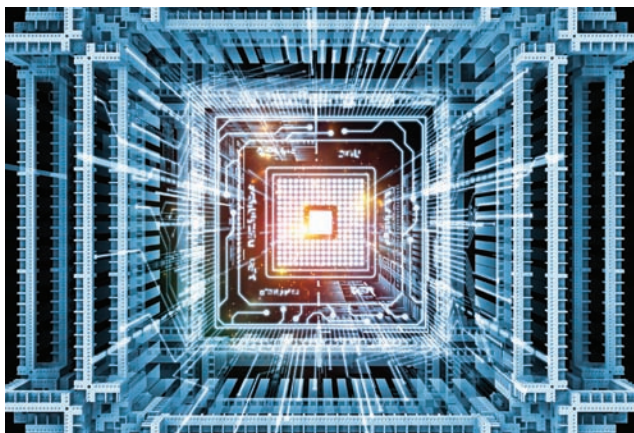
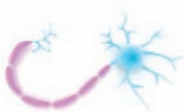


Figura 4. Esquema de una red neuronal artificial con una sola capa de neuronas ocultas.

labras que el rabino Loew supo encontrar en su arduo estudio de la escritura sagrada. Para nuestros estudiosos de los *Principia*, la creación análoga es la de una mente artificial, una máquina capaz de razonar como sólo un ser humano podría hacerlo. En la leyenda de Praga, el sacrilegio de arrogarse los privilegios de Dios trae nefastas consecuencias. Quinientos años después, concretamente en 1948, Alan Turing descrea del castigo divino en un breve artículo que nunca verá la luz, en el que elabora su propia versión de modelo de red neuronal. Un poco después, quizás consciente de que —como el Golem— una mente artificial no deja de ser más que un simulacro, enuncia en 1950 lo que se conoce como “la prueba de Turing”: renuente a responder “¿puede una máquina pensar?”, Turing prefiere remplazar la pregunta por otra: “¿puede una máquina comportarse como si pensara?”. La influencia y la crítica que genera la propuesta da origen a lo que en 1956 se bautiza como *inteligencia artificial*, o IA.

De lo material a lo simbólico

De entre los rasgos que hacen que algo sea calificado como inteligente, uno fundamental es el *aprendizaje*. Desde el principio, Warren se había percatado de que para aprender, una red neuronal debía modificar



su estructura. En 1949 el psicólogo canadiense Donald Hebb planteó el mecanismo por el que sería posible aprender: cambios perceptibles en la conducta como efecto de cambios en las redes neuronales. Si un estímulo se repite y se transmite siguiendo siempre el mismo camino en la red neuronal, entonces este camino se ve “reforzado”, la red se adapta para facilitar ese camino y no los alternativos, la secuencia de neuronas que se disparan (respuesta 1) y las que se inhiben (respuesta 0) es la misma luego de un tiempo ante el mismo estímulo. Esto significa que la red ha “aprendido” cómo reaccionar ante él. En términos del modelo de McCulloch y Pitts, esto puede traducirse en incrementar el peso de las entradas por las que el estímulo llega a las neuronas que se disparan. Esto tiene utilidad potencial, por ejemplo, para lograr que una red neuronal aprenda a distinguir semejanzas cuando se la expone a diferentes estímulos. ¿Qué tienen en común las banderas de Bélgica, Rumania, Italia y Francia? Las cuatro están divididas verticalmente en tres partes iguales con tres colores diferentes; ése es un patrón bien definido. Si puesta ante el catálogo de las banderas del mundo, una red neuronal fuera capaz de dar exactamente la misma respuesta ante estas cuatro banderas (y las demás que cumplan con el patrón descrito) y esta respuesta fuera diferente de la entregada ante cualquier otra bandera sin el patrón, podríamos decir que la red ha aprendido a reconocer el patrón. Frank Rosenblatt se inspiró en el mecanismo de aprendizaje descrito por Hebb cuando en 1958 creó el llamado *perceptrón*, un modelo neuronal con el propósito de reconocer patrones.

En 1969, con cuatro meses de diferencia, fallecieron Pitts (en mayo) y McCulloch (en septiembre). En ese mismo año aciago, Marvin Minsky, uno de los fundadores y personalidades más influyentes de la IA, quien se había iniciado en 1951 construyendo una red neuronal, escribió junto con Seymour Papert un libro titulado *Perceptrons*, en el que desdeñaban el modelo de Rosenblatt evidenciando algunas limitaciones más bien baladíes. Esto desalentó el estudio acerca de las redes neuronales entre la comunidad de IA en el mundo durante casi dos décadas. Se fortaleció lo que se conoce como *procesamiento simbólico*: sistemas basados en la lógica, la representación de conocimiento y el uso de reglas.



Desencanto y promesas

Durante la década de los ochenta del siglo pasado, el interés se fue recuperando paulatinamente. Se generalizó el concepto de *perceptrón* y se fueron superando con creces las limitaciones que se le habían señalado. Se retomaron las ideas de Hebb mediante el término *conexionismo*, acuñado por él en los años cuarenta. Los problemas que la IA pretendía resolver resultaron mucho más difíciles de lo que se suponía; en consecuencia, el procesamiento simbólico resultó ingenuo las más de las veces. El punto de vista propuesto por las redes neuronales, que había sido menospreciado, resultó ser, a fin de cuentas, una esperanza. Surgieron nuevos modelos y se propusieron diferentes maneras de lograr que una red neuronal aprenda.

Hoy en día se posee un variado catálogo de diferentes tipos de redes neuronales, todos con características que los hacen adecuados para resolver o al menos aproximar la solución de problemas muy difíciles. Se usan redes neuronales en aplicaciones prácticas: para la clasificación de huellas digitales o reconocimiento de melodías, para identificar patrones en pacientes con riesgo de cáncer o zonas geográficas con peligro de inundación. Las aplicaciones de las redes neuronales crecen constantemente en número y en utilidad.

Pero esto no es todo. Recientemente se ha retomado la utópica pretensión de lograr artificios capaces de emular el cerebro humano. El doctor Massimiliano Di Ventra y sus colaboradores, de la Universidad de Cali-



fornia en San Diego, trabajan actualmente en modelos realizables de computadoras cuyos elementos constitutivos son, como nuestras neuronas, entidades tanto de procesamiento como de memoria, simultáneamente. ¿Qué consecuencias tendrán ésta y otras investigaciones? ¿Cuál será la relación precisa entre estos modelos y el paradigma de cómputo formulado por Turing? Será emocionante averiguar las respuestas.

En el camino habrán de quedarse de lado algunas cosas que creíamos prometedoras; otras insospechadas cobrarán relevancia. Varias veces pecaremos de ingenuos y habremos de desengañarnos más tarde. La ciencia progresa así. McCulloch, que también cultivó la poesía, lo dice mejor en un soneto:

Construimos nuestros castillos en el aire,
y desde el aire se derrumban,
a menos que los llevemos encima
hasta que agrietan la cabeza que coronan.

José Galaviz Casas ingresó como estudiante a la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México en 1987. Se tituló de la licenciatura en Matemáticas en 1993 y realizó sus estudios de posgrado en la misma universidad; en 2006 obtuvo el grado de doctor en Ciencias de la Computación con mención honorífica. En 2007 recibió el Reconocimiento Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos en el Área de Docencia en Ciencias Exactas. Es autor o coautor de cuatro libros de computación. Es profesor de tiempo completo del Departamento de Matemáticas de la Facultad de Ciencias desde 1998.

galaviz@ciencias.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Conway, F. y J. Siegelman (2006), *Dark hero of information age: In search of Norbert Wiener, the father of cybernetics*, Nueva York, Basic Books.
- Di Ventra, M. y Y. V. Pershin (2015), "Just add memory", *Scientific American*, 312(2):57-61.
- McCulloch, W. S. y W. Pitts (1943), "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115-133. (Reproducido en *Embodiments of mind*.)
- McCulloch, W. S. (1988), *Embodiments of mind*, Cambridge, MIT Press.
- Miramontes, P. (2013), "La fábrica de sueños", *Ciencia*, 64(4):72-78.
- NeuralOutlet IE (2013), "Warren McCulloch Interview (1969)" [video]. Disponible en: <<http://youtu.be/MT-mR6X2w8Tg>>, recuperado el 5 de enero de 2015.
- Piccinini, G. (2004), "The First Computational Theory of Mind and Brain: A Close Look at McCulloch and Pitts's: Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity", *Synthese*, 141(2):175-215.
- Rosenblueth, A., N. Wiener y J. Bigelow (1943), "Behavior, Purpose and Teleology", *Philosophy of Science*, 10(1):18-24.
- Rosenblueth, A. (1994), *Mente y cerebro: una filosofía de la ciencia*, México, Siglo XXI Editores, 327 pp.
- Wiener, N. (1998), *Cibernética o el control y comunicación en animales y máquinas*, Barcelona, Tusquets.



La **danza** incesante de las **MOLÉCULAS**

Norbert Wiener fue el primer matemático que demostró la existencia de un modelo que cumple con las características estipuladas por Einstein en su célebre artículo sobre el movimiento de las partículas suspendidas en un líquido estacionario. A continuación se aborda la importancia del movimiento browniano para la ciencia y la matemática, así como la historia alrededor de la contribución de Wiener a esta teoría.

La materia... ¿es continua o discreta?

La disyuntiva sobre la estructura de la materia nos plantea la idea de si siempre podemos continuar subdividiéndola; esto es, si es en cierto sentido continua o si hay un límite para esta subdivisión, lo que implica una estructura discreta de la materia. Ya en tiempos de los antiguos griegos fue aventurada la idea de que la materia es discreta y se construye a partir de átomos, bloques fundamentales, como plantearan Leucipo y Demócrito, principalmente. El romano Lucrecio defiende la teoría atómica en su libro *De rerum natura* (*Sobre la naturaleza de las cosas*), en el que encontramos la siguiente descripción muy acertada y poética del movimiento (browniano) de las partículas de polvo, en la que apoya su prueba de la existencia de los átomos. Se basa en una experiencia muy común:

Observe lo que sucede cuando los rayos de sol penetran en un edificio e iluminan sus zonas oscuras. Verá una multitud de pequeñas partículas danzando de muchas maneras. Su danza es una indicación de los movimientos subyacentes de la materia que escapan a nuestra vista. Se origina por los átomos que se mueven por sí mismos, espontáneamente.

Entonces, esos pequeños cuerpos compuestos (como las partículas de polvo) se ponen en movimiento por el impacto de los golpes invisibles de los átomos, y a su vez impactan a cuerpos más grandes. Así, el movimiento se transmite a escalas más grandes y gradualmente emerge al nivel de nuestros sentidos. Esto causa el movimiento de las partículas que vemos en los rayos del sol, causado por golpeteos que permanecen invisibles.

Una versión moderna de la observación anterior ocurriría cuando vemos un rayo de luz emitido por un proyector, ya sea en el cine o en una conferencia. Sin

embargo, muchas de las discusiones antiguas sobre la estructura de la materia se basaban más bien en este tipo de argumentos filosóficos y no tanto en la experimentación.

Más adelante, durante el siglo XIX, la hipótesis atomista fue considerada más sistemáticamente por los químicos, dado su interés por las sustancias y sus interacciones. Sus experimentos los llevaron, por ejemplo, a postular que las sustancias se componen por moléculas que están en movimiento incesante dentro de un fluido. Esta agitación explica por qué los fluidos tienden a llenar el recipiente o volumen que los contiene, propiedad conocida como expansibilidad.

Es al químico inglés John Dalton a quien debemos una formulación muy precisa de la hipótesis atomista: cada sustancia (elemental) está compuesta por una forma determinada de partículas rigurosamente idénticas, mismas que pasan por las diferentes transformaciones químicas sin subdividirse. Dalton fue conducido a la hipótesis atomista gracias a sus investigaciones acerca de la llamada ley de proporciones múltiples, que estipula que si cada dos sustancias elementales —más tarde llamadas simplemente elementos— se combinan para formar un compuesto, encontramos que en general la proporción entre las masas de los elementos se expresará casi siempre como cociente de dos enteros pequeños. Por ejemplo, el carbón y el oxígeno pueden reaccionar para formar monóxido o bióxido de carbono. En el primer caso, la proporción de masas es de 1 a 1, mientras que en el segundo caso es de 2 a 1. Sin embargo, para Dalton todavía no quedaba clara la distinción entre átomos y moléculas, lo que lo llevó a algunas conclusiones erróneas. Esta ley de proporciones múltiples ya era una indicación sobre





la estructura discreta de la materia, mas implica poder conocer los pesos de los átomos, en relación de los unos con los otros.

Para determinar los pesos atómicos faltaba, sin embargo, una pieza de información que permitiera conocer al menos uno de ellos, para así poder determinar el resto a partir de la ley de proporciones múltiples. Esta información se encontraría en otra rama de la ciencia: la física, específicamente en la teoría cinética de los gases. Ésta describe a los gases como una gran colección de partículas pequeñas que se encuentran en movimiento incesante. Una observación experimental es la de la hipótesis de Amedeo Avogadro: volúmenes iguales de gases diferentes –bajo las mismas condiciones de temperatura y presión– contienen igual número de moléculas. A esta cantidad se le conoce como número de Avogadro. Mas la pieza teórica clave para su determinación experimental es el movimiento browniano, y fue introducida por Albert Einstein.

A 1905 se le conoce como el “año milagroso” de Einstein, dado que publicó tres artículos fundamentales para la física. El primero de ellos trata sobre el

movimiento browniano. Su título es “Sobre el movimiento de pequeñas partículas suspendidas en un líquido estacionario, como requiere la teoría cinética-molecular del calor”, y el primer párrafo contiene la frase: “Es posible que los movimientos que se discutirán aquí sean idénticos al llamado movimiento browniano molecular; sin embargo, los datos a los que tengo acceso sobre éste son tan imprecisos que no me fue posible formarme un juicio al respecto.”

¿Y qué es el movimiento browniano? En 1828 el botanista inglés Robert Brown publicó el artículo “Un breve reporte sobre observaciones microscópicas de partículas contenidas en el polen de las plantas”. Al observar bajo el microscopio granos de polen suspendidos en agua, se dio cuenta de que presentaban un movimiento caótico e incesante sin una dirección determinada. El movimiento sería similar al de las partículas de polvo a las que apela Lucrecio. Al principio, Brown pensó que dicho movimiento podría ser una manifestación de la vida contenida en las partículas de polen, idea que rechazó al realizar experimentos con sustancias inorgánicas. De hecho, el fenómeno se presentaba en una gran cantidad de circunstancias y era una especie de molestia para los microscopistas, por lo que se difundió ampliamente el nombre de movimiento browniano aunque no hubiera explicaciones para él.

Einstein imaginó la siguiente consecuencia del modelo cinético de los gases. En un líquido se suspenden cuerpos de tamaño microscópicamente visible. Entonces, debido a los movimientos de las moléculas que conforman el líquido y que son más pequeñas, la partícula macroscópica observará un movimiento caótico, provocado por el golpeteo en todas direcciones de las moléculas. Einstein fue más allá para precisar el modelo probabilístico subyacente, al calcular la probabilidad de que la partícula macroscópica se encuentre hasta cierta posición en determinado tiempo. En la Figura 1 se esquematiza esta situación: se observan partículas grises que se mueven en todas direcciones –las posiciones anteriores se ilustran con la cola de las partículas pequeñas– y que impactan a una más grande.

Luego, mediante consideraciones físicas, relacionó los parámetros de su modelo con el número de Avogadro. Su artículo presenta una teoría física, la teoría cinética del calor, junto con un método para determinar



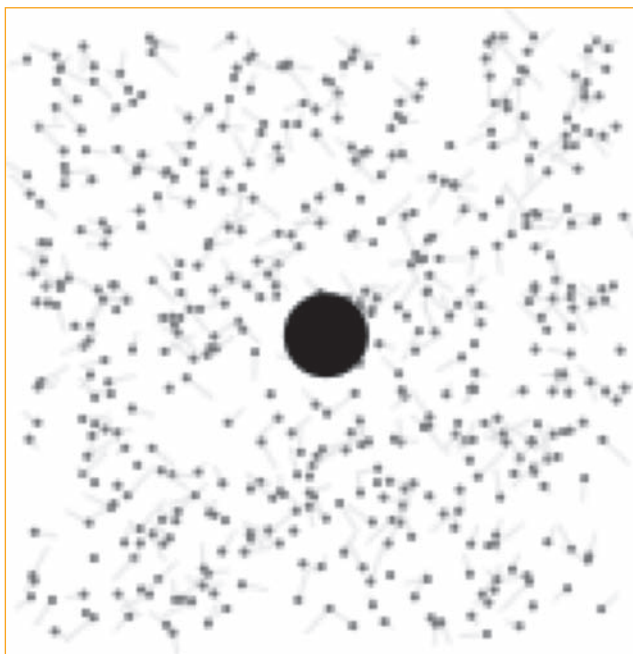


Figura 1. Esquematización de un gas conformado por partículas pequeñas (en gris). La estela color gris claro en cada partícula apunta hacia su posición una unidad de tiempo atrás. Hay una partícula mucho más grande (en negro) con la cual hay colisiones.

experimentalmente el número de Avogadro, lo cual daría sustento a las teorías atómicas de la materia.

La aportación de Einstein dio origen a una serie de experimentos que realizó Jean Perrin. Se dice que este trabajo resultó en la aceptación de la teoría atomista de la materia. Perrin ganó el Premio Nobel de Física en 1926, y el título de su conferencia fue “La estructura discontinua de la materia”.

En la Figura 2 se reproduce uno de los resúmenes visuales que hace Perrin de sus experimentos, publicado en el artículo “El movimiento browniano y la realidad molecular”. Se trata del registro de la posición de tres partículas coloidales con un radio de 0.53 micrómetros, vistas bajo un microscopio. De la figura, Perrin comenta: “Uno se da cuenta con tales ejemplos de qué tan cerca los matemáticos están de la verdad al rechazar, por instinto lógico, la admisión de las pretendidas demostraciones geométricas que se dan como evidencia empírica de la existencia de tangentes en cada punto de una curva.”

Las figuras de Perrin muestran la posición de las partículas en dos dimensiones. Si sólo nos fijamos en el desplazamiento vertical, obtenemos el llamado mo-

vimiento browniano unidimensional, en el cual nos enfocaremos a continuación.

Pasemos ahora a la teoría matemática del movimiento browniano, pues ahí Norbert Wiener tuvo una contribución fundamental. Incidentalmente, la anterior frase de Perrin fue una motivación importante para el trabajo de Wiener, como lo comenta en la segunda parte de su autobiografía titulada *Soy un matemático*.

La teoría matemática del movimiento browniano

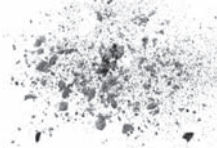
Como sabemos, el cálculo es una de las herramientas fundamentales de la matemática y tiene aplicaciones muy amplias en diversas disciplinas científicas. Fue desarrollado por Isaac Newton y Gottfried Leibniz a mediados del siglo XVII. En esta etapa inicial, los métodos dejaban ciertas imprecisiones que fueron resueltas durante un largo periodo de rigorización por matemáticos como Augustin Louis Cauchy, Karl Weierstrass y Bernhard Riemann.

Uno de los conceptos básicos en el cálculo es el de *derivada*, cuya interpretación geométrica es la de dar la pendiente de la recta tangente a una curva en un determinado punto.

Aunque fácilmente se pueden construir curvas que no admiten derivadas en algún punto (por ejemplo, poniendo una especie de esquina), para las aplicacio-



Figura 2. Registro de la posición de tres partículas coloidales con un radio de 0.53 micrómetros vistas bajo un microscopio. Original en *Les atomes*, de J. Perrin.



nes podía resultar natural argumentar que la curva con la que se estaba trabajando admitía una derivada. A este tipo de argumentaciones podría haberse referido Perrin con su expresión sobre “las supuestas demostraciones geométricas”.

Durante el periodo de rigorización del cálculo se formalizaron las definiciones de *función* y *derivada*, y en particular fue una sorpresa absoluta la construcción —hecha por Weierstrass— de una curva que no admitía derivadas en ningún punto. Esta función se obtenía con un procedimiento límite que suma cada vez más y más funciones periódicas de tipo sinusoidal. Este tipo de límites fueron estudiados a profundidad a principios del siglo XIX y ahora los conocemos como ejemplos de series de Fourier, dentro de la disciplina del análisis de Fourier o análisis armónico. En la Figura 3 apreciamos cuatro etapas en la construcción de Weierstrass de su función sin derivadas.

Observemos cómo sucesivamente van apareciendo más puntos en los que la curva cambia abruptamente de ser descendente a ser ascendente. Matemáticamente, consideramos la serie

$$\frac{\cos 2x}{\sqrt{2}} + \frac{\cos 4x}{2} + \frac{\cos 8x}{2\sqrt{2}} + \frac{\cos 16x}{4} + \dots$$

y las gráficas se obtienen al considerar 2, 4, 6 y 11 términos.

El título de la segunda parte de la autobiografía de Norbert Wiener es muy claro: él se ve a sí mismo como un matemático, independientemente de su trabajo en otras áreas de la ciencia. Como él mismo dice, uno de sus primeros trabajos importantes dentro de la disciplina fue la construcción del movimiento browniano como objeto matemático. Esto es, describió al movimiento browniano como una función aleatoria. Técnicamente, su trabajo consistió en construir una teoría de integración en el espacio —infinito dimensional— de

funciones continuas definidas en el intervalo $[0,1]$ y con valores reales, y fue equivalente a la construcción de una medida de probabilidad en dicho espacio. Este trabajo lo publicó en 1923 con el título “Differential Space” y, como él mismo comenta, pasaron muchos años para que se reconociera su importancia. Cabe señalar que Wiener convierte la frase de Perrin en el siguiente resultado matemático: con probabilidad 1, el movimiento browniano no es diferenciable en ningún punto, tal como la función de Weierstrass.

El trabajo “Differential Space” cobró importancia en el mismo periodo en que se desarrollaron otras construcciones del movimiento browniano, por parte de Andréi Kolmogórov en 1933, en su célebre tratado *Fundamentos de la teoría de la probabilidad*. Es importante enfatizar que el trabajo de Wiener precedió por diez años al de Kolmogórov, quien da una regla general —conocida como el teorema de consistencia de Kolmogórov— para construir medidas en espacios infinito dimensionales, así como un criterio —el llamado criterio de continuidad de Kolmogórov— para lograr que la medida se pueda construir en el mismo espacio que abordó Wiener. El trabajo de Kolmogórov coincidió con la publicación por Wiener de un tratado que tiene un lugar central en su obra —Análisis armónico generalizado, en colaboración con Raymond Paley— y en el que dio una segunda construcción mucho más sencilla del movimiento browniano. Así, a Wiener usualmente se le recuerda por describir al movimiento browniano como una serie de Fourier aleatoria, y su primera construcción de 1923 no es tan ampliamente utilizada. La construcción de Wiener tiene la forma

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{1}{\pi}} G_0 t + \sqrt{\frac{2}{\pi}} G_1 \frac{\sin 1 \cdot t}{1} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} G_1 \frac{\sin 2 \cdot t}{2} + \\ & + \sqrt{\frac{2}{\pi}} G_1 \frac{\sin 3 \cdot t}{3} + \sqrt{\frac{2}{\pi}} G_1 \frac{\sin 4 \cdot t}{4} + \dots \end{aligned}$$

En 1939 Paul Lévy propuso una construcción mucho más simple que la de Wiener, y es la que encontramos en los libros de texto actuales, porque tiene propiedades adicionales. La construcción de Lévy es similar a la de Wiener, salvo que reemplaza a las funcio-



Figura 3. Aproximaciones a una de las funciones sin derivadas de Weierstrass.

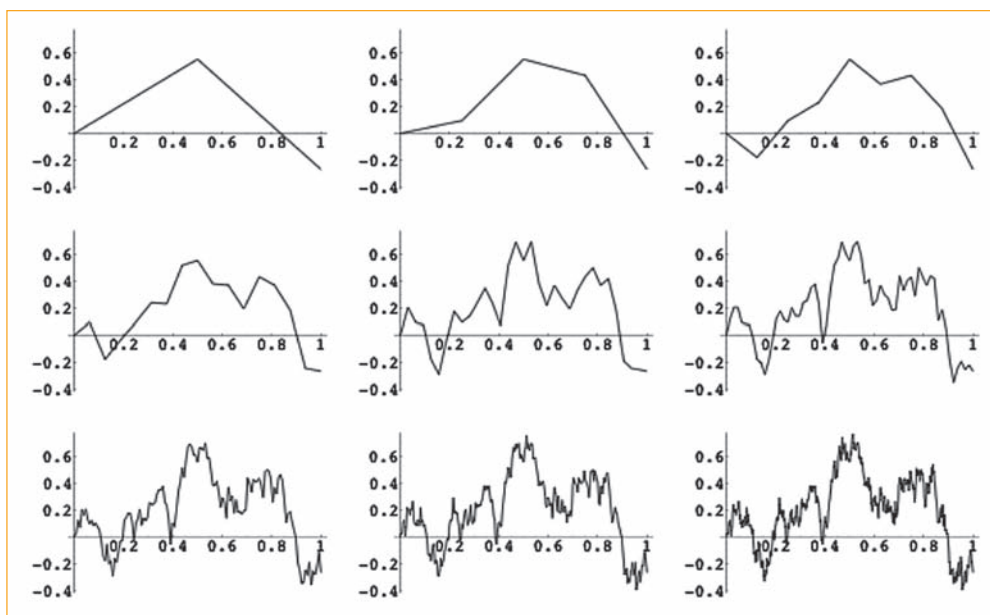


Figura 4. Aproximaciones al movimiento browniano mediante la construcción de P. Lévy.

nes sinusoidales por funciones tipo “tienda de campaña”, como en la Figura 4.

Como conclusión, cabe señalar que el movimiento browniano a veces se denomina *proceso de Wiener* y es una de las funciones aleatorias con mayor importancia dentro de la teoría de la probabilidad. Aún 90 años después de su construcción matemática, es un ejemplo vigente y sobre el cual existe una amplia investigación.

El autor agradece el apoyo económico de DGAPA-UNAM, a través del Proyecto PAPIIT IA101014 sobre Procesos Infinitamente Divisibles, para la realización de esta reseña.

Gerónimo Uribe Bravo estudió Actuaría en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), para continuar con estudios de doctorado en Ciencias Matemáticas en la misma institución. Su tesis fue galardonada con el Premio Weizmann 2009 a la mejor tesis doctoral en la categoría de ciencias exactas, otorgado por la Academia Mexicana de Ciencias. Realizó estancias posdoctorales en el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas de la UNAM, y en la Universidad de California en Berkeley. Cuenta con una decena de artículos de investigación publicados en revistas de circulación internacional. Su interés principal está en la teoría de la probabilidad, particularmente en los procesos estocásticos como caminatas aleatorias, movimiento browniano, y otros procesos de Lévy, o procesos de ramificación. geronimo@matem.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Bigg, C. (2008), “Evident atoms: visuality in Jean Perrin’s Brownian motion research”, *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 39(3):312-322. (Un panorama de las estrategias empleadas por Perrin para tender un puente entre lo visible y lo invisible.)
- Kahane, J. P. (1997), “A century of interplay between Taylor series, Fourier series and Brownian motion”, *Bulletin of the London Mathematical Society*, 29(3):257-279. (Un breve recorrido histórico enfocado en la matemática relevante para este artículo.)

- Perrin, J. (1913), *Les atomes*, París, Librairie Félix Alcan. (Disponible a través del proyecto de digitalización Gallica. Describe los trabajos teóricos que llevaron a aceptar la hipótesis de discontinuidad de la materia.)
- Wiener, N. (1956), *I Am a Mathematician*, Nueva York, Doubleday & Company. (Segunda parte de la autobiografía de Wiener en la que explora su etapa adulta y su carrera. Desde el primer capítulo habla sobre el movimiento browniano.)



Retroalimentación y sincronía en procesos

Esta reseña presenta los principios de la retroalimentación y la sincronía, los cuales son relevantes para explicar el comportamiento de los seres vivos y de las máquinas, según la modalidad de pensamiento de Wiener. Con ejemplos de diversas disciplinas, se muestra la necesidad e importancia de dichos principios para mantener una organización efectiva y en equilibrio de los sistemas dinámicos complejos, independientemente de su naturaleza. Este hecho justifica el interés de los investigadores que buscan nuevos fenómenos explicables en este contexto, y también de los ingenieros, porque buscan diseñar máquinas que emulen fenómenos naturales y evolutivos a través de la retroalimentación y la sincronía.

Introducción

La palabra *cibernética* proviene del griego *kybernētikē*, que se refiere a la acción de timonear un velero. Fue propuesta por el científico Norbert Wiener en 1947 como una modalidad de pensamiento para explicar el comportamiento de los seres vivos y de las máquinas mediante el uso de los dos principios fundamentales de todo sistema cuando se trabaja en condiciones normales y de armonía. Dicho pensamiento evidenció que la retroalimentación, la predicción y la sincronización están presentes en los seres vivos, la naturaleza, la sociedad y las máquinas, ya que estos principios son necesarios e indispensables para mantener una organización efectiva y en equilibrio para los sistemas dinámicos no lineales y complejos.

Wiener analizó estos conceptos ampliamente y con una gran visión del futuro en su libro *Cibernética: o el control y la comunicación en el animal y la máquina* (Wiener, 1948). Éstos sentaron las bases para el desarrollo y la consolidación de la ciencia de la información en la segunda mitad del siglo XX y lograron, además, una





formalización científica de la ingeniería en el diseño de máquinas y dispositivos con capacidad de medir, transmitir información y aprender a autoorganizarse, de manera similar a como lo hacen los seres vivos. Es así como se han desarrollado herramientas abstractas, llamadas algoritmos, para analizar o diseñar, en general, sistemas automáticos complejos adaptables en condiciones de regulación, de sincronía e inclusive de autodiagnóstico ante fallas, vía los principios de retroalimentación y de autoorganización.

Como un pequeño homenaje a Wiener, esta reseña introduce los principios básicos que se programan en un *chip*, o circuito integrado, que hace a las nuevas máquinas muy flexibles y capaces de emular el comportamiento de los seres vivos. Se pretende clarificar los conceptos de *retroalimentación* y *sincronía*, y analizar algunos de los logros alcanzados al explotar ambos principios fundamentales en la cibernética para el diseño de dispositivos y sistemas adaptables autoorganizados con alta capacidad logística, que la mercadotecnia denota simplemente como *smart* —sin que sean realmente inteligentes— por hacer una analogía con la capacidad del ser humano.

Muchos dispositivos tecnológicos se han vuelto de uso cotidiano dentro de la sociedad debido a un bajo costo y a la simplicidad de su uso. Se podrían mencionar las máquinas de impresión, los teléfonos, las cámaras fotográficas y de cine, las aeronaves, los audífonos, los sistemas de refrigeración, los controles remotos, etc. La sociedad moderna maneja con familiaridad dichos dispositivos; a simple vista parece que nos hemos convertido en fotógrafos, pilotos, astronautas, impresores, barrenderos, porteros, etc., por el simple hecho de dar órdenes al oprimir botones, pero sin comprender qué

los hace capaces de ofrecernos los servicios de manera automática. Estos equipos se han convertido en herramientas flexibles generalizadas de trabajo e integradas a la sociedad del siglo XXI a tal grado que inclusive hablamos con los dispositivos y les otorgamos particularidades similares a las de los seres vivos. Sin embargo, pocos se preguntan: ¿qué procesos se llevan a cabo, internamente, en las máquinas y los dispositivos para que parezcan ser inteligentes y tengan una gran aceptación?

El prefijo *ciber-* es usado por la sociedad actual —lamentablemente— para denotar lo relacionado con la tecnología moderna, pero sin entender realmente qué hay detrás y sin preguntarse: ¿qué tienen los nuevos equipos, comparados con los de nuestros ancestros, que los hace flexibles, universales y con servicios superiores?, ¿de qué se les ha dotado para que respondan en cierto sentido como seres vivos y, además, tengan la capacidad de organizarse de forma similar a una sociedad desarrollada o de sincronización, a la manera de las luciérnagas para emitir un centelleo rítmico?

Retroalimentación, fenómeno natural

El acto cognitivo de un ser vivo consiste en llevar a cabo acciones vía un procesamiento de información, a partir de su percepción, experiencia y subjetividad. Esto es factible dado que los organismos tienen la capacidad de almacenar, recuperar, reconocer, comprender, organizar y usar la información proveniente de sus sentidos. Dichas acciones constituyen una característica central de la vida en condiciones normales; son generadas por organismos dinámicos que se comunican, de tal manera que cada una de ellas influye en los demás, lo cual forma un ciclo interconectado llamado cadena retroalimentada.

El término *retroalimentación* se refiere, en forma general, a una situación en donde dos o más sistemas dinámicos se comunican, de tal manera que cada sistema influye en el otro y, por lo tanto, sus dinámicas están acopladas. En el contexto de un modelo recursivo, la retroalimentación está siempre presente, dado que una acción o variable en una recursión depende de otras pasadas y, asimismo, las siguientes dependerán de las actuales.

Un sistema retroalimentado toma en cuenta la información de acciones pasadas y, con base en ellas, decide las acciones subsecuentes; se crea así una estructura causal circular en donde el tiempo es la variable independiente.

Una forma de visualizar el principio de la retroalimentación es considerando un sistema con dos elementos, D1 y D2, interconectados en ciclo, de tal manera que D1 influye en D2 y éste, a su vez, influye en D1. En consecuencia, el comportamiento del sistema está siempre gobernado por las reacciones y los tiempos de respuesta de ambos elementos.

En la Figura 1, mediante un diagrama de bloques, se muestra la idea de la retroalimentación de dos sistemas en donde el bloque sistema dinámico D1 es excitado por causas exógenas (U_s) que afectan su comportamiento, y se producen efectos (Y_s). Parte de dichos efectos (U_r) son causas del sistema D2, el cual responde rápidamente provocando acciones retroalimentadas (Y_r) que, posteriormente, excitan al sistema D1. Cuando se llevan a cabo tareas de regulación con un esquema retroalimentado, para compensar los disturbios que afectan al sistema D1, el sistema D2 debe responder rápido; de ahí el ícono de una liebre en el bloque D2, en comparación con el sistema D1, que está identificado con una tortuga.

Los sistemas biológicos hacen uso de la retroalimentación en una cantidad extraordinaria y en formas muy ricas de organización. Así, las cadenas retroalimentadas ejecutan tareas distintas en todos los niveles, desde la interacción de las proteínas en las células, hasta el acoplamiento de organismos en un ecosistema complejo, como es la vida en la selva. La retroalimentación permite gobernar la forma de caminar, de responder al

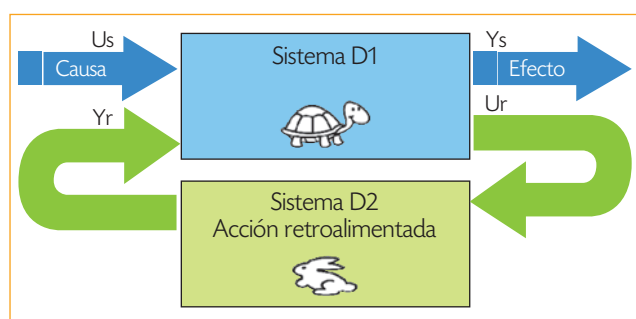


Figura 1. Esquema retroalimentado básico.

estrés y a los retos; regula factores como la presión sanguínea, el nivel del colesterol, la glucosa en la sangre o la temperatura corporal, etcétera.

La neurofisiología concibe al sistema nervioso central como un proceso retroalimentado de múltiples elementos, que interactúan con los músculos y cuya información reingresa de nuevo al sistema nervioso a través de los órganos sensoriales; esto da lugar a un organización compleja y no divisible.

Por lo que respecta a los ecosistemas y el entorno social, también éstos están formados por múltiples esquemas retroalimentados, esenciales en la vida del conjunto como un todo, y que solamente son capaces de operar masivamente cuando existe un apropiado balance entre las fuerzas que provocan cambios, vía una retroalimentación positiva, y las que proporcionan estabilidad, vía una retroalimentación negativa.

Los sistemas naturales, ya sean biológicos o ecosistémicos, tienen un flujo de información grandioso, inimaginable; así como patrones de comportamiento muy intrincados que hacen que actualmente no se cuente con metodologías de estudio rigurosas con las cuales se puedan descubrir y explotar las características y estructuras matemáticas de interconexión de los elementos del sistema complejo para su análisis como un todo. Este problema es uno de los retos de las ciencias naturales del siglo XXI y ha sido génesis de grupos de científicos con intereses en matemáticas, biología y ciencias sociales, quienes lo abordan de una manera interdisciplinaria.

Por lo que respecta a los ejemplos de sistemas inventados por el hombre, el termostato es un dispositivo tecnológico temprano que opera bajo el principio de la retroalimentación negativa. Éste actúa a partir de una temperatura deseada, indicada en la perilla. Si la temperatura del cuarto está por debajo de lo establecido en el indicador, se activa el elemento que disminuye el aire frío para que la temperatura suba hasta el nivel deseado de manera lenta; si, por el contrario, la temperatura está por arriba de la deseada, el regulador aumenta la cantidad de aire frío o se interrumpe el flujo de aire caliente. De este modo, la temperatura oscila alrededor del valor indicado.

El mismo proceso se lleva a cabo en el ser humano con ayuda del hipotálamo, que hace las veces de



termostato porque mantiene el equilibrio entre la producción y la pérdida de calor en el cuerpo con la sudoración y el temblor corporal producido por un descenso de la temperatura.

También en el entorno social se encuentran esquemas retroalimentados en los grupos interpersonales como las redes sociales, las parejas matrimoniales, las familias, las relaciones psicoterapéuticas o incluso internacionales, ya que los miembros de dichos grupos se comunican entre ellos y la conducta de cada persona influye en la de las demás y es, a su vez, afectada por aquéllas.

Dentro de los sistemas diseñados por el hombre, en los que sería imposible su operación sin involucrar miles de esquemas retroalimentados, está la red de energía eléctrica de una región. En este caso, se desea satisfacer la demanda de voltaje y frecuencia constante de manera continua y, para ello, los actores dinámicos involucrados son: los diversos tipos de fuentes de generación de energía, las redes de distribución y los usuarios cuyo consumo de electricidad varía de forma continua. No obstante, se puede decir que a pesar de la complejidad de las redes eléctricas, éstas están lejos de ser robustas y de mantener la operación en condiciones tan variadas como lo hacen los sistemas biológicos.

También los esquemas actuales de la producción y el consumo explotan los ciclos retroalimentados para mejorar la economía como un todo. La Figura 2 muestra la cadena dinámica de comunicación propuesta por Forrester en 1961, en la cual los actores interactúan con al menos otro de ellos y en donde es evidente que

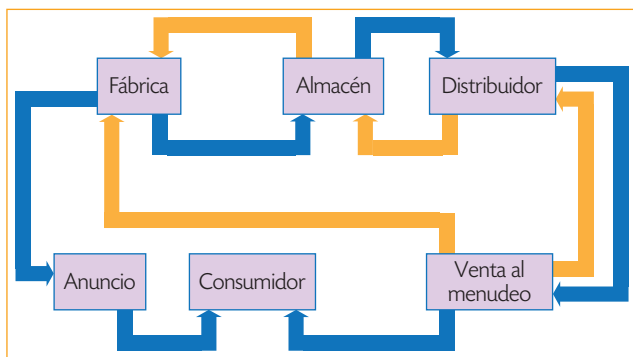


Figura 2. Cadena dinámica de suministro en donde los agentes con múltiples ciclos tratan de mantener el nivel del inventario en un mínimo. La mercancía fluye del productor al consumidor, vía la cadena de distribución y venta al menudeo.

ninguno puede subsistir de manera aislada y se requiere de la comunicación entre todos ellos para que el sistema sea eficiente como un todo.

La robótica y el diseño de máquinas inteligentes son disciplinas que resultaron de las ideas de Wiener. Fueron desarrolladas a partir de los años cuarenta del siglo XX, cuando se acuñó el término *inteligente* para denotar la gran flexibilidad de respuesta de los dispositivos modernos ante muy variadas circunstancias. Estas máquinas llamadas humanoides son posibles gracias a un nivel significativo de esquemas retroalimentados y a la miniaturización de los componentes electrónicos y mecánicos que los conforman. En los últimos años, el éxito y avance de estos campos lo demuestran:

- Los exploradores *Rovers* que llegaron a la superficie de Marte y se mantuvieron en operación por más de cuatro años, teniendo comunicación con la Tierra y enviando mediciones e imágenes del planeta.
- El robot Da Vinci, desarrollado por la empresa estadounidense Intuitive Surgical y aprobado en el año 2000 por la FDA (Food and Drug Administration, Agencia de Alimentos y Medicamentos) de Estados Unidos, el cual perfecciona los movimientos del cirujano para hacer más segura la cirugía.

A pesar de los avances de la robótica y la inteligencia artificial, aún es necesario mejorar el manejo de imágenes, desarrollar instrumentos que permitan medir y actuar de forma más flexible para lograr que en ciertas condiciones tengan más similitudes con los seres vivos. El problema de la autosuficiencia, desde un punto de vista de la energía, también representa un reto para la ingeniería.

Quizá una de las áreas en donde las ideas de Wiener han fructificado de manera notable es la de redes de cómputo y sistemas computacionales. Disponer del sistema retroalimentado más grande y complejo diseñado por el hombre, como lo es internet, ha cambiado la forma de comunicación de la sociedad y la distribución de la información; sin embargo, a pesar de ello todavía hay retos por vencer. Uno de los principales problemas es la desestabilización de la red por las múltiples perturbaciones que se pueden presentar, incluidas aquéllas que han sido provocadas maliciosamente. La gran can-

tividad de nodos activos y la rápida velocidad de respuesta de una red obligan, entonces, a proponer esquemas que sean capaces de tomar decisiones rápidas, basadas en la información local y que traten de reducir los retardos en el flujo de la información dentro de los ciclos.

Por otro lado, existen aplicaciones innovadoras e importantes del principio de la retroalimentación que están presentes en los instrumentos empleados en la biología, astronomía y física en general; prueba de ello son el espectrómetro de masas y los grandes telescopios.

Pese al maravilloso principio de la interconexión de los sistemas en forma retroalimentada, hasta hace más de medio siglo cada disciplina estudió de manera independiente el fenómeno de la retroalimentación, sus propiedades y los efectos de acoplamiento entre los elementos, lo cual provocó una demora para el conocimiento global de la ciencia. Hoy se reconoce en todas las ciencias que las principales ventajas de la retroalimentación son:

- La capacidad para manejar incertidumbres y perturbaciones.
- La posibilidad de modificar la dinámica global de un sistema y alterar el comportamiento para cada aplicación.

También, en el medio científico es sabido que un mal ajuste o daño en los elementos que conforman el ciclo provoca la desestabilización del sistema. Un ejemplo tecnológico común de inestabilidad con una retroalimentación positiva es el zumbido que se escucha en los altavoces cuando el factor de amplificación del micrófono es demasiado grande. En este caso, el ruido que registra el micrófono en una sala de conciertos es amplificado y emitido por las bocinas; ya amplificado, éste es registrado nuevamente por el micrófono y otra vez amplificado; y así sucesivamente, lo cual provoca el zumbido que irrita.

Apenas hace 70 años, Wiener le abrió los ojos a la sociedad y mostró la relevancia de estudiar las múltiples formas de operación de los sistemas retroalimentados en beneficio de entender mejor a los seres vivos, la naturaleza y la sociedad, para así, además, poder construir máquinas que emulen sistemas naturales y sociales complejos. Este pensamiento ha mostrado su robustez y



capacidad de adaptación ante disturbios y fenómenos muy variados a lo largo de nuestra existencia. Hoy en día se sabe que el principio de la retroalimentación es simple, está basado en la corrección entre lo deseado y el desempeño actual, y se ha redescubierto y hecho patente en múltiples formas. La razón de su notable desempeño se debe a que es robusto ante incertidumbres o perturbaciones de los elementos que forman el ciclo. Esto se explica porque, al aumentar el error entre lo deseado y lo actual, debido a las perturbaciones, el sistema global tiende a autorregularse si las acciones de control son moderadas y se ajustan en función del factor de amplificación y velocidad de respuesta de cada actor dentro del ciclo.

Entonces, se puede decir que los autómatas creados por el hombre están conectados al mundo externo para la recepción de impresiones y eventos, para realizar actos. Para ello disponen de órganos sensoriales, efectores y el equivalente a un sistema nervioso central integrador de la transferencia de información entre unos y otros.

Los ejemplos antes indicados ponen en evidencia que los seres vivos, la naturaleza, la sociedad y las máquinas operan usando en múltiples formas el principio de la retroalimentación o interacción en ciclo. Incluso las catástrofes naturales y sociales, como las guerras, se pueden estudiar y entender como un desbalance de las fuerzas de estabilización compensatorias con una



retroalimentación negativa, y las fuerzas del cambio de tendencia, con una positiva. Entonces, resulta fundamental para el avance y el bienestar, en términos generales, adoptar formas de actuar en el entorno que nos lleven a establecer puntos de equilibrio en los sistemas sociales, económicos, políticos, e inclusive en los ecosistemas.

Sincronía, fenómeno inevitable

De manera similar a la retroalimentación, la sincronización es un fenómeno natural, espontáneo e inevitable para el desarrollo de los seres vivos, la naturaleza y las máquinas, y puede considerarse una maravilla de la evolución. La palabra tiene diferentes acepciones derivadas de la física y de la filosofía, mas se refiere a la coincidencia en el tiempo o simultaneidad de los hechos. El dispositivo creado por el hombre –quizá el más antiguo– para estudiar el fenómeno de la sincronización es el reloj de péndulo. Christiaan Huygens observó que cuando dos relojes de péndulo se ponían cerca, ambos oscilaban en sincronía, sin importar cómo empezara la oscilación. La misteriosa “simpatía” entre los relojes desaparecía cuando se alejaban. Es decir que, bajo ciertas circunstancias, existen relaciones entre los cuerpos –en este caso, la distancia entre ellos– en que la acción de uno induce el mismo comportamiento en el otro.

El fenómeno de sincronización es ubicuo y está presente en las órbitas de los cuerpos celestes, los electro-

nes, en la música y el zumbido de los grillos. A pesar de este hecho, no es obvio visualizar que está en todo el universo, es decir, en todo sistema donde los elementos que lo forman logran un efecto de autoorganización de manera coherente, con cierta armonía. Fenómenos como el destello sincronizado con ritmo de las luciérnagas, sin ser inteligentes y sin la necesidad de un coordinador, son claras evidencias de que la sincronización es algo natural y que emerge ante ciertas circunstancias, si se entiende la palabra *emergente* como un fenómeno cualitativo de cambios generados de forma espontánea dentro de un sistema.

La sincronización se alcanza si existe una relación fija entre instantes de tiempo correspondientes a dos o más señales y se logra a través del movimiento colectivo y ordenado de los elementos de un sistema. En otras palabras, la sincronización surge a partir de la dinámica de los elementos constitutivos de un sistema. Justamente, este comportamiento ordenado es el que genera la sincronización y permite al conjunto desempeñar funciones simples o complejas sin la necesidad de un líder (Strogatz, 2003).

Un pequeño oscilador, un conjunto de metrónomos que ajustan su compás con otros miembros en un entorno y ciertas condiciones de disparo son suficientes para que emerja la sincronía de manera análoga, como lo que hacen los músicos al ejecutar una pieza de manera acoplada sin un director o líder.

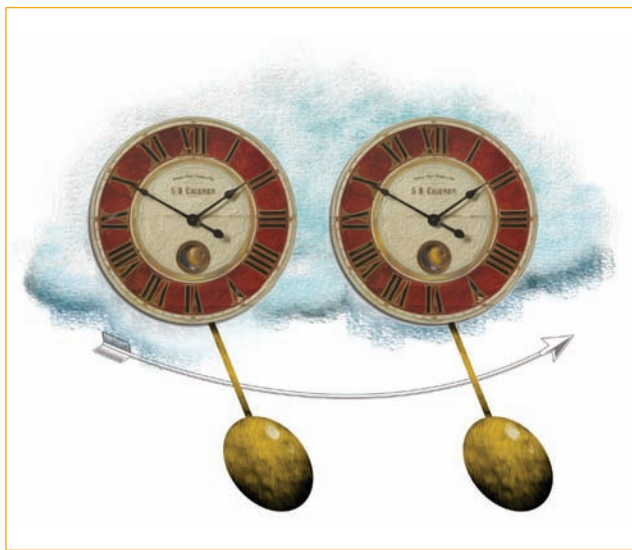


Figura 3. Simpatía entre relojes pendulares.



A partir de los años ochenta del siglo pasado, se han estudiado los patrones de sincronización para buscar propiedades globales en el marco de sistemas no lineales, y se han usado las ideas novedosas del caos que pueden ser aplicadas a la física, la biología, la medicina, la economía, la lingüística y a otras muchas disciplinas del saber humano (Braun, 1996). Es así como diversas áreas convergen y buscan explicar fenómenos con ayuda de herramientas matemáticas y de sistemas dinámicos no lineales. Actualmente se ha reconocido que el fenómeno de la sincronización tiene las siguientes propiedades:

- Es global y ubicuo, porque está presente en todos los lugares.
- Es estable, ya que es capaz de generar armonía en los movimientos de los diferentes elementos de un conjunto.
- Es colectivo, debido a que requiere la interacción y comunicación, al menos entre dos o más elementos del grupo.
- Existen movimientos ordenados tanto en los sistemas regulares como en los caóticos, dado que ambos tienen un patrón.

En los sistemas biológicos hay un variado tipo de ritmos asociados a los relojes biológicos. La sincronización está presente en las células, lo que permite el latido del corazón, el ritmo del sueño, etcétera.



Un acto cognitivo implica la coordinación de numerosas regiones neuronales, coordinación basada en la formación transitoria de grupos de neuronas que crean lazos dinámicos sincronizados en sus fases; es decir, las señales generadas por las neuronas dentro del grupo suben y bajan de manera simultánea. Esta sincronía de fases crea la coherencia y la unidad para producir oscilaciones y la sincronización en distintas zonas del cerebro, como si fueran instrumentos musicales.

En general, la naturaleza es un sistema en armonía y está formada por miles de sistemas sincronizados. Lamentablemente se han reportado recientemente estudios que muestran que la sincronía se está perdiendo en los ecosistemas debido al aumento de la temperatura en primavera, pues en las especies ha desaparecido su sincronía.

Una muestra de la importancia y necesidad de la sincronía es la insuficiencia cardíaca avanzada que presenta alteraciones en la conducción intraventricular y ocasiona una asincronía en la contractilidad normal del ventrículo, que deteriora la función cardíaca. Dentro de las opciones terapéuticas para la insuficiencia cardíaca, que cada vez adquieren un papel más importante, está la que utiliza células madre para regenerar tejido dañado en el corazón y restablecer el bombeo sincrónico. Es decir, se propone una estrategia de *resincronización biológica*, en la cual las células madre reparan el músculo dañado del corazón para restablecer el





movimiento cardíaco correcto, lo que hace más efectivos los dispositivos artificiales.

La sincronización de ondas cerebrales sostiene la memoria de objetos recién vistos, o sea que el reconocimiento de imágenes puede ser considerado también como una tarea de sincronía. Igualmente, en el área de la psicología existen estudios sobre la existencia del fenómeno de la sincronización. Además, en la neuropsicología aplicada existe una terapia llamada SHEC (sincronización de los hemisferios cerebrales) para sanar diferentes problemas psicológicos. Este proceso, detrás de la terapia, consiste en equilibrar los dos hemisferios cerebrales por medio de sonidos y ultrasonidos.

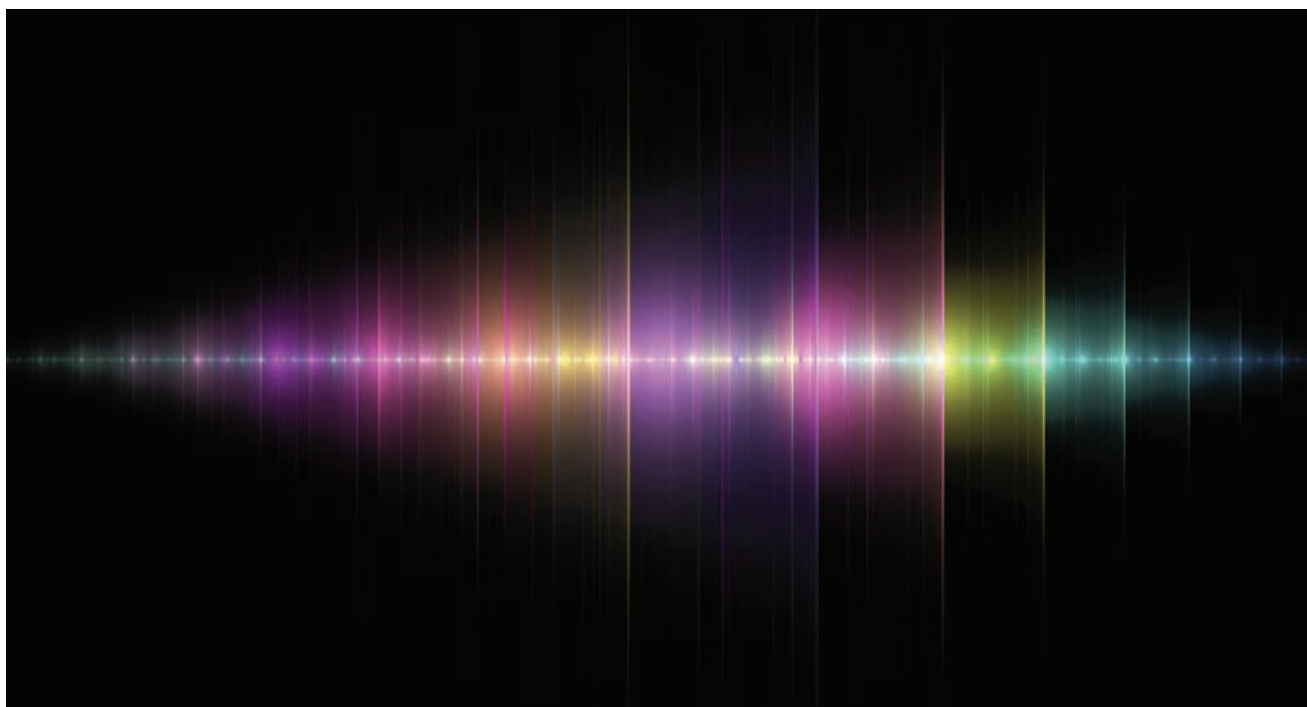
Al considerar a las máquinas, es quizá menos impactante el fenómeno de la sincronización; pero no deja de ser un gran logro la sincronía de sistemas de gran escala. Tal vez es porque lo que hace la tecnología es simplemente copiar el mecanismo que la naturaleza y los sistemas sociales han generado para estar en armonía y en paz. Pero entre las aplicaciones más evidentes de los sistemas sincronizados de gran escala creados por el hombre están los generadores de las redes eléctricas que oscilan todos a la frecuencia de la línea en una región y las redes digitales de comunicaciones. En esta última aplicación, la transferencia electrónica de datos

es viable gracias a los modelos de sincronización y consensos con señales de reloj y semáforos de tráfico que se ejecutan a la vez a grandes velocidades empleando un mayor número de canales.

Entre los investigadores de la aeronáutica y la robótica existe una gran inquietud, por lo que actualmente se dedican grandes esfuerzos a diseñar esquemas sincronizados que permitan la formación autónoma de ciertas configuraciones de desplazamiento en aeronaves no tripuladas, robots móviles y satélites, lo cual puede ser de ayuda para labores de rescate y seguridad.

Conclusiones

Se puede concluir que estamos lejos de explicar de qué forma se vincula a la retroalimentación y la sincronía con la evolución y el *homo sapiens*. Por lo tanto, las máquinas y los sistemas creados por el hombre que tienen capacidad de autoorganización son, aún, muy primitivos comparados con la evolución en la naturaleza. En la monografía de Larocca (2015) se analiza cómo la *Explosión creativa* hizo su aparición sorpresiva, instantánea y simultánea en todas partes hace 40 000 años. De ésta se llega a pensar que la naturaleza es como el cerebro, un sistema autoorganizado, y que la





ocurrencia del ciclo menstrual y del movimiento lunar pudieron haber sido los elementos catalizadores de la generación del arte. Resultado de éste y de muchos otros enigmas es el gran interés, por un lado, de los investigadores de las ciencias naturales, sociales y económicas, por mencionar algunas, que buscan nuevos fenómenos explicables en el contexto de los sistemas sincronizados y esquemas retroalimentados con rigor matemático y científico, y, por otro lado, el de los ingenieros y tecnólogos que buscan diseñar máquinas que emulen fenómenos naturales y de la evolución, como la sincronía, de manera tan perfecta como lo hace la naturaleza.

La autora agradece el apoyo parcial de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM) y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) para poder realizar esta reseña.

Cristina Verde Rodarte es la primera mujer en haber obtenido el grado de doctora en Ingeniería Electrotécnica por la Universidad de Duisburg, Alemania, en 1983. Es autora de alrededor de 35 artículos de investigación en revistas de circulación internacional y más de 150 trabajos publicados en congresos internacionales y nacionales. Es investigadora en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México desde 1984 y miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde su fundación. Su interés principal es el diseño de esquemas de control, de diagnóstico y de supervisión automática para sistemas dinámicos.

verde@unam.mx

Lecturas recomendadas

- Braun, E. (1996), *Caos, fractales y cosas raras*, México, Fondo de Cultura Económica.
- Larocca, F. (2015), "La creatividad y la neurociencia". Disponible en: <http://www.academia.edu/3728405/La_creatividad_y_la_neurociencia>. Consultado el 29 de enero de 2015.
- Strogatz, S. (2003), *The Emerging Science of Spontaneous Order*, Hyperion Books.
- Wiener, N. (1948), *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Nueva York, Wiley & Sons.

Sergio Rajsbaum y Eduardo Morales,
editores huéspedes

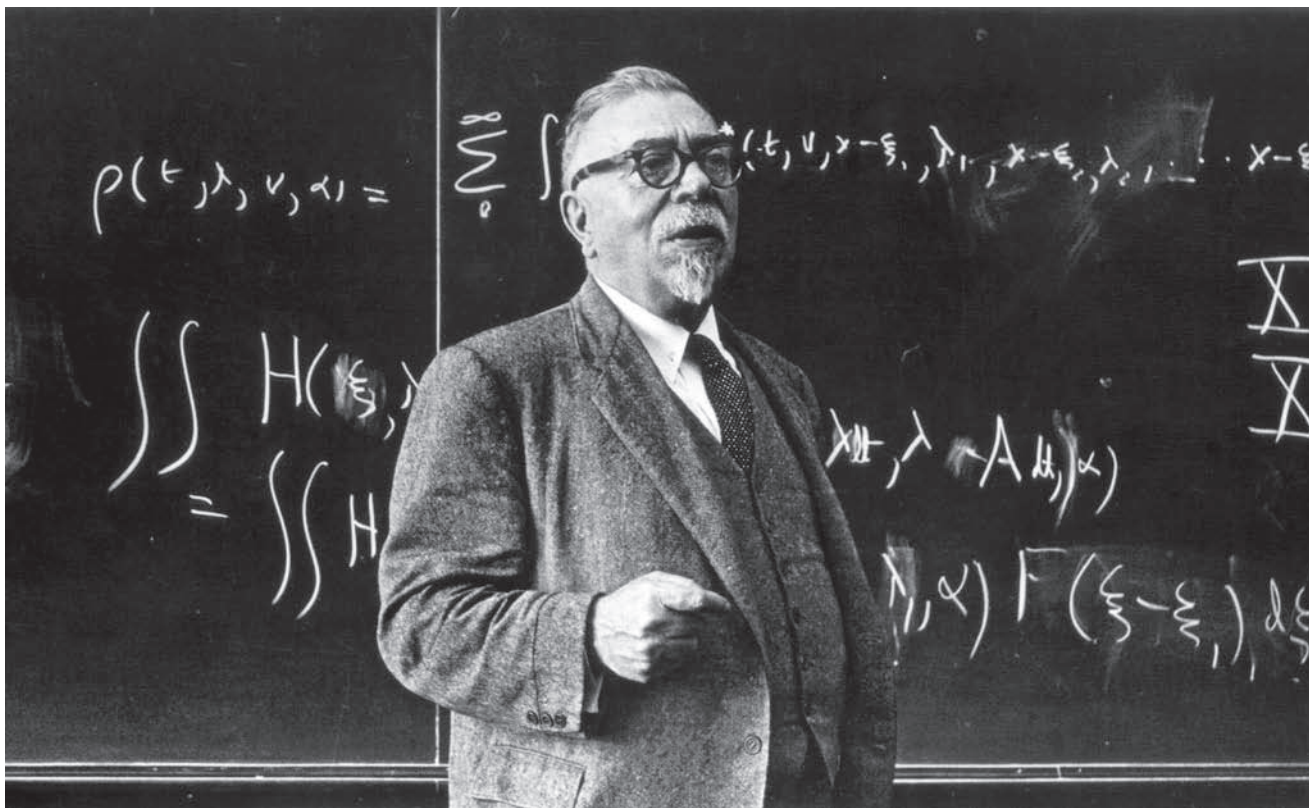


Presentación

Norbert Wiener y el origen de la cibernética

En el año 2014 se llevó a cabo la conferencia “Norbert Wiener in the 21st Century”, de la asociación de ingenieros más importante del mundo: el Instituto de Ingenieros en Electricidad y Electrónica (IEEE, por sus siglas en inglés). Esto fue para conmemorar 120 años del nacimiento y 50 de la muerte del matemático y filósofo estadounidense Norbert Wiener (1894-1964).

El “padre de la cibernética” fue muy famoso en su época; hasta en las mesas del comedor de las amas de casa había una copia de su libro *Cibernética*. Realizó aportaciones importantes en varias áreas de las matemáticas, principalmente en análisis, probabilidad y teoría de control. Junto con otras figuras clave de la época, como Alan Turing, John von Neumann y Claude Shannon, dieron lugar al nacimiento de las ciencias



Norbert Wiener. Fotografía tomada de: Massachusetts Institute of Technology.

de la computación. En especial, Wiener tuvo un papel destacado en las ramas relacionadas con la inteligencia artificial. De hecho, influenció el pensamiento de neurólogos, psicólogos, sociólogos y filósofos de la época, con sus ideas cibernéticas de la retroalimentación.

Su vida compleja y controversial es fascinante; desde sus inicios como niño prodigio, pasando por su matrimonio con una mujer que apoyaba a los nazis —cuando él mismo era judío—, también por su influencia en China, India y la Unión Soviética, hasta las últimas etapas en que se la pasaba predicando sobre los enormes peligros de las máquinas y la automatización, que él mismo había contribuido a desarrollar; así como su oposición a que la ciencia recibiera apoyos del gobierno y las agencias militares, en una época especialmente crítica en Estados Unidos, durante la Segunda Guerra Mundial.

La vida y obra de Wiener

Recordar la vida y obra de Wiener es una gran oportunidad para meditar acerca de cómo progresa y se desarrolla la ciencia. Hoy casi nadie sabe quién fue Wiener, y casi nada de lo que es la cibernética, de la cual es difícil identificar alguna noción específica que haya dejado huella en la ciencia

moderna, excepto por sus primeros trabajos matemáticos que siguen siendo relevantes y son bien conocidos por ingenieros y científicos especialistas en esos temas. Sin embargo, el científico puede dejar huellas de diversas formas.

Wiener fue una de las figuras más importantes de su época. En 1963 ganó la Medalla Nacional de Ciencia de los Estados Unidos. Hace apenas poco más de 50 años era el famoso profesor del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) que merodeaba por todo el campus de Cambridge mientras leía y, para no caerse, alargaba una mano a la pared; buscaba siempre con quién discutir sus muy variadas ideas y platicaba en la cafetería con estudiantes de licenciatura; entraba a los salones repentinamente y por todos lados dejaba las cenizas de su célebre puro.

Sin embargo, en Estados Unidos y Europa su influencia en el desarrollo de la computación y la automatización quedó diluida, en parte, debido al entusiasmo con el cual lo recibió la Unión Soviética, donde el sistema comunista de la época tomó inspiración de las ideas de Wiener. En Estados Unidos se fue adoptando el concepto de *inteligencia artificial*, lo que contribuyó al olvido del término *cibernética*, que se empezó a asociar con el comunismo.



Viajero incansable, en India fue recibido con los honores de un jefe de Estado, y se debe en buena parte a sus visitas por el desarrollo de la ciencia en ese país. Famoso por su habilidad con los idiomas, aprendió mandarín durante su estancia en China. Es de notar que México era uno de los países a los que Wiener viajaba mucho para colaborar con su amigo, el gran neurofisiólogo mexicano, Arturo Rosenblueth, cofundador del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Durante su estadía en el Instituto Nacional de Cardiología, Wiener escribió su obra más conocida, que dedica a Rosenblueth: *Cibernética*. La amistad inició cuando Rosenblueth estaba en Harvard, donde ambos participaban en reuniones mensuales dedicadas a la discusión del método científico, recordadas por Wiener en su libro de la siguiente manera, que bien refleja lo apasionado de su personalidad:

La conversación era vivaz y no tenía restricciones. No era un lugar para buscar la aprobación o para mantener una posición. Después de la cena, alguien —ya fuera de nuestro grupo o algún invitado— leía un tema científico que, en general, era de metodología, o al menos tenía que ver con ella. El expositor tenía que enfrentarse a una crítica aguda, bienintencionada pero despiadada. Era una catarsis perfecta para las ideas indefinidas, la autocritica insuficiente, la exagerada confianza y la pomposidad. Los que no aceptaban ese ambiente no regresaban, y entre los asiduos habíamos varios que sentíamos que estas reuniones eran una parte importante de nuestro desarrollo científico.

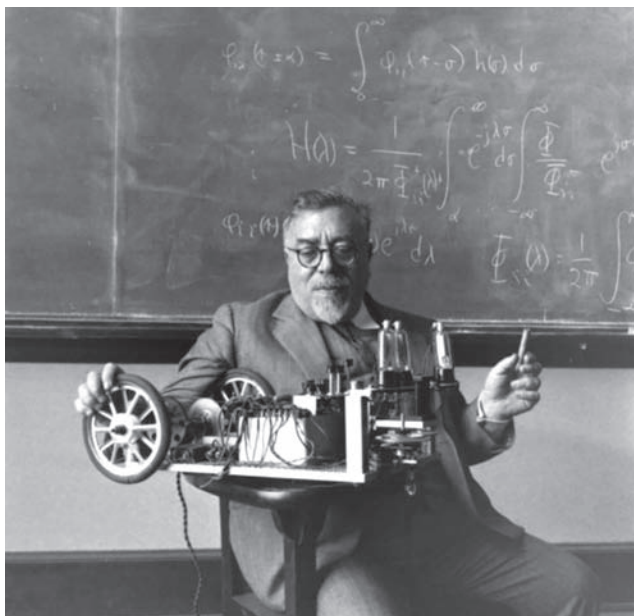
La carrera científica de Wiener fue obstaculizada no sólo por factores políticos e ideológicos, relacionados con sus ideas radicales antibelicistas durante la época en que su propio país estaba involucrado en la Segunda Guerra Mundial, y después en la Guerra Fría. Quizá el episodio más trágico inició durante una cena en México con su esposa Margaret, quien estaba enferma de celos y odio hacia Warren McCulloch —con quien Wiener tenía una extraordinaria amistad y colaboraba en el estudio del funcionamiento de las neuronas y el cerebro, dentro de un brillante grupo que incluía a Jerome Lettvin y Walter Pitts—. Margaret le dijo a Wiener que su hija Barbara había sido seducida por ellos cuan-



Arturo Rosenblueth en su laboratorio. Archivo fotográfico de Arturo Rosenblueth de El Colegio Nacional, México, D. F.

do era adolescente, durante una visita a McCulloch. Wiener creyó la historia y rompió todo contacto con los miembros del grupo. Separarse de esta exitosa línea de investigación provocó un gran daño para él mismo, para Barbara, y para todos los demás, sobre todo por la depresión de Pitts, que acabó por quitarle la vida.

Repasar su biografía es también un buen momento para reflexionar sobre las constantes advertencias que hizo Wiener sobre perder de vista los peligros del “uso del hombre por el hombre”, como él decía, y los riesgos de depender de máquinas cada vez más poderosas y sofisticadas que tomen decisiones por nosotros. Hoy en día, en un gran avión comercial pueden volar cientos de personas a 10 000 metros de altitud con mayor seguridad que la que proporciona un automóvil, gracias al equipo que forma la máquina con el sistema de control automático de vuelo y el hombre (sea piloto o controlador en Tierra), que casi no hace más que supervisar. Y es precisamente en este contexto donde quizá encontramos la gran contribución de Wiener que permea hasta nuestros días. Apenas unos meses después de su muerte, ya su fama se desvanecía y el mundo se preguntaba a qué se había debido tanto escándalo por la cibernética. El término mismo estaba pasando de moda, y en su lugar entraba el que hasta ahora se mantiene:



Norbert Wiener y su "Palomilla". Tomada de: <http://cyberneticzoo.com/tag/norbert-wiener/>

inteligencia artificial. La clave, nos dice Toulmin (1964), está en que fue Wiener el que rompió con el tabú que dirigió el desarrollo de la ciencia por 200 años, de manera que daba por hecho que los procesos mentales son no sólo conceptualmente, sino absolutamente, diferentes de los procesos mecánicos. Wiener abrió la posibilidad de encontrar un único marco conceptual cuyas implicaciones fueran posibles de representar de una misma manera, tanto para el funcionamiento del cerebro como para el de un artefacto. El punto no es que ya logramos entender cómo funciona el cerebro humano, sino que hemos entendido que, al menos en principio, es posible hacerlo. Seguramente algo tiene que ver con la pasión de Wiener por el pensamiento oriental y el hinduismo, y con sus muy frecuentes visitas al pastor hindú del MIT, con quien pasaba horas y horas platicando.

Lo que hizo Norbert Wiener no fue desterrar al fantasma de la máquina. En su lugar, demostró que, considerando el patrón formal de sus actividades, el fantasma y la máquina son uno.

Como dice el que alguna vez fue su gran amigo, Warren McCulloch (1974):

Nuestro mundo nuevamente es uno, y también nosotros. O, por lo menos, eso es lo que le parece a alguien que nunca ha sido un prodigio y no es un matemático.

Este número especial de la revista *Ciencia* da a conocer el trabajo de Wiener, sus ideas, su vida y, en general, ayuda a entender y reconocer a la computación como parte de las disciplinas fundamentales para el desarrollo de la humanidad.

Los artículos

Este número especial de la revista *Ciencia* consta de cinco artículos. En el primero, "Norbert Wiener: de la gloria al olvido", Carlos Coello hace una semblanza biográfica de este exprodigio, de su educación estricta a cargo de su padre, su doctorado a los 18 años en la Universidad de Harvard, su paso por Europa y su trayectoria por el MIT, en donde desarrolló la mayoría de las ideas por las que es mejor conocido. En particular, nos enteramos de una vida llena de contrastes, decepciones y grandes logros científicos. Además de dar a conocer aspectos de su vida personal, el artículo nos presenta los momentos y colaboradores de las principales contribuciones de Wiener, relacionadas con el movimiento browniano, la interpretación estadística de la función de onda, el equilibrio de la radiación de las estrellas, los sistemas de retroalimentación y la cibernética, entre otros.

Cristina Verde, en su artículo "Retroalimentación y sincronía en procesos", retoma dos conceptos fundamentales de la cibernética. Wiener evidenció que los fenómenos de la retroalimentación y la sincronización están presentes en la naturaleza, la sociedad y las máquinas creadas por el hombre, y que, además, ambos son necesarios para mantener una organización efectiva y en equilibrio de los sistemas dinámicos complejos. De ahí la importancia que han adquirido la teoría de control y la de la información a partir de la segunda mitad del siglo XX, ya que ambas han desarrollado herramientas y algoritmos para analizar, diseñar y diagnosticar, en general, sistemas complejos adaptables en condiciones oscilatorias, y de regulación vía la retroalimentación y la sincronía. La explotación de ambos fenómenos ha sido fundamental para el diseño de máquinas adaptables inteligentes.

Durante mucho tiempo existió la disyuntiva sobre si la materia se puede dividir indefinidamente, como algo continuo, o si existe un límite para estas subdivisiones, lo que implica una estructura discreta. Gerónimo Uribe, en su artículo “La danza incesante de las moléculas”, parte de esta disyuntiva, planteada por los griegos, y nos lleva a la época de Dalton, posteriormente a la hipótesis del número de Avogadro y, finalmente, a principios del siglo pasado, cuando en 1905 Einstein planteó el fundamento teórico (teoría cinética del calor) del movimiento browniano y para determinar experimentalmente el número de Avogadro. Wiener fue el primer matemático que demostró la existencia de un modelo que cumplía con las características estipuladas por Einstein en su teoría cinética del calor. En particular, Wiener describió el movimiento browniano como una serie de Fourier aleatoria, con lo que abriría todo un nuevo campo en la teoría de la probabilidad.

José Galaviz, en su artículo “La mente en la máquina”, nos presenta las ideas iniciales que surgieron para crear mentes artificiales. En particular, nos narra el surgimiento de las redes neuronales artificiales por parte de McCulloch y cómo se inspiró con una plática de Arturo Rosenblueth, quien había trabajado con Wiener y Bigelow, sobre el concepto de retroalimentación; así como con los trabajos de la lógica matemática planteados en los *Principia Mathematica* de Russell y

Whitehead. La idea era encontrar la manera de expresar formalmente cómo es el funcionamiento del cerebro humano con base en la lógica de operación de las neuronas que lo constituyen y, por otra parte, explorar el potencial que los modelos simplificados de neuronas tenían para resolver problemas. Surgió así el concepto que hoy conocemos como red neuronal, que se ha establecido como uno de los paradigmas más prometedores de la inteligencia artificial y que ha permitido resolver, en el terreno práctico, muchos problemas cuya solución de otra forma sería impensable.

Finalmente, Tom Froese, en su artículo “De la cibernética al conocimiento”, nos lleva desde las ideas seminales usadas en la cibernética hasta los enfoques modernos de la ciencia cognitiva que van más allá de los conceptos originales de la retroalimentación para poder explicar el comportamiento de los seres vivos. El artículo retoma las ideas publicadas en 1943 por Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener y Julian Bigelow sobre los comportamientos orientados a metas, cómo se manifiestan tanto en seres vivos como en algunos dispositivos mecánicos, y su explicación basada en la aplicación de la teoría sistémica de la retroalimentación negativa. Éste fue un paso muy importante, ya que acercó el interés científico al estudio del fenómeno psicológico y subjetivo de seguir objetivos. La retroalimentación negativa puede usarse para corregir errores y crear sis-



temas autorreguladores; sin embargo, como argumenta Froese, esto no es suficiente para explicar la capacidad de los seres vivos para adaptarse a los cambios. Froese argumenta que los seres vivos son individuos autoproducidos, lo que fundamenta el sentido de su existencia y, por lo tanto, su relación con la mortalidad.

Sergio Rajsbaum es investigador en el Instituto de Matemáticas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al cual se incorporó después de su doctorado en el Technion, Israel. Es egresado de Ingeniería en Computación de la UNAM. Hizo una estancia posdoctoral en el Massachusetts Institute of Technology, y otras estancias de investigación en los Laboratorios de Investigación Watson de IBM y de HP, además de varias estancias más cortas en universidades como la de París, Rennes y Toulouse, en Francia, la Universidad de Ottawa, en EUA, y el Technion y Weizmann, en Israel. Ha publicado más de 100 artículos de investigación sobre temas relacionados con sistemas distribuidos, algoritmos y combinatoria. Es autor de los libros *Conocimientos fundamentales de computación* (Siglo XXI/UNAM) y de *Distributed Computing Through Combinatorial Topology* (Elsevier/Morgan Kaufmann). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel III.

sergio.rajsbaum@gmail.com

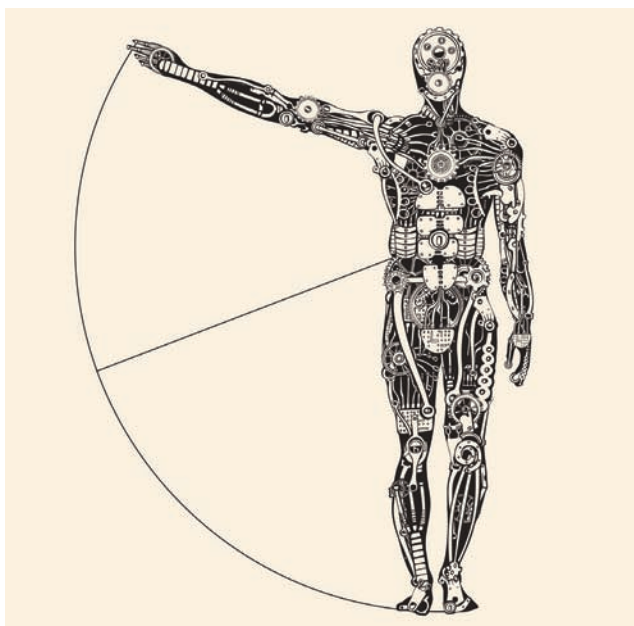
Eduardo Morales es egresado de Ingeniería Física de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Realizó la maestría en Inteligencia Artificial en la Universidad de Edimburgo, Escocia, y tiene un doctorado en Computación por el Turing Institute de la Universidad de Strathclyde, Escocia. Sus líneas de investigación se centran en el aprendizaje computacional y en la robótica. Fue investigador visitante del Electric Power Research Institute, en Palo Alto, California; trabajó en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en Cuernavaca, Morelos; fue consultor técnico del proyecto europeo "The Machine Learning Toolkit"; profesor visitante de la Universidad de New South Wales, en Sydney, Australia, y profesor-investigador del Tecnológico de Monterrey-Campus Cuernavaca. Actualmente es coordinador de Ciencias Computacionales e investigador Titular C del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), en Tonantzintla, Puebla. Cuenta con alrededor de 100 publicaciones en revistas, capítulos de libros y congresos de prestigio internacional, y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel III.

emorales@inaoe.mx

Lecturas recomendadas

McCulloch, W. (1974), "Recollections of the Many Sources of Cybernetics", *ASC FORUM*, VI(2). Disponible en: <<http://cyberneticians.com/mcculloch-recollections.pdf>>.

Toulmin, S. (1944), "The importance of Norbert Wiener", *The New York Review of Books*, 3(3).



Mensaje del presidente de la AMC



En el marco del 45° aniversario del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y de los 70 años del Premio Nacional de Ciencias y Artes, la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) organizó la reunión “Construyendo el futuro-Encuentros de ciencia”, organizada en colaboración con el Conacyt, el Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República, el Gobierno del Estado de Yucatán, El Colegio Nacional y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Del 19 al 22 de noviembre de 2015, en la ciudad de Mérida, Yucatán, se reunieron investigadores en diferentes etapas de sus carreras con el objetivo de propiciar discusiones y analizar programas y proyectos de investigación, para explorar colaboraciones y construir nuevas iniciativas.

El grupo de participantes incluyó investigadores distinguidos con el Premio Nacional de Ciencias y Artes, el Premio Universidad Nacional, así como integrantes de El Colegio Nacional y miembros correspondientes de la AMC. De los jóvenes investigadores que participaron, 23 fueron elegidos de entre los galardonados con el Premio de Investigación de la Academia; el Premio Weizmann, que otorgan la AMC y la Asociación Mexicana de Amigos del Instituto Weizmann de Ciencias; y las Becas L'Oréal para Mujeres en la Ciencia menores de 40 años, que otorgan la AMC, L'Oréal y la Comisión Mexicana de Cooperación de la UNESCO. En el encuentro se contó con la participación de 21 investigadores del programa de Cátedras Conacyt, así como con la de investigadores acreedores del Reconocimiento Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos de la UNAM, de la Beca Internacional L'Oréal-UNESCO y del programa de Estancias de Verano para Investigadores Jóvenes AMC-FUMEC.

Además, la reunión fue marco para la firma del convenio de cooperación entre la Secretaría de Investigación, Innovación y Educación Superior del Estado de Yucatán y la AMC, en un acto presidido por el gobernador de Yucatán, Rolando Zapata Bello, acompañado por el Secretario de Investigación, Innovación y Educación Superior del Estado de Yucatán, Raúl Godoy Montañez, y el Coordinador General del Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República, Jorge Flores Valdés.

Asimismo, la AMC ha continuado y ampliado sus actividades de cooperación nacionales e internacionales. En este periodo, además de lo ya mencionado, se organizó el Simposio Luz y Medicina, con la Academia Nacional de Medicina; el ciclo de conferencias del Año Internacional de la Luz, con la Sociedad Mexicana de Física y la Facultad de Ciencias de la UNAM; la Semana Nacional de Ciencia y Tecnología, con el Conacyt; la Conferencia Magistral de Los Andes dentro de las visitas académicas de Premios México, con El Colegio Nacional y el Consejo Consultivo de Ciencias; y el Concurso Nacional de Aparatos y Experimentos de Física, con la Sociedad Mexicana de Física y la Federación de Sociedades Científicas de México. Como parte de los programas internacionales, se colaboró con el Centro Latinoamericano de Física (CLAF)

en la reunión de su Consejo Directivo, celebrada en noviembre de 2015 en México; y con la Casa Universitaria Franco-Mexicana en el Simposio sobre Ciudades Sostenibles, celebrado en México en diciembre de 2015, con investigadores de Francia y México. La AMC participó con la Academia Nacional de Ciencias (NAS) y la Academia Nacional de Medicina (NAM) de Estados Unidos en el International Summit “Human Gene Editing Initiative”, que se llevó a cabo en la sede de la NAS en Washington, D. C.

En otro tema, la AMC, involucrada en los problemas de interés nacional, fue invitada por la Mesa Directiva del Senado de la República para formar parte del Consejo Técnico que debatirá sobre las alternativas de regulación de la marihuana. En dicho Consejo participan instituciones de educación superior y de investigación nacionales, dependencias federales, así como legisladores de las Cámaras del Congreso de la Unión. La instalación formal del Consejo Técnico se realizó el 30 de noviembre de 2015 en la sede del Senado de la República. Por la naturaleza de nuestra organización, podemos interactuar con miembros de la AMC que están en diferentes instituciones y en diversas disciplinas, además de estar en posibilidades de aportar información científica a nivel internacional, pues nuestra

Academia forma parte de la red global de Academias de Ciencia, junto con otras 120 academias en el mundo, lo que nos permite compartir estudios elaborados por organizaciones hermanas sobre experiencias similares. La AMC celebra esta iniciativa que enriquece el debate nacional.

En el número anterior, comentamos sobre el 75° aniversario de la revista *Ciencia*, fundada en 1940. El 15 de noviembre de 2015 se realizó la ceremonia conmemorativa en el auditorio Galileo Galilei de la AMC, ocasión en que se presentó un recuento y reflexiones de quienes han estado involucrados en los diferentes periodos de la revista. Con orgullo se informó que la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana otorgó a *Ciencia* el Premio CANIEM al Arte Editorial 2015. El 19 de noviembre tuvo lugar la ceremonia de entrega, y el doctor Miguel Pérez de la Mora, director de *Ciencia*, recibió el galardón en nombre de la AMC y la mención especial por los 75 años de la publicación.

Sirvan estas líneas para expresar a nuestros lectores los mejores deseos para el año 2016.

JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI
Presidente
Academia Mexicana de Ciencias

Desde el Comité Editorial



Queridos lectores y amigos: me es muy grato compartir con ustedes la noticia de que *Ciencia*, en el marco de sus 75 años de vida, fue homenajeada por la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana (CANIEM) con uno de los premios que otorga al arte editorial en la categoría de publicaciones periódicas. Dicho reconocimiento nos llena de orgullo tanto a la Academia Mexicana de Ciencias como al Comité Editorial de la revista, pues con él no sólo se enaltece la calidad editorial de *Ciencia*, sino su labor en pro de estimular el conocimiento científico en nuestro país durante sus 75 años de existencia. En efecto, desde su fundación en 1940 por don Ignacio Bolívar Urrutia, y con la infatigable labor de su hijo Cándido Bolívar Pieltain, *Ciencia* a través de sus distintas épocas editoriales ha servido como un instrumento de comunicación entre los científicos mexicanos y como un lazo establecido entre ellos y la sociedad mexicana a la que enseñan asuntos científicos de su interés. Junto con esta grata noticia, tenemos sin embargo la pena de anunciarles el reciente fallecimiento de nuestro entrañable amigo y compañero Luis Benítez Bribiesca, miembro distinguido de nuestro Comité Editorial, cuyos logros y merecimientos son destacados en la semblanza que hacen de él, en este número, María Ester Brandan y Patricia Ostrosky.

Por otro lado, ya en materia de lo que este número nos ofrece, no tengo duda alguna, estimados lectores, de que la frase “inteligencia artificial” y el calificativo de *inteligente* –aplicado a teléfonos, computadoras u otros dispositivos que forman parte de nuestra vida actual–, les es sin duda familiar; pero, ¿qué tan conocidos les resultan los conceptos *cibernética*, *retroalimentación* y *sincronía*? En el marco de estos términos, *Ciencia* se complace en este número en hacer un homenaje a Norbert Wiener con motivo del 50 aniversario de su muerte. Traemos a ustedes una espléndida sección temática a cargo de Sergio Rajsbaum y Eduardo Morales, quienes en su calidad de editores huésped han invitado a varios especialistas en dichos temas para que nos hablen sobre quién fue nuestro homenajeado, de su personalidad y contradicciones, así como de su entrañable y fructífera relación con el

gran científico mexicano Arturo Rosenblueth. Junto a él y a Julian Bigelow, Wiener sentaría las bases de lo que ahora conocemos como “inteligencia artificial”. Los invitamos a conocer cuáles fueron las principales contribuciones de Wiener al conocimiento científico, pero particularmente a adentrarse en el mundo de la cibernética, que en griego hace alusión a “gobernar un velero”; el término fue acuñado por el propio Wiener para dar cuenta de cómo la retroalimentación y la sincronía gobiernan numerosos fenómenos, tanto naturales como sociales, así como el funcionamiento de los humanos, del resto de los seres vivos y aun el de las máquinas.

Por otro lado, aparte de esta sección –que sin duda resulta el plato fuerte de este número–, les tenemos nuevas sorpresas. Así, si usted es un enamorado de lo nuestro y le interesa la historia, encuentre en las páginas de la revista interesantes detalles históricos de cómo se fundó una de las plazas más emblemáticas de la Ciudad de México y sumérjase en su vida cotidiana y festiva. Si, por el contrario, usted estudia matemáticas y le fascina la resolución de las ecuaciones simultáneas por el método de los determinantes, disfrute entonces conociendo cómo surgió y se usó este instrumento por diversas culturas a lo largo de la historia. Consideramos también que aparte de lo anterior será muy instructivo para todos conocer cuáles son los principales contaminantes atmosféricos, cómo se producen y qué efectos tienen sobre nuestra salud y la de nuestro planeta. Entérese de qué se hace para combatirlos y cómo en este loable y meritorio esfuerzo participa el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Finalmente, en este momento en el que el sólo oír hablar de grasa nos altera, consulte en la página electrónica de la revista (<www.revistaciencia.amc.edu.mx>) cómo algunas investigaciones recientes han puesto de manifiesto que el tejido graso es un candidato para proporcionarnos células madre susceptibles de ser utilizadas en el tratamiento de numerosas enfermedades degenerativas que afectan tanto a nuestro cerebro como a nuestras articulaciones.

MIGUEL PÉREZ DE LA MORA
Director