

***MEMORIAS
DE LA
REAL ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS
2024***

© Real Academia Sevillana de Ciencias
Año de publicación: 2026

EDITA:
Real Academia Sevillana de Ciencias

IMPRIME:
Impresión León - Utrera (Sevilla)

DEPÓSITO LEGAL:
SE-1990/91

I.S.S.N.:
2530-1829

AGRADECIMIENTOS

La publicación de este volumen de MEMORIAS ha sido posible gracias a la financiación parcial prestada por la Fundación Cajasol. A esta institución desea expresar esta Real Academia su agradecimiento.



ÍNDICE

Relación de miembros de la Real Academia Sevillana de Ciencias a 31 de diciembre de 2024	11
Memoria de la Real Academia Sevillana de Ciencias del año 2024	15

DISCURSOS

“Inteligencia Artificial y Química”. Discurso pronunciado por la Illmo. S. D. J. Fernández Sanz en el acto de apertura del Curso Académico 2023-24 el día 19 de diciembre de 2023	25
Palabras del Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta, presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, en el acto de apertura del curso 2023-2024, el día 19 de diciembre de 2023	31
“Origen de la vida en la Tierra y las arcillas: Presuntas implicadas”. Discurso pronunciado por la Ilma. Sra. Dña. M. Carmen Hermosin en el acto de apertura del Curso Académico 2024-25 el día 29 de octubre de 2024	35
Palabras del Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta, presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, en el acto de apertura del curso 2024-2025, el día 29 de octubre de 2024	57
“Los carbohidratos en la comunicación celular: el idioma de la vida”, por el Ilmo. Sr. D. José Manuel García Fernández. Discurso de toma de posesión, el día 25 de noviembre de 2024	81
Discurso de contestación por el Ilmo. Sr. D. Agustín Rodríguez González-Elipe, el día 25 de noviembre de 2024	87
Conferencia del Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta, presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, en el acto de presentación de “Proyecto Arte y Ciencia”, el día 24 de enero de 2024	93

CONFERENCIAS

Los Martes de la Academia

“Los neandertales y su refugio en el sur de Iberia” por Joaquín Rodríguez Vidal	117
“La impresión 3D, una nueva tecnología para la fabricación metálica” por Jaime Domínguez Abascal	119
“Ciencia para una Democracia responsable” por Miguel Ángel de la Rosa Acosta	121
“La formación universitaria desde la visión empresarial” por Antonio Pascual Acosta	145
“Lo natural vs lo artificial: desmitificando la quimiofobia” por Rosario Fernández Fernández	149

Curso de Historia y Filosofía de la Ciencia y de la Técnica

“Ciencia y Política: El Congreso Europeo de Bioquímica en la España de 1969”, por Miguel Ángel de la Rosa Acosta	153
“Inteligencia artificial. Evolución de la antigüedad griega al siglo XXI”, por Manuel Castillo Martos	155
“Sin diagnóstico la medicina es ciega: puntos de atención (POC) e internet de las cosas médicas (IoT). Parte I”, por Agustín García Asuero	177
“Convenciones: del Derecho a la Mecánica en el siglo XIX”, por María de Paz..	201
“Sobre un concepto histórico-filosófico de Inteligencia Artificial: las visiones de Descartes, Turing y Penrose”, por Javier Almarza Madrera	203
“La inteligencia artificial en educación. Oportunidades y desafíos”, por Juan Luis Rubio Mayoral	221
“Fritz Haber imputado por múltiples homicidios y un suicidio”, por Antonio Roselló Segado	241

Ciclo de Conferencias RASC-Fundación Cajasol

“Envejecimiento, salud y deporte”, por Juan Ribas Serna	257
“Interacción entre Mecánica y Biología: un desafío para los ingenieros”, por Manuel Doblaré Castellano	259
“Inteligencia Artificial en Imagen Médica: de la esperanza a la realidad”, por Juan M. Górriz Sáez	261
“Evolución de los coronavirus: Patología, vacunas y antivirales”, por Luis Enjuanes	263

Ciclo de Conferencias RASC-Fundación Ayesa

“De utilidad a ventaja cuántica”, por Antonio Córcoles	267
“Agua y energía: El almacenamiento hidráulico de energía en la transición energética”, por Tomás Ángel Sancho Marco	269
“Robótica e Inteligencia Artificial: de la investigación a las aplicaciones”, por Anibal Ollero Baturone	271
“Cambio climático y agua en España: necesidad de adaptación”, por Jorge Olcina Cantos	273

ENTREGA DE LOS PREMIOS A INVESTIGADORES JÓVENES CORRESPONDIENTES AL AÑO 2023

***Acto celebrado en el salón de actos
de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla,
el día 12 de junio de 2024***

Palabras del Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta, presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias	277
--	-----

RELACIÓN DE MIEMBROS DE LA REAL ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS A 31 DE DICIEMBRE DE 2024

JUNTA DE GOBIERNO

Miembros electos el 13/06/2023

Presidente: Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta
Vicepresidenta: Ilma. Sra. D^a. Rosario Fernández Fernández
Tesorero: Ilmo. Sr. D. Antonio Gómez Expósito
Bibliotecario: Ilmo. Sr. D. Javier Fernández Sanz
Secretario: Ilmo. Sr. D. Enrique Fernández Cara

Presidentes de sección

Excmo. Sr. D. Francisco García Novo - Presidente de la sección de Biología
Ilmo. Sr. D. Juan Cornejo Suero - Presidente de la sección de Ciencias de la Tierra
Ilmo. Sr. D. José Javier Brey Abalo - Presidente de la sección de Física
Ilmo. Sr. D. Luis Narváez Macarro - Presidente de la sección de Matemáticas
Ilmo. Sr. D. Agustín Rodríguez González-Elipe - Presidente de la sección de
Química
Excmo. Sr. D. Jaime Domínguez Abascal - Presidente de la sección de Tecnología

ACADÉMICOS DE NÚMERO

Sección de Biología

Ilmo. Sr. D. Andrés Aguilera López_ (14/12/2017)
Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta (05/11/2015) - Presidente
de la Academia
Ilmo. Sr. D. Miguel García Guerrero (01/04/2008)
Excmo. Sr. D. Francisco García Novo (16/10/1989) - Presidente de sección
Ilmo. Sr. D. Pedro Jordano Barbudo (03/10/2022)
Ilmo. Sr. D. José López Barneo (13/09/2004)
Excmo. Sr. D. Benito Valdés Castrillón (13/11/1990) - Presidente del Instituto
de Academias de Andalucía

Sección de Ciencias de la Tierra

Ilmo. Sr. D. Juan Cornejo Suero (26/03/2007) - Presidente de sección
Ilma. Sra. D^a. María del Carmen Hermosín Gaviño_ (22/11/2018)
Ilmo. Sr. D. Joaquín Rodríguez Vidal (25/11/2019)
Ilma. Sra. D^a. Montserrat Vilà Planella (21/04/2022)

Sección de Física

Ilmo. Sr. D. José Javier Brey Abalo (16/12/1997) - Presidente de sección
Ilmo. Sr. D. Alejandro Conde Amiano (15/06/2004)
Ilmo. Sr. D. Arturo Domínguez Rodríguez (07/05/2007)
Excmo. Sr. D. Rafael Márquez Delgado (26/05/1986 - Fundador) - Presidente de honor

Sección de Matemáticas

Ilmo. Sr. D. Juan Arias de Reyna Martínez (01/12/1988)
Ilmo. Sr. D. Tomás Domínguez Benavides (27/06/1995)
Ilmo. Sr. D. Antonio José Durán Guardado (01/06/2022)
Ilmo. Sr. D. Enrique Fernández Cara (25/04/2017) - Secretario
Ilmo. Sr. D. Luis Narváez Macarro (01/02/2000) - Presidente de sección
Excmo. Sr. D. Antonio Pascual Acosta (11/12/2003)

Sección de Química

Ilma. Sra. D^a. Rosario Fernández Fernández (28/04/2014) - Vicepresidenta
Ilmo. Sr. D. Javier Fernández Sanz (20/04/2017) - Bibliotecario
Ilmo. Sr. Agustín Rodríguez González-Elípe (13/02/2020) - Presidente de sección
Ilmo. Sr. D. Francisco Sánchez Burgos (22/10/2002)
Ilmo. Sr. D. José Manuel García Fernández (25/11/2024)

Sección de Tecnología

Excmo. Sr. D. Javier Aracil Santonja (21/11/1995)
Excmo. Sr. D. José Luis de Justo Alpañés (13/02/1996)
Excmo. Sr. D. Jaime Domínguez Abascal (20/10/2014) - Presidente de sección
Ilmo. Sr. D. Antonio Gómez Expósito (02/06/2014) - Tesorero
Ilmo. Sr. D. Alfonso Jiménez Martín (18/03/2003)
Ilmo. Sr. D. José Luis Manzanares Japón (17/12/1996)

ACADÉMICOS ELECTOS

Ilmo. Sr. D. Adán Cabello Quintero (electo el 04/12/2024)
Ilma. Sra. D^a Rocío González Díaz (electa el 24/06/2024)
Ilma. Sra. D^a Ana Gutiérrez Suárez (electa el 24/06/2024)
Ilmo. Sr. D. José Antonio Odriozola Gordon (electo el 11/11/2024)
Ilmo. Sr. D. Aníbal Ollero Baturone (electo el 24/06/2024)
Ilmo. Sr. D. Antonio Ramos Reyes (electo el 04/12/2024)
Ilmo. Sr. D. Francisco Ruiz Muñoz (electo el 04/12/2024)

ACADÉMICOS CORRESPONDIENTES

Ilmo. Sr. D. Joan Bertrán i Rusca, Barcelona (04/05/2009)
Excmo. Sr. D. Manuel Catalán Pérez de Urquiola, San Fernando, Cádiz (05/03/1996)
Ilmo. Sr. D. Jacques Castaing, París (15/06/2009)
Ilmo. Sr. D. Manuel Martín Lomas, San Sebastián (16/04/2007)
Ilmo. Sr. D. Manuel Pastor Pérez, Madrid (11/03/2010)
Ilmo. Sr. D. Vicente Rives Arnau, Salamanca (28/06/2010)
Excmo. Sr. D. Juan Manuel Rojo Alaminos, Madrid (17/12/2008*)
Ilmo. Sr. D. Sebastián Vieira Díaz, Madrid (25/05/2009)

ACADÉMICOS DE HONOR

Excmo. Sr. D. Robert Huber (19/05/2016) - Premio Nobel de Química 1988
Ilmo. Sr. D. Jean-Marie Lehn (29/05/2007) - Premio Nobel de Química 1987
Ilmo. Sr. D. Federico García Moliner (06/11/2006)
Excmo. Sr. D. Avelino Corma Canos (18/05/2005)

ACADÉMICOS SUPERNUMERARIOS

Excmo. Sr. D. Ernesto Carmona Guzmán (18/05/2006)
Excmo. Sr. D. Enrique Cerdá Olmedo (26/05/1986 - Fundador)
Ilmo. Sr. D. Diego de la Rosa Acosta (13/05/2013)
Ilmo. Sr. D. Carlos M. Herrera Maliani (23/10/2006)
Excmo. Sr. D. Manuel Losada Villasante (26/05/1986 - Fundador)
Ilmo. Sr. D. Guillermo Munuera Contreras (02/02/2005)
Excmo. Sr. D. José María Trillo de Leyva (25/01/1994)
Ilmo. Sr. D. Manuel Zamora Carranza (22/05/1991)
Ilmo. Sr. D. Diego de la Rosa Acosta (13/05/2013)
Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas Díaz (27/11/2006)

Las fechas entre paréntesis corresponden al día de toma de posesión.

MEMORIA DE LA REAL ACADEMIA SEVILLANA DE CIENCIAS DEL AÑO 2024

Durante el año 2024, la labor de la Academia ha estado encaminada al desarrollo de distintas actividades, tanto de carácter académico como dirigidas al público general. De estas actividades y de otros hechos relevantes se da cuenta a continuación:

1. JUNTAS GENERALES

Se celebraron sesiones de la Junta General los días 20 de febrero, 24 de junio, 11 de noviembre y 4 de diciembre de 2024.

2. NUEVOS ACADÉMICOS

Con fecha 24 de junio, la Junta General acordó el nombramiento como Académicos del Dr. Aníbal Ollero Baturone, Catedrático de la Universidad de Sevilla, adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros, la Dra. Ana Gutiérrez Suárez, Profesora de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, adscrita al Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología y la Dra. Rocío González Díaz, Catedrática de la Universidad de Sevilla, adscrita al Departamento de Matemática Aplicada I.

Con fecha 11 de noviembre, la Junta General acordó el nombramiento como Académico del Dr. José Antonio Odriozola Gordon, Catedrático de la Universidad de Sevilla adscrito al Departamento de Química Inorgánica.

Con fecha 12 de diciembre, la Junta General acordó el nombramiento como Académicos del Dr. Francisco Ruiz Muñoz, Catedrático de la Universidad de Huelva, adscrito al Departamento de Ciencias de la Tierra, el Dr. Antonio Ramos Reyes, Catedrático de la Universidad de Sevilla adscrito al Departamento de Electrónica y Electromagnetismo y el Dr. Adán Cabello Quintero, Catedrático de la Universidad de Sevilla adscrito al Departamento de Física Aplicada II.

3. ACTOS SOLEMNES

Acto de Apertura, Curso 2024-25

El acto solemne de Apertura de Curso se celebró el día 29 de octubre de 2024 en el Salón Almirante de los Reales Alcázares de Sevilla. Fue co-presidido por el Excmo. Sr.

D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta y el Ilmo. Sr. D. Álvaro Pimentel Siles, Segundo Teniente de Alcalde del Ayuntamiento de Sevilla. Tras la lectura de la Memoria del Curso 2023-2024 por parte del Secretario, intervino la Académica Carmen Hermosín Gaviño, que pronunció la conferencia inaugural, titulada “El origen de la vida en la Tierra y las arcillas: presuntas implicadas”.

Toma de posesión

El 25 de noviembre de 2024 tuvo lugar el acto solemne de toma de posesión como Académico de D. José Manuel García Fernández, que pronunció el discurso titulado “Los carbohidratos en la comunicación celular: el idioma de la vida”. El discurso fue contestado por el Académico Agustín Rodríguez González-Elipse.

4. CURSOS, SIMPOSIOS Y CONFERENCIAS

Ciclo de conferencias científicas sobre “Historia y Filosofía de la Ciencia y de la Técnica”, en memoria del Profesor Ramón Queraltó Moreno

Fue organizado por la Academia, en colaboración con la Facultad de Química de la Universidad de Sevilla. Las fechas, títulos y ponentes fueron los siguientes:

- 12 feb: “Ciencia y política: el Congreso Europeo de Bioquímica en la España de 1969”. Profesor D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta.
- 19 feb: “Inteligencia Artificial y evolución de la antigüedad griega al siglo XXI”. Profesor D. Manuel Castillo Martos.
- 4 mar: “Sin diagnóstico la Medicina es ciega: Puntos de atención (POC) e internet de las cosas médicas (IOMET)”. Profesor D. Agustín García Asuero.
- 11 mar: “La interacción entre Inteligencia Artificial y Neurociencia”. Profesor D. Juan Arana Cañedo-Argüelles.
- 18 mar: “La apuesta europea por una Inteligencia Artificial ética y confiable. Retos y oportunidades”. Profesora Da. Isabelle Huppon.
- 8 abr: “Convenciones: del Derecho a la Mecánica en el siglo XIX”. Profesora Da. María de Paz Américo.
- 22 abr: “Sobre un concepto histórico-filosófico de Inteligencia Artificial. Las visiones de Descartes, Turing y Penrose”. Profesor D. Francisco Javier Almarza Madrera.
- 6 may: “La Inteligencia Artificial en educación. Oportunidades y desafíos”. Profesor D. Juan Luis Rubio Mayoral.
- 13 may: “Fritz Haber imputado por múltiples homicidios y un suicidio”. Profesor D. Antonio Roselló Segado.

-
- 5 jun: “¿Puede la Inteligencia Artificial dar una mente a las máquinas? Reflexiones y preguntas desde la Filosofía”. Profesor D. Francisco José Soler Gil.

Ciclo de conferencias “Los Martes de la Academia”

Como es tradicional, tuvo lugar una vez más en el Excmo. Ateneo de Sevilla. Constó de las siguientes conferencias:

- 16 ene 2024: Joaquín Rodríguez Vidal, “La Doñana de los Neandertales”.
- 5 mar 2024: Jaime Domínguez Abascal, “La impresión 3D, una nueva tecnología para la fabricación metálica”.
- 9 abr 2024: Miguel Ángel De la Rosa Acosta, “Ciencia para una democracia responsable”.
- 7 may 2024: Antonio Pascual Acosta, “La formación universitaria desde la visión empresarial”.
- 14 may 2024: Rosario Fernández Fernández, “Lo natural vs lo artificial: Desmitificando la quimiofobia”.

Ciclo de conferencias científicas correspondientes al Convenio con la Fundación Cajazol 2024

Se celebró en la Sala Antonio Salvador de la Fundación Cajazol, en las siguientes fechas, con los siguientes títulos y por los siguientes ponentes:

- 9 may: “Envejecimiento, salud y deporte”, Juan Ribas Serna, Catedrático de la Universidad de Sevilla.
- 9 may: “Interacción entre Mecánica y Biología: un desafío para los ingenieros”, Manuel Doblaré Castellano. Catedrático de la Universidad de Zaragoza.
- 15 may: “Inteligencia Artificial en imagen médica: de la esperanza a la realidad”, Juan M. Górriz Sáez, Catedrático de la Universidad de Granada.
- 23 may: “Tecnologías microbiológicas: convivir con virus y sus vacunas”, Luis Enjuanes Sánchez, Profesor de Investigación del CSIC, Madrid.

Ciclo de conferencias “RASC-Ayesa”

Con el título “Horizontes, Ciencia, Tecnología e Ingeniería para el futuro de la humanidad”, tuvo lugar con el siguiente desarrollo:

- 11 oct.: “De la Física Teórica a la aplicación empresarial”, Antonio Córcoles (Investigador Principal en IBM).

- 23 oct.: “Almacenamiento energético”, Tomás Sancho (Subdirector Adjunto de la Dirección General del Agua).
- 13 nov.: “Robótica e Inteligencia Artificial en Europa: de la investigación a las aplicaciones”, Aníbal Ollero (Director del Laboratorio de Robótica de la Universidad de Sevilla).
- 20 nov.: “Medioambiente, Ecología y sostenibilidad del planeta. Tecnologías para la sostenibilidad”, Jorge Olcina (Catedrático de la Universidad de Alicante).

Exposición Mapas (Patrimonio cartográfico en Sevilla de los siglos XV a XVIII)

Se celebró en la Fundación Cajasol, organizada por el Profesor Guillermo Curbera Costello, Catedrático de la Universidad de Sevilla, en colaboración con la Academia, la Universidad de Sevilla, el Archivo General de Indias, la Biblioteca Colombina, la FECYT y el Ministerio de Cultura.

Se mostró una selección de mapas de distintos fondos bibliográficos. La exposición fue inaugurada el 27 de junio por el Presidente de la Fundación y estuvo abierta al público desde ese día hasta el 20 de julio de 2024.

Concurso y exposición “Arte y Ciencia”

Con el tema “La inmólación de las células”, en colaboración con la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Sevilla, la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular y la Fundación Cajasol, tuvo lugar un concurso y una serie de coloquios en los que participaron científicos y artistas. El concurso fue seguido de una exposición en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (MUNCYT) de La Coruña, inaugurada el 18 de julio, que permaneció abierta hasta el 30 de noviembre de 2024.

Otros eventos

- 8 feb: Presentación de la reedición de la Tesis Doctoral de Javier Aracil, defendida en 1969, con el título “Señales binarias aleatorias para identificar sistemas no lineales”, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.
- 10 feb: Presentación del libro “Ingeniería. La forja del mundo artificial (2ª. Edición corregida y aumentada)”, de Javier Aracil, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.
- 21 sep: Presentación del libro “Pilotes”, por José Luis de Justo Alpañés, en la Oficina del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en Sevilla.

5. CONVENIOS Y ACUERDOS DE COLABORACIÓN

A lo largo del año 2024, la Academia ha suscrito protocolos, convenios y acuerdos de colaboración con varios organismos con los fines que se mencionan a continuación:

- Convenio de colaboración con la Universidad de Sevilla para la organización y puesta en marcha de actividades de carácter multi- e inter-disciplinar (Programa “Concepción Holística de la Ciencia”) y otras actividades, abiertas al público general no especializado, que incluirán prácticas, exposiciones, coloquios, conferencias, etc. (Programa “Ciencia para una Democracia Responsable”).
- Convenio de colaboración con la Universidad de Sevilla para promover proyectos conjuntos en los que se manifiesten e interpreten las relaciones existentes entre el Arte y la Ciencia.
- Protocolo General de actuación con el Excmo. Ayuntamiento de Sevilla para la celebración de eventos, exposiciones, conferencias y actos de carácter académico, científico y de divulgación científica y el reconocimiento de distinciones científicas.
- Convenio de colaboración con la Fundación Cajasol, para la organización y puesta en marcha de ciclos de conferencias y otras actividades.
- Convenio de colaboración con Ayesa, para la organización y puesta en marcha del ciclo de conferencias mencionado más arriba.

6. PREMIOS Y MENCIONES

Investigadores Jóvenes 2023 (entrega de premios)

Los Premios a Investigadores Jóvenes de la Real Academia Sevillana de Ciencias y Real Maestranza de Caballería 2023 fueron convocados y resueltos a finales de ese año.

Los premiados fueron la Dra. Laura Pastor Pérez (Premio Real Academia Sevillana de Ciencias), la Dra. Sara Bachiller Sánchez Arévalo y el Dr. Francisco Manuel Baena Moreno (Premios Fundación Real Maestranza de Caballería de Sevilla).

La entrega tuvo lugar el 12 de junio de 2024 en la sede de la Real Maestranza.

Investigadores Jóvenes 2024

Los Premios a Investigadores Jóvenes de la Real Academia Sevillana de Ciencias y Real Maestranza de Caballería 2024 fueron convocados en noviembre de ese año. La propuesta del Jurado designado por la Academia fue dada a conocer el 3 de diciembre y fue ratificada en sesión de la Junta General el 4 de diciembre.

Los premiados fueron:

- Dr. Miguel Anaya Martín, por sus investigaciones en el Área de Física referidas al desarrollo de materiales fotónicos, Premio Fundación Real Maestranza de Caballería de Sevilla.
- Dra. Marithania Silvero Casanova, por sus investigaciones en el Área de Matemáticas en el campo de la Teoría de Nudos, Premio Fundación Real Maestranza de Caballería de Sevilla.
- Dra. Patricia Altea Manzano, por sus investigaciones en el Área de Biología, en el ámbito de la investigación biomédica, Premio Real Academia Sevillana de Ciencias.

Premio San Alberto 2024 a la mejor Tesis Doctoral en Biología de la Universidad de Sevilla

Este premio fue convocado en septiembre de 2024. El Comité evaluador estuvo compuesto por representantes de la Academia, del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Sevilla y de las cuatro Facultades de Ciencias de dicha universidad. La resolución fue dada a conocer el 25 de octubre y fue ratificada en sesión de la Junta General el 11 de noviembre.

La premiada fue la Dra. Gemma Martínez Laiz, Doctora por la Universidad de Sevilla, autora de la Tesis Doctoral “Bridging gaps for preventive management of marine invasions associated to the recreational boating vector: vector assessment, baseline surveys, and social perception (Hacia una gestión preventiva de las invasiones marinas asociadas a la navegación de recreo: evaluación del vector, monitoreo y percepción social)”, defendida en la mencionada universidad el 18 de febrero de 2022.

La entrega tuvo lugar el 28 de noviembre de 2024 en el Acto Académico Conmemorativo de la Festividad de San Alberto Magno, en la Facultad de Biología.

Otros Premios y Honores

Los Académicos Montserrat Vilà Planella y Pedro Jordano Barbudo han ingresado en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España, con fechas 16 de enero y 30 de octubre de 2024, respectivamente.

La Académica Rosario Fernández Fernández ha sido elegida miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España.

El Académico Supernumerario Carlos Manuel Herrera Maliani ha sido galardonado con el el Premio Francisco de Asís “Sociedad y Medio Ambiente” de la Academia de Ciencias Sociales y Medio Ambiente de Andalucía.

El Académico Benito Valdés Castrillón ha sido nombrado Miembro de Mérito de la Fundación Carlos III con fecha 26 de junio de 2024.

El Académico Miguel Ángel de la Rosa Acosta fue reelegido Secretario General de la Federación Europea de Sociedades de Bioquímica y Biología Molecular el 4 de julio de 2024 en Milán, Italia.

El Académico José Luis Manzanares Japón ha sido distinguido con el Premio empresarial Círculo 500 a la Proyección Internacional, concedido por el Círculo Mercantil e Industrial de Sevilla.

El Académico Antonio Gómez Expósito ha recibido el reconocimiento de Profesor Visitante Distinguido de la Tsinghua University, en una ceremonia celebrada en Beijing en noviembre de 2024.

Los Académicos Andrés Aguilera López, Juan Cornejo Suero, Antonio J. Durán Guardado, Enrique Fernández Cara, Antonio Gómez Expósito, Pedro Jordano Barbudo, Agustín Rodríguez González-Elípe y Monserrat Vilà Planella y los Académicos Electos Aníbal Ollero Baturone y Ana Gutiérrez Suárez han sido incluidos en los “Stanford University: World’s Top 2% Scientists List”, listas del 2% de los científicos mejor valorados elaborada por la Universidad de Stanford en 2024.

AGRADECIMIENTOS

La Real Academia Sevillana de Ciencias ha continuado recibiendo durante el curso 2023-2024 el apoyo de la Universidad de Sevilla y, en particular, de las cuatro Facultades de Ciencias, en cuyas dependencias ha venido desarrollando una buena parte de sus actividades.

También ha recibido ayuda fundamental del Excmo. Ayuntamiento de Sevilla, la Real Maestranza de Caballería de Sevilla, el Excmo. Ateneo de Sevilla, la Fundación Cajazol, la Fundación Ayesa, la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular y otros organismos y sociedades.

Este patrocinio es reconocido por la Academia, que a todos agradece su apoyo continuo, las facilidades dadas para el uso de instalaciones y locales y su fantástica disposición a colaborar con sus objetivos.

El Secretario,
Enrique Fernández Cara

DISCURSOS

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y QUÍMICA

*Discurso pronunciado por el
Ilmo. Sr. D. Javier Fernández Sáenz,
en el acto de la Inauguración del
Curso Académico 2023/24,
el día 19 de diciembre de 2023*



La inauguración del curso, junto con la conferencia completa se puede ver en:
[Acto de apertura del curso 2023-24 de la Real Academia Sevillana de Ciencias.](#)

La Inteligencia Artificial (IA), que hasta hace no mucho sonaba a ciencia ficción, es hoy una realidad cotidiana y un motor de cambio en múltiples sectores. Su regulación, recientemente aprobada en la Unión Europea, subraya su creciente integración en nuestra vida, desde el reconocimiento facial hasta la navegación por internet. Mi conferencia se centra precisamente en cómo esta tecnología está redefiniendo el panorama de la Química.

La IA se define como la capacidad de las máquinas para llevar a cabo tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como el aprendizaje, la percepción, el razonamiento, la autocorrección, la comprensión del lenguaje natural y la toma de decisiones. En esencia, la IA es una sofisticada combinación de algoritmos integrados en sistemas capaces de resolver problemas complejos y adaptarse a entornos cambiantes, emulando y, en ocasiones, superando las capacidades cognitivas humanas a una escala sin precedentes. Dentro de este vasto campo, el aprendizaje automático (Machine Learning) y el aprendizaje profundo (Deep Learning) son subcampos cruciales, actuando como el motor que impulsa muchas de las aplicaciones actuales de la IA.

LA EVOLUCIÓN DE LA CIENCIA DE DATOS Y SU IMPACTO EN LA QUÍMICA

Para comprender el verdadero impacto de la IA en la química, es fundamental trazar la evolución histórica del manejo de datos en esta disciplina. Cuatro pilares han sustentado esta transformación:

1. *Relaciones Lineales de Energía Libre (LFER)*. Este es el punto de partida histórico. Técnicas como la ecuación de Hammett, que correlaciona la estructura molecular con la reactividad química mediante parámetros específicos, establecieron las bases para comprender cómo las propiedades estructurales influyen en el comportamiento químico. Estas relaciones fueron el germen de los métodos SAR (Structure-Activity Relationships) y QSAR (Quantitative Structure-Activity Relationships), que han demostrado y siguen demostrando un éxito rotundo, especialmente en el desarrollo de fármacos al permitir predecir la actividad biológica de compuestos basándose en su estructura.
2. *Quimiometría*. Surgida a finales de los años 60, la quimiometría marcó un hito al aplicar métodos matemáticos y estadísticos avanzados para extraer información significativa de grandes volúmenes de datos químicos, particularmente de tipo espectroscópico. La digitalización de datos y la integración de ordenadores con equipos de medida, como los espectrómetros, revolucionaron el análisis rutinario en la síntesis química, permitiendo, por ejemplo, la interpretación automatizada de espectros de masas.
3. *Quimioinformática*. A finales de los años 90, la quimioinformática (o química informática) supuso un avance considerable. Se define como la aplicación de métodos informáticos para resolver problemas químicos, complementando a la química computacional cuántica o clásica al describir la estructura molecular de forma que pueda ser analizada estadísticamente. Su enfoque práctico se ha asociado, principalmente, con los análisis QSAR y QSPR (Quantitative Structure-Property Relationships), siendo herramientas invaluableles en el diseño e identificación de nuevos fármacos y materiales.
4. *Aprendizaje Automático (Machine Learning)*. Aunque el término surgió en 1988, no fue hasta la segunda década del presente siglo que su uso se disparó en todas las ramas de la ciencia, incluida la química. Si bien comparte algunas técnicas con la quimioinformática (como las Máquinas de Vector de Soporte - SVM, Redes Neuronales Artificiales - ANN, o algoritmos de Bosque Aleatorio - Random Forest), lo que realmente distingue al Machine Learning actual es su **capacidad y vocación para gestionar y aprender de cantidades “ingentes” de datos**, lo que conocemos como **Big Data**.

La interacción del Machine Learning con el Big Data es lo que ha provocado este “importantísimo despegue” en el número de publicaciones y patentes en los últimos años. El Big Data en química se refiere a la colosal cantidad de información científica generada durante décadas: desde puntos de fusión y velocidades de reacción, hasta coeficientes de mezcla, datos espectroscópicos y diagramas de fase, gran parte de ella contenida en artículos y bases de datos. La **minería de datos (Data mining)** y la **Ciencia de Datos (Data Science)** son las disciplinas encargadas de trocear, digerir y transformar esta información cruda en tablas indexadas y estructuras accesibles para los algoritmos de Machine Learning. El objetivo final de la IA en química es precisamente explotar toda esta vasta información disponible para profundizar en el conocimiento de

la materia, acelerar el descubrimiento de nuevos productos químicos y desarrollar rutas sintéticas más eficientes, incluso revelando propiedades o aplicaciones que inicialmente no se preveían.

FLUJO DE TRABAJO DE LA IA EN QUÍMICA: UN PROCESO SISTEMATIZADO

Para materializar todo esto, la IA en química sigue un diagrama de flujo bien estructurado, que transforma los datos experimentales y la información publicada en un producto o material deseado. Este proceso se basa en cuatro elementos fundamentales:

1. *Recogida y tratamiento de datos.* La base de cualquier sistema de IA son los datos. Actualmente, los químicos disponen de un número significativo y creciente de **bases de datos** especializadas, que albergan millones de estructuras y propiedades. Ejemplos prominentes incluyen AFLOWLIB (para materiales, con más de 625,000 estructuras), Materials Project (asociada a la iniciativa “Genoma de los Materiales”, con medio millón de datos electrónicos y energéticos), BINDINGdB (1.2 millones de datos sobre interacción proteína-fármaco), y Clean Energy Project (más de 10 millones de motivos para materiales fotovoltaicos), además de bases de datos cristalográficas como CSD e ICSD.
2. *Representación de los datos.* Un paso crucial y a menudo laborioso es la necesidad de **representar los productos químicos de una manera que sea “comprensible” por un ordenador**. Esto implica transformar la información molecular en “descriptores” o “rasgos”. Estas representaciones pueden variar en complejidad, desde simples cifras como el peso molecular o el momento dipolar (representaciones unidimensionales), hasta propiedades topológicas (bidimensionales) o geometrías tridimensionales. Estos pasos se realizan mediante programas especializados, como el popular FP (FingerPrint), que codifican la información molecular en secuencias numéricas (cadenas de ceros y unos) que los algoritmos pueden procesar.
3. *Entrenamiento y aprendizaje del modelo.* Una vez preparada la base de datos, se procede al entrenamiento del algoritmo. Existen varias técnicas principales:
 - *Aprendizaje supervisado.* Es el más común y se utiliza cuando se conocen tanto los datos de entrada como los datos de salida deseados. Un ejemplo claro sería entrenar una máquina para predecir el punto de ebullición de una sustancia conociendo su fórmula y estructura. En este caso, la máquina “aprende” a correlacionar una entrada con una salida específica. Las técnicas utilizadas incluyen la regresión lineal, las **redes neuronales artificiales (ANN)** –que si tienen múltiples capas ocultas se convierten en **Deep Learning (aprendizaje profundo)**– y los algoritmos de **Bosque Aleatorio (Random Forest)**, también muy usados en clasificación.

- *Aprendizaje no supervisado*. Aquí, solo se proporcionan los datos de entrada, y la máquina debe encontrar patrones, estructuras o agrupaciones inherentes en los datos sin una “supervisión” explícita.
 - *Aprendizaje por refuerzo*. En este enfoque, el algoritmo aprende a través de la interacción con un entorno, recibiendo “recompensas” o “penalizaciones” que refuerzan o desalientan ciertas acciones, optimizando su comportamiento con el tiempo.
4. *Elaboración y selección de un modelo (validación)*. La etapa final consiste en determinar la validez y eficacia del modelo entrenado. El conjunto de datos original se divide en dos partes: una para el entrenamiento y otra para la **validación o “test”**. Durante el entrenamiento, a menudo se emplea la **validación cruzada**, una técnica en la que el conjunto de datos de entrenamiento se subdivide iterativamente para entrenar y validar el modelo en diferentes subconjuntos, lo que ayuda a reducir el sesgo del modelo y mejorar su robustez.

APLICACIONES DE LA IA EN QUÍMICA: DE LA SÍNTESIS A LOS MATERIALES AVANZADOS

La intersección entre la IA y la química computacional es particularmente fructífera. La química computacional puede proporcionar datos fiables para enriquecer las bases de datos de entrenamiento de la IA, mientras que las técnicas de IA son excepcionalmente hábiles para acelerar cálculos complejos en sistemas grandes, donde los métodos computacionales tradicionales resultan demasiado costosos (ej. Monte Carlo cuántico, ajuste de funcionales o potenciales de interacción para dinámica molecular). Esta sinergia permite explorar moléculas hipotéticas o parámetros difíciles de medir experimentalmente.

Las aplicaciones directas de la IA en química son diversas y de gran impacto:

1. *Síntesis química*. La IA ha revitalizado la planificación de síntesis, que tiene sus raíces en el análisis retrosintético popularizado por Corey. Las estrategias modernas de planificación de síntesis asistida por ordenador (**Computer-Assisted Synthesis Planning, CASP**) ahora no solo desglosan la molécula objetivo en precursores, sino que también cruzan el “espacio químico” (disponibilidad y coste de precursores) con el “espacio de reacciones” (probabilidad y adecuación de las reacciones necesarias). Sistemas avanzados no solo planifican la ruta, sino que también pueden automatizar la ejecución de la síntesis mediante robots, indicando condiciones precisas (concentraciones, temperaturas, tiempos).
2. *Diseño de materiales*. Un ejemplo claro es el desarrollo de **diodos orgánicos emisores de luz (OLED)** basados en fluorescencia retardada. Gracias a la IA, un grupo de la Universidad de Toronto logró seleccionar los mejores candidatos a partir de millones de fragmentos, **reduciendo** la lista a 10 productos que, una vez sintetizados y probados, mostraron rendimientos excepcionalmente altos (al-

rededor del 22%), validando la excelente capacidad predictiva de las máquinas de aprendizaje automático.

3. *Descubrimiento de fármacos.* Este es un campo de aplicación vital. Se ilustr con el diseño de moléculas capaces de bloquear la unión entre la proteína S del coronavirus y el receptor ACE2. Utilizando la IA y bases de datos con millones de moléculas, el modelo pudo predecir y validar 187 moléculas candidatas, de las cuales 75 ya estaban aprobadas por la FDA, como la valaciclovir o la pirolast, demostrando la capacidad de la IA para acelerar significativamente la identificación de nuevos fármacos. Un flavonoide como la hesperidina, por ejemplo, puede inhibir cambios conformacionales clave que impiden la entrada del virus a la célula.
4. *Materiales funcionales.* A título de ejemplo cabe citar los materiales termoelectricos, de enorme interés ya que son capaces de generar corriente eléctrica a partir de un gradiente de temperatura. El cálculo de sus propiedades requiere estimar derivadas de la energía extremadamente complejas y numerosas. Aquí, la IA es crucial: estas derivadas se obtienen mediante regresión múltiple a partir de cálculos DFT seleccionados, reduciendo drásticamente la carga computacional. Nuestro grupo ha aplicado esta técnica con éxito en el estudio de calcopiritas, lo que incluso llevó a que nuestro trabajo fuera portada de la revista Chemistry of Materials.

LA IA EN LA INDUSTRIA Y LOS DESAFÍOS FUTUROS

La IA es un pilar central de la **Industria 4.0**, que marca la cuarta revolución industrial, basada en sistemas cibernéticos y la interconexión a través del Internet de las Cosas y el Internet de Sistemas, llevando hacia la **factoría química inteligente**. La proliferación de patentes en IA dentro de la química, que ha crecido exponencialmente en los últimos años, refleja el enorme interés industrial. Sin embargo, a pesar de que países como China y Estados Unidos lideran tanto en publicaciones como en patentes de IA en química, se observa una preocupante brecha en algunos países, como España, donde, a pesar de una digna posición en publicaciones, apenas hay empresas nacionales entre los principales titulares de patentes de IA, evidenciando un “divorcio” entre la investigación científica y la aplicación industrial.

Es crucial recalcar que la **Inteligencia Artificial en química no se limita a un mero cálculo numérico intensivo o al análisis estadístico de resultados**. Su verdadera esencia reside en la **capacidad de desempeñar funciones cognitivas avanzadas**: razonamiento, adquisición y representación del conocimiento, procesamiento, entrenamiento, aprendizaje, autocorrección y planificación automática.

Un editorial reciente de Nature subraya que la aplicación de la IA a la química está aún en sus comienzos, con un ritmo más lento comparado con otras disciplinas. Para acelerar esta integración, se requiere: bases de datos más completas y precisas (un de-

safío dada la naturaleza experimental de los datos químicos), y la inclusión de “datos negativos” (resultados de experimentos fallidos), algo poco común en las publicaciones.

Finalmente, en mi opinión, uno de los mayores obstáculos para una incorporación más rápida de la IA en la química es la dificultad para **coordinar la química con la ciencia de datos y la ingeniería informática**. El diálogo entre químicos (experimentales o teóricos) e ingenieros informáticos no es sencillo. Por ello, **es absolutamente imprescindible incluir las nociones básicas de estadística y programación en el currículo de los estudiantes de química**. Nuestros futuros egresados deben poseer al menos el “léxico” que les permita interactuar y colaborar eficazmente con los desarrolladores de algoritmos y especialistas en ciencia de datos. Necesitan comprender el potencial y las posibilidades que ofrecen las máquinas y los dispositivos de inteligencia artificial. La IA ha llegado para quedarse, y es nuestra responsabilidad preparar a las nuevas generaciones de químicos para enfrentar los desafíos metodológicos y prácticos que esta revolución traerá consigo.

ACTO DE APERTURA DEL CURSO 2023-24

*Palabras del
Excmo. Sr. D. Miguel ngel de la Rosa,
Presidente de la Real Academia
Sevillana de Ciencias,
el día 19 de diciembre de 2023*



La inauguración del curso, junto con la conferencia completa se puede ver en:
[Acto de apertura del curso 2023-24 de la Real Academia Sevillana de Ciencias.](#)

Excmo. Sr., Rector Magnífico de la Universidad de Sevilla, Excmo. Sr. Presidente del Instituto de Academias de Andalucía, Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Física, Ilmo. Sr. Secretario de la Real Academia Sevillana de Ciencias, Excmo. Sr. Expresidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, Excmo. Sr. Presidente de la Academia Iberoamericana de Farmacia, Ilma. Sra. Vicerrectora de Estudiantes, Otras autoridades, académicos, compañeros y amigos, señoras y señores.

En primer lugar, quisiera darle las gracias y la bienvenida al señor rector de la Universidad Hispalense, Miguel ngel Castro, querido Miguel ngel, que nos honra presidiendo este acto de apertura del curso 2023-24 de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Es todo un honor institucional tenerte aquí hoy entre nosotros y, por supuesto, una gran satisfacción personal. Son muchos años ya los que llevamos en esta Universidad y muchos actos oficiales también en los que hemos coincidido, y siempre debo decir y reconocer que es un placer trabajar con Miguel ngel Castro, con el rector de la Universidad de Sevilla, por su disponibilidad y entrega atendiendo siempre que se le reclama y sus obligaciones se lo permiten, como es el caso de hoy. Asimismo quisiera agradecer a nuestro anfitrión, al señor decano de la Facultad de Física, Antonio Acosta, querido Antonio, su hospitalidad, como en tantas otras ocasiones, y acogernos en esta su casa en la Universidad de Sevilla.

Hace unos minutos lea la memoria del curso 2022-23 el señor secretario de la Academia, Enrique Fernández Cara, y decía que el pasado mes de junio hubo cambio de presidente, resultando elegido Miguel ngel de la Rosa Acosta. Por educación y cortesía, pero sobre todo por justicia y merecimiento, debo agradecer al presidente anterior, José Luis de Justo, querido José Luis, su magnífico legado de doce años al frente de la institución, entre cuyos logros más señalados se encuentra el convenio alcanzado con la Universidad de Sevilla para acoger la sede de la Academia en un edificio de nueva

construcción compartido con la Fundación para la Investigación de la Universidad de Sevilla (FIUS).

Quisiera añadir que en la reunión de la Junta General de la Academia en junio pasado no solo el presidente, sino también otros miembros de la Junta de Gobierno fueron elegidos, y a todos ellos quisiera agradecer su generosidad y confianza al aceptar formar equipo con el nuevo presidente. Así, en la singladura que en el verano comenzamos me acompañan Rosario Fernández Fernández, como vicepresidenta, Antonio Gómez Expósito, como tesorero, Javier Fernández Sanz, como bibliotecario, y Enrique Fernández Cara, como secretario. Juntos hemos elaborado un programa estratégico para los próximos años, dentro del mandato que nos corresponde estar al timón, y cuyos elementos básicos voy a presentar en estos minutos.

En efecto, el secretario daba lectura al comienzo de este acto a lo que ha sido el curso anterior, el curso 2022 23, pero en estos momentos quisiera mirar al frente y esbozar cuál es la idea de futuro del nuevo equipo, qué es lo que queremos hacer y cuál creemos que debe ser la función esencial de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Lo dicen claramente nuestros estatutos, justo en su primer artículo: aparte el fomento y cultivo, uno de los objetivos fundamentales de la Academia es la difusión y divulgación de la ciencia. En este sentido, desarrollaremos nuestra estrategia de futuro sobre dos ejes clave. El primero es abrir la Academia y acercarla al ciudadano, a la sociedad. A pesar de que los primeros estatutos se redactaron hace casi cuarenta años, cuando su fundación, creemos firmemente en la actualidad y relevancia de la misión social de la Academia, según recoge su articulado estatutario. Fundamentalmente porque, a día de hoy, la sociedad civil tiene necesidad de información cualificada. Llama la atención, en la época en la que estamos, que el exceso de información esté conduciendo a la desinformación y, paradójicamente, que tanta información no genere en proporción el conocimiento que cabría esperar. Creemos, por consiguiente, que la Academia tiene un papel relevante que desempeñar liderando –junto a la cultura– la educación y formación de los ciudadanos.

Todos nos enfrentamos con temas de fuerte contenido científico, temas que nos afectan en nuestra vida diaria, en nuestro día a día, que afectan a nuestro bienestar y a nuestra salud, y lo digo como ciudadano, no solo como científico. Estamos hablando de las vacunas, del cambio climático, de las energías renovables, de asuntos que condicionan nuestro devenir y el de nuestros hijos y nietos, que condicionan no solo la sostenibilidad del planeta, que también, sino nuestra propia sostenibilidad como especie, la especie humana. Por todo ello creemos que el ciudadano tiene el derecho –y hasta el deber– de estar informado cuando se le consulta y así ayudar a los políticos en la toma de decisiones.

La base de la democracia es el sufragio universal, el voto expresado en libertad, pero ha de ser un voto cualificado, un voto con conocimiento de causa, meditado y responsable. Si al ciudadano se le hace preguntas sobre temas que desconoce o sobre los que no tiene suficiente formación, su voto se torna vulnerable, susceptible a la manipulación demagógica de manera fácil. Y no hablo solo de manipulación política. Si algún personaje famoso con fuerte predicamento popular proclama en la televisión su oposición a las vacunas, como ocurrió durante la pandemia del coronavirus, muchos ciudadanos lo creerán de manera inocente. Los antivacunas tuvieron bastantes seguidores, en esencia

debido a la falta de formación científica de la sociedad y, en definitiva, de información contrastada.

La democracia es uno de los pilares fundamentales de la libertad individual, que a su vez es el mayor logro de la civilización y la evolución social del hombre como especie. Desafortunadamente, el inicio del siglo XXI no ha sido tan brillante como se esperaba al finalizar el siglo XX, en buena parte debido a la crisis de liderazgo generalizada que sufrimos en todo el mundo, a su vez resultante, en gran medida, de esa falta de formación ciudadana de la que hablamos. Como academia y como científicos, por tanto, tenemos una responsabilidad con nuestra sociedad, y sobre esta premisa se sustenta el primer eje de nuestra estrategia antes citada, diseñada para hacer que la Real Academia Sevillana de Ciencias juegue un papel singular en la formación de los ciudadanos y educarlos para vivir en democracia, para el ejercicio libre y responsable del voto. Y de este primer eje se deriva el segundo, cual es el mecenazgo, pues nada de lo dicho se puede llevar a cabo sin financiación adecuada y suficiente. La idea es concienciar a la sociedad, al individuo y al mundo empresarial, al ciudadano de a pie y a las corporaciones públicas y privadas, de la necesidad de ayudar a la Academia en el desempeño de su función social educativa y formativa contribuyendo a la financiación de sus actividades.

La fuente de ingreso principal y regular que hoy tiene la Real Academia Sevillana de Ciencias es la subvención anual de la Junta de Andalucía, que apenas alcanza a cubrir los gastos de gestión y administración, a la que por fortuna se une la ayuda en especie de la Universidad de Sevilla, que por convenio se hace cargo de los gastos de suministros de la sede. Ambas ayudas proceden de instituciones públicas y permiten el mantenimiento de la Academia, pero no la promoción y organización de actividades, que deben realizarse con financiación ad hoc. Así, los premios a jóvenes investigadores cuentan con el patrocinio de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla y las cuotas de los propios académicos, los ciclos de conferencias “Los Martes de la Academia” e “Historia y Filosofía de la Ciencia” se celebran en el centro de la ciudad y en el campus de Reina Mercedes, respectivamente, gracias al Ateneo de Sevilla y la Facultad de Química, que con generosidad nos acogen en sus sedes. Mención destacada merecen asimismo la Fundación Cajasol y el Instituto de Academias de Andalucía, que con extrema diligencia y frecuencia nos apoyan en la organización de conferencias y eventos. También la Fundación Ayesa ha contribuido en ocasiones al lanzamiento de ciertas iniciativas.

Pero somos ambiciosos, queremos más, y queremos llevar a la práctica y garantizar la continuidad de nuestras ideas de futuro antes esbozadas. Por supuesto, continuaremos con las actividades que venimos desarrollando hasta ahora, pero también queremos explorar y abrir nuevos campos, nuevas puertas que nos puedan acercar a la sociedad para dar así sentido a la función social de la Academia. En este contexto, debo avanzar que hemos empezado a discutir programas con la Facultad de Bellas Artes, para acercar el arte y la ciencia, con el ayuntamiento de Sevilla, para dar a conocer el potencial científico-técnico de la ciudad, con laboratorios privados, con la sociedad española de bioquímica y biología molecular, etc. En efecto, hay toda una esfera de interacciones y puertas que queremos y podemos ir abriendo, difíciles pero posibles, para las cuales necesitamos contar con el apoyo de las instituciones y de la sociedad.

Sobre los dos ejes esbozados pretendemos desarrollar la estrategia de futuro de la Academia durante el tiempo que nos toque asumir la responsabilidad de su dirección. Con el rector estuvimos en julio, fue de los primeros en recibirnos, y el primero al que le contamos nuestros proyectos y nuestra visión de que lo que podría hacer la Academia. En este sentido, reitero nuestra invitación al rector a que nos ayude, que nos apoye, e incluso que venga con nosotros en este proyecto de educación social para la democracia. Creemos que es un objetivo importante y ambicioso, mas realista y factible, con proyección a largo plazo, al que la Universidad de Sevilla, como centro de élite y educación superior, podría contribuir jugando un papel en la educación ciudadana complementario a sus fines más conocidos y reconocidos, a saber formación de profesionales y generación de conocimiento. Estoy convencido de que la sinergia derivada de la simbiosis de la Academia con la Universidad, o de la Universidad con la Academia, resultaría enormemente fructífera. Aquí también, señor rector, me tiene a su entera disposición para trabajar de manera conjunta.

Y termino, puesto que ya estamos cerca de las Navidades, deseando que paséis todos unas felices fiestas y deseando, pues también los Reyes se acercan, que entre todos hagamos realidad los nuevos proyectos de la Real Academia Sevillana de Ciencias. El éxito de la Academia será el éxito de la sociedad y el de todos nosotros. Muchas gracias.

ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA Y LAS ARCILLAS: PRESUNTAS IMPLICADAS

*Discurso pronunciado por la
Ilma. Sra. Dña. Carmen Hermosín,
en el acto de la Inauguración del
Curso Académico 2024/25,
el día 29 de octubre de 2024*



La inauguración del curso, junto con la conferencia completa se puede ver en:
[Acto de apertura del curso 2024-25 de la Real Academia Sevillana de Ciencias.](#)



Voy a dar comienzo a la Conferencia que inaugura el curso 2024-25 de nuestra Academia, que intentaré leer a fin de no pasarme en tiempo. El guión que voy a seguir es el siguiente:

- La introducción estará dedicada al Origen del Universo y a la evolución posterior de la Tierra:
 - Textos religiosos
 - El Big-Bang (Lemaître, Einstein, Hubble...) y otras teorías

En el desarrollo entraremos de lleno en el origen de la vida y sus diversas teorías, parándonos algo más en la teoría de la arcilla:

- Oparin-Haldane (Miller), Panspermia y Fumarolas
- Teoría de la arcilla.
 - ↪ Estructuras de las arcillas: de Cairn-Smith(1966) a Hansman (2022)
 - ↪ Reacciones catalizadas por arcillas para dar moléculas vitales: proteínas y polipéptidos, y ARN.
 - ↪ Adsorción y protección de estas moléculas en las arcillas
- Por último en el epílogo, muy brevemente, veremos como las nuevas tecnologías (Microscopia de Fuerza Atomica, Computación e Inteligencia Artificial) pueden ayudar a rellenar los huecos que aún quedan desde la química prebiótica a la célula, pasando por la vida en otros planetas u otros mundos habitables.

Antes de adentrarnos en el origen de la vida en nuestro planeta, comenzaremos por explorar el origen del Universo que nos rodea, y que seguro sería una de las primeras preguntas que se hizo el hombre desde el principio. Pues bien, las primeras explicaciones partían de su concepción religiosa del cosmos: existían deidades antiguas, creadoras, mantenedoras y destructoras del universo, que eran responsables de la creación de todo lo que existe y en especial de los seres vivos, entre los cuales el ser humano



I. Origen del Universo #RASC

1. Teorías religiosas

- Monumentos de piedra: Stonen-Haegen y Menga
- Textos escritos: La Biblia, el Coran, el Pool-Vol, etc.

2. Teorías mixtas

- Culturas egipcias y Maya, los romanos y árabes: modelos geocéntricos
- ✓ Aristarco de Samos sugirió en el III a.C. el heliocéntrico

3. Teorías Científicas

- Siglo XVI -XVII, con cálculos matemáticos, astrolabios y telescopios, Copérnico, Kepler y Galileo: sistema solar heliocéntrico → casi herejes
- Newton: XVII-XVIII El Universo no tiene origen ni final, sistema estático mantenido en sus movimientos por la gravedad





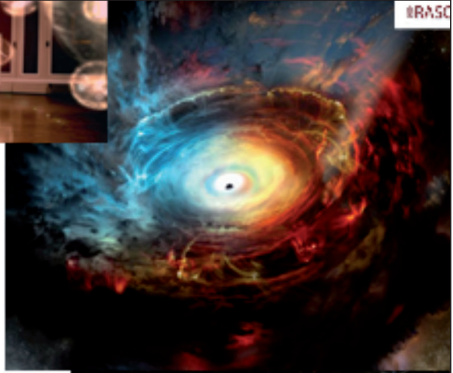

ocupaba el lugar del hijo favorito, y se recogen en los grandes textos religiosos, como la Biblia, el Corán, el Talmud, el Popol-Vuh, etc. Por cierto, según nuestra Biblia, Dios creo al hombre del barro o arcilla como lo pinta Miguel Ángel en la capilla Sixtina: aparecen por primera vez nuestras presuntas implicadas en la vida del hombre.

Los egipcios y los mayas fueron dos culturas que aportaron conocimientos importantes de nuestro sistema solar, y establecieron el modelo geocéntrico, aunque hubo algunos filósofos griegos, como Aristarco de Samos que, contra viento y marea, proponía el modelo heliocéntrico en el siglo III A.C. Pero éste no se impuso hasta el siglo XV-XVI cuando, mediante cálculos matemáticos, astrolabios y telescopios, Copérnico, Kepler y Galileo, propusieron el modelo heliocéntrico, lo que les costó sus disgustos con la Iglesia. Newton, el padre de la física moderna, sostenía que el Universo no tenía ni principio ni fin, sino que se mantenía estático gracias a la fuerza de la gravedad. Realmente hasta el siglo XIX-XX, la ciencia estuvo más preocupada por la estructura del cosmos que por su origen.

No fue hasta principios del XX, cuando se han desarrollado diversas teorías, avaladas científicamente, sobre el origen del Universo, y ha sido gracias a la mejora de los instrumentos, tanto para observar el cosmos como para analizar la luz que nos llega: la teoría de las fluctuaciones, la del principio antrópico, teoría de las cuerdas, la planetesimal, etc..., casi todas partiendo de la teoría de la relatividad de Albert Einstein, quien, sin duda alguna, dio el pistoletazo de salida para el desarrollo posterior de la mayor

Teoría del BigBang.

- Hawking :sugrandivulgador
- Lemaitre (1920) y (Hubble 1929)




- Ley de Hubble (1929)-Lemaître (2018)
- Respaldada Premios Nobel Física Arnold Penzias y Robert Wilson en 1978: radiaciones microondas
- El James Webb:
 - ✓ Ondas gravitacionales e imágenes que confirman BigBang.
 - ✓ 5 galaxias alejándose de nosotros (1500Mpx y 1000 archivos)



parte las teorías actuales sobre el origen del Universo. La teoría más conocida, aceptada y parcialmente contrastada, aunque aún tiene sus críticos, se centra en un cataclismo cósmico sin igual en la historia: el **Big Bang** (National Geographic, 2024).

Son muchos los que identifican a Stephen Hawkins con esta teoría, y aunque es cierto hizo muchas aportaciones a la misma, sobre todo lo que fue, es su gran divulgador. El verdadero padre fue *George Lemaître*, matemático, astrónomo y físico, además de sacerdote y catedrático de Física de la prestigiosa Universidad Católica de Lovaina, quien fue el primero en sugerir que el universo comenzó a partir de un único punto o átomo primigenio, que concentraba toda la masa y energía en el tiempo cero, y a partir de ahí, una onda expansiva de enorme potencia la distribuyó por todo el espacio. Esto lo publicó en una revista científica de su Universidad y en francés, en el año 1920, por lo que tuvo poca difusión en círculos científicos, aunque sí consiguió que Einstein, al principio reacio, tras varios encuentros, terminara apoyándola. Posteriormente, Edwin Hubble, astrónomo americano, analizando el espectro de la luz que nos llegaba, propuso que, salvo un grupo de galaxias cercanas, el resto están alejándose continuamente de nosotros, y lo hacen a más velocidad cuanto más alejadas están, lo que se conoció hasta hace poco, como Ley de Hubble, que fue publicada en los Proceedings de la Academia Nacional de Ciencias Americana en 1929, sin hacer mención al trabajo de Lemaître. En 2018, la Sociedad Internacional de Astrofísica en su Congreso Mundial decidió que esta Ley se llamara de Hubble-Lemaître (Alfaro 2018).

Mucho después, Arno Penzias y Robert Wilson, descubrieron la radiación cósmica de microondas en 1970, por lo que recibieron el Nobel de Física en 1978, que no solo refrendaban que el BigBang ocurrió, sino que continuaba. Por último, el lanzamiento y despliegue del telescopio espacial James Webb ha permitido a los científicos en 2023, tanto el descubrimiento de las ondas gravitacionales como la observación del alejamiento, a gran velocidad, de otras galaxias respecto a la nuestra en todas direcciones, confirmando que vivimos en realidad en un multiuniverso aún en crecimiento, desde hace unos 13,800 millones de años cuando se inició la onda expansiva.

Y ahora veremos ¿Como evolucionó nuestro planeta tras el Big Bang?

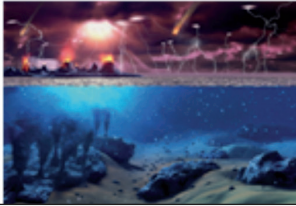
En principio era una gran masa incandescente, formada por partículas atómicas, que se iban condensando formando los núcleos atómicos y captando electrones, para así constituir los átomos de los elementos químicos, desde los más ligeros como H y He, hasta los más pesados como el hierro. Esto ocurría por procesos de fusión nuclear, lo que producía una gran cantidad de energía, y las temperaturas se mantenían altísimas. Posteriormente, estos procesos fueron aminorándose y nuestro planeta comenzó a enfriarse, aunque hubo grandes impactos de meteoritos, entre ellos el que originó la Luna.

A medida que fue enfriándose la corteza, fueron cristalizando minerales liberando agua y, por otra parte, las erupciones volcánicas también emitían gran cantidad de vapor de agua, que se iba condensando y cayendo en forma de lluvia. Los cristales más primitivos que se han encontrado, son unos cristales de Zirconio o Silicato de Zirconio (ZrSiO_4) hallados en Australia, que tienen entre 4200 y 4000M de años, y... nuestras presuntas implicadas, las arcillas son silicatos, por tanto ya deben estar cerca!



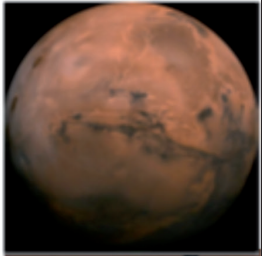
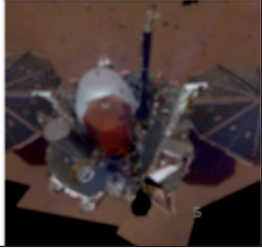
La Tierra tras el Big Bang

- La tierra estaba incandescente: fusiones nucleares atómicas
- Enfriándose, meteoritos y erupciones volcánicas: traían o emitían vapor de agua
- Primeros cristales de Zirconio (SiO_4Zr) (Australia 4200-4000M años)
- El agua se fue condensando y ya empezó a ser el planeta azul
- Con el agua aparecieron las arcillas (nuestras presuntas implicadas!) en las fumarolas (4000-3500M años)



#RASC

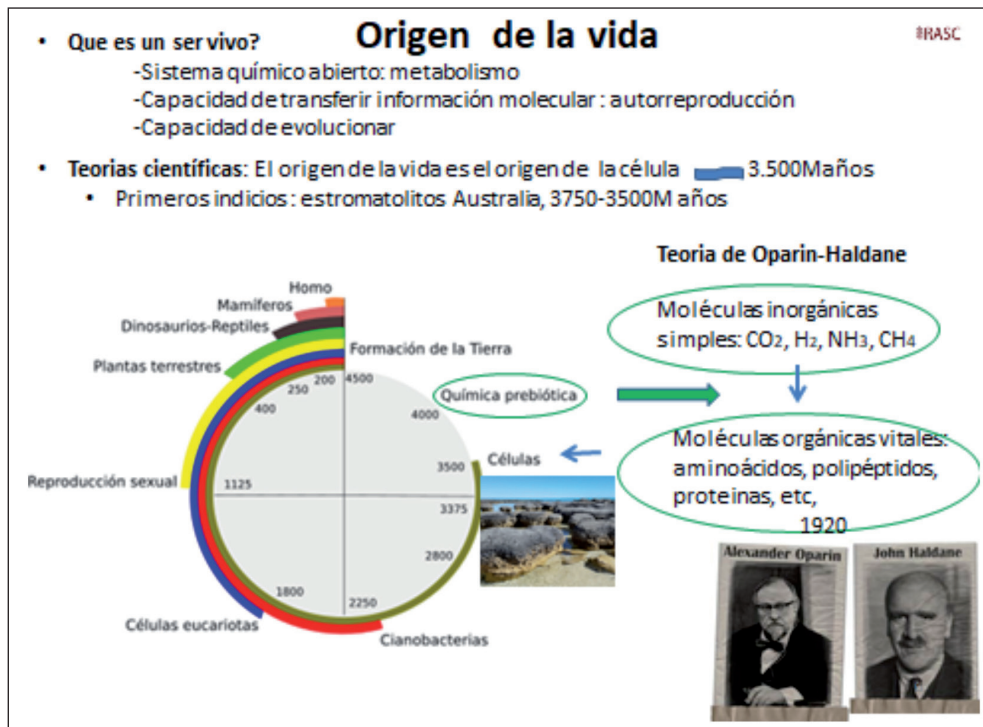
Lo mismo parece haber ocurrido en Marte: fue Marte como la Tierra hace 4000M años? Los Rovers van indicando que si

Estos cristales de Zirconio, muestran señales de disolución/recristalización, es decir, erosión por agua de silicatos más cristalinos que se fueron transformando en otros menos cristalinos, llamados arcillas, nuestras presuntas implicadas. Por tanto, las arcillas ya existían en nuestro planeta hace 4000-3500Ma, en zonas de la tierra donde el agua se acumulaba y convivía con zonas calientes: **las fumarolas**, donde asimismo, como veremos más adelante, se creaba la vida. Estos mismos procesos ocurrieron también en Marte, como muestran los análisis enviados por los rovers Curiosity y Opportunity, y posiblemente en otros planetas, donde las arcillas se han identificado y que, por tanto, debieron tener agua y pudiera ser que incluso vida.

Y ya vamos a adentrarnos en **cómo se originó la vida en la tierra**, para lo que vamos a definir la vida de forma simple y sencilla: un organismo vivo es un sistema químico abierto (metabolismo), que como mínimo, tiene la capacidad de transferir información molecular vía autorreproducción y debe ser capaz de evolucionar.

En este esquema vemos de forma global, como evolucionó la vida desde que se formó la Tierra, hace unos 4600-4500 millones de años. Los primeros indicios ciertos de vida en la tierra provienen de unos fósiles encontrados en Australia Occidental, y que muestran estructuras de estromatolitos, formados por capas superpuestas de organismos unicelulares litificados, cuya datación se corresponde con 3700-3500M de años.



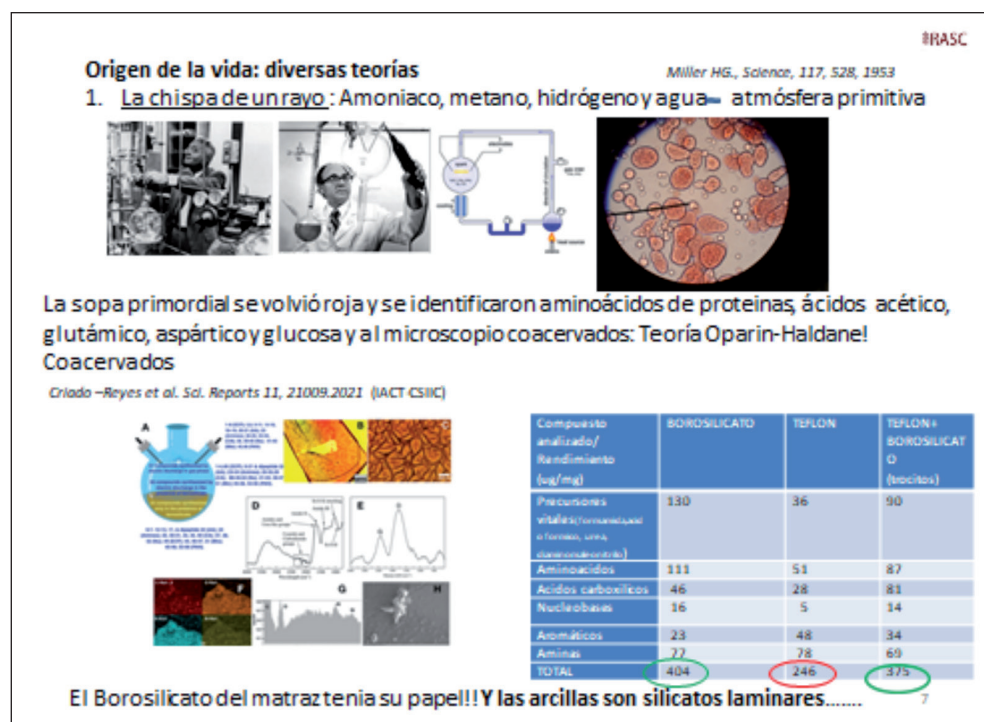
El problema del origen de la vida, es el problema del origen de la célula que, aunque aún no se sabe a ciencia cierta cómo apareció, si se acepta que fue un proceso físico-químico gradual y evolutivo, que transformó moléculas inorgánicas en moléculas orgánicas pequeñas, polímeros, macromoléculas...etc., en lo que llamamos la química prebiótica y que es en lo que nos vamos a centrar, y para la que, sin duda alguna, la presencia del agua fue fundamental. Existen muchas teorías pero vamos a tocar las más conocidas:

Teoría de Oparin-Haldane: propuesta en los años 20 del siglo pasado, de forma independiente, por el bioquímico soviético Alexander Oparin y el biólogo inglés John Haldane, y posteriormente refrendada por Charles Darwin. Ambos científicos Oparin y Haldane, aprovechando sus conocimientos en astronomía, sabían que en las atmósferas de otros planetas y astros existen sustancias como amoníaco, metano e hidrógeno, y que, al igual que hubiera ocurrido en la tierra, podrían estas primeras moléculas haber servido de sustrato para obtener nitrógeno, carbono e hidrógeno, respectivamente, y estos elementos, junto al oxígeno del agua y de la atmósfera, habrían sido la materia prima para iniciar la vida, a través de la formación de moléculas vitales sencillas. Esta teoría tiene 3 vertientes relacionadas con el lugar donde se iniciaron:

1ª. La chispa de un rayo provocó una reacción en el medio acuoso en contacto con la tierra. En 1950 el químico Harold Urey, ganador del Premio Nobel en 1934, por el descubrimiento del hidrogeno y agua pesada, sospechaba que Oparin

y Haldane estaban en lo cierto, y encargó a su estudiante de doctorado Stanley Miller, que desarrollara un experimento para probar esta teoría. Miller creó un sistema cerrado de vidrio con un matraz de borosilicato resistente al calentamiento donde ponía agua e inyectaba los gases hidrógeno, metano y amoníaco. El sistema tenía además dos electrodos para realizar descargas eléctricas que simularan rayos atmosféricos, y un refrigerante para condensar el agua. El matraz se calentaba y el agua se evaporaba, combinándose con las otras moléculas gaseosas, a la vez que se aplicaba la descarga eléctrica, y al pasar por el refrigerante, el agua se licuaba simulando lluvia y volvía al matraz.

Los resultados fueron sorprendentes, al cabo de una semana la sopa primordial, u “océano” experimental, había adquirido un color marrón rojizo debido a los componentes elementales de la vida que se habían formado, y que se identificaron entonces por cromatografía de papel como aminoácidos, ácidos carboxílicos, nucleobases, y otros más simples como urea, ácido cianhídrico y otros ácidos orgánicos. Y al microscopio se observaban como pequeñas vesículas de tamaño variado, que eran un cúmulo de moléculas y polímeros, lo que Miller llamó *coacervados*: La teoría de Oparin-Haldane quedaba probada! Urey fue extremadamente generoso y dejó que su alumno publicara el artículo como único autor en la revista Science en 1953. En este punto es importante señalar que se han encontrado meteoritos con los mismos aminoácidos y en las mismas



proporciones que encontró Miller en su sopa primordial, lo que viene a demostrar que este proceso se ha dado y se puede estar dando en otros planetas de nuestro Universo.

Recientemente, se ha demostrado por científicos del CSIC, del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra en Granada, concretamente del grupo de nuestro gran cristalógrafo José Manuel García-Ruiz (Criado-Reyes et al. 2023) que, en este experimento aunque Miller no lo sabía, el material del matraz donde se llevaba a cabo la reacción tenía un importante papel y el matraz era, como he dicho antes, de borosilicato y nuestras presuntas implicadas son silicatos laminares! Ya nos vamos acercando a desvelar el papel de las arcillas en la formación de estas moléculas de protovida

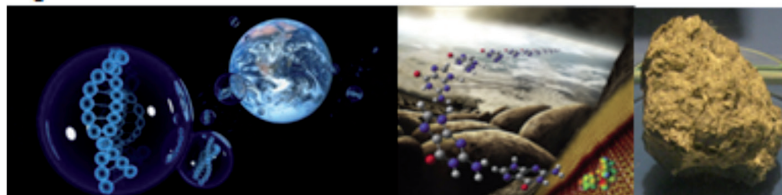
En efecto, estos científicos comprobaron que si se sustituía el matraz de borosilicato por uno de Teflón el rendimiento en moléculas orgánicas bajaba a un 40%, pero si al matraz de teflón se le añadían trozos de borosilicato, su rendimiento se encontraba a medio camino entre el de borosilicato y el de teflón. El borosilicato del matraz empleado actuaba, sin duda, como catalizador y las arcillas son silicatos, con lo que se evidencia que nuestras presuntas implicadas podrían tener un papel relevante en este experimento.

2ª. Teoría de la panspermia o semillas por todas partes, que propone que los aminoácidos, así como otros componentes básicos de la vida, como el carbono y el agua, podrían haber llegado a la Tierra desde el espacio en un gran meteorito procedente de otro sistema de nuestro u otro universo. En efecto, se ha descubierto que los cometas y meteoritos contienen algunos de los componentes orgánicos de la vida, y que su bombardeo de la Tierra, en sus primeros estadios, pudo ser intenso y continuado, aumentando la disponibilidad de aminoácidos y otros componentes de las biomoléculas, como la ribosa a partir del cianuro de hidrogeno. Esta teoría es defendida por grandes científicos, entre los que se encuentra nuestro gran Bioquímico Joan Oró, no resuelve el origen de la vida, sino que la transporta a otro planeta o Universo.

3ª. Los Océanos y fumarolas, según la cual la vida pudo haber comenzado en las profundidades del océano, alrededor de respiraderos hidrotermales en el fondo marino. Esta teoría tiene el inconveniente de que las reacciones que llevan desde los materiales de partida hasta los nucleótidos y el ARN, requieren la radiación UV del Sol y **no serían** posibles en el océano profundo. Pero sí pudieran darse en estanques de poca profundidad, o en un entorno del tipo de aguas termales, muy común alrededor de lugares de impacto o regiones volcánicas, y que incluso, la extensa actividad volcánica contribuyera a que la vida se iniciara, generando enormes cantidades de rayos localizados. Es otra versión de la teoría de Oparin y Haldane, que implica reacciones similares a las de Miller, solo que las sitúa en zonas más profundas de las masas de agua entonces existente en la tierra.

Bueno, y ustedes dirán, **¿qué ha pasado con nuestras presuntas implicadas?** Pues que en estas fumarolas, a la vez que se formaban estas moléculas de protovida, estaban cristalizando arcillas, como se ha comprobado por las que acompañaban a los cristales

2. Teoría de la panspermia o «semillas por todos lados»: las moléculas de protovida, como aminoácidos e incluso microorganismos, vinieron del espacio en meteoritos. No resuelve el origen de la vida y tuvo en nuestro insigne bioquímico Juan Oro uno de sus grandes defensores



3. Teoría de las fumarolas: La vida surgió en los respiraderos profundos de los océanos o en zonas de aguas termales. Es realmente otra versión del brebaje o sopa primigenia de Miller ... a la vez se formaban arcillas!



Y QUE HA SIDO DE NUESTRAS ARCILLAS?

En las fumarolas

- Erosión de silicatos cristalinos y precipitación de silicatos laminares
- Los ácidos carboxílicos (biomoléculas) favorecen la formación de arcillas

Coincidían en el mismo sitio moléculas de protovida y nuestras presuntas!

8



La atmósfera primitiva no era la de Miller pero sus principios son válidos:

- La intensa actividad volcánica
- Los rayos atmosféricos
- Los impactos de asteroides

Formación CNH $\xrightarrow{\text{Fe}}$ Ribosa $\rightarrow$ ARN

* Como se convirtieron las moléculas de oligopéptidos y nucleobases en ARN y en las complejas estructuras celulares o protocelulares?

La clave: los coacervados de Miller

* Consenso general:



9

de Zirconio aparecidos en Australia con 4000-3500M años de antigüedad, y es más, posteriormente se ha comprobado que ácidos carboxílicos como el oxálico y succínico, producidos en el brebaje de Miller, y por tanto, en las fumarolas, favorecen la formación de arcillas en agua conteniendo sílice, aluminio o magnesio (Bontognali et al. 2014), o sea, coincidían formándose en el mismo sitio, las biomoléculas de protovida y nuestras presuntas implicadas.

Aunque hoy se sabe que la atmósfera primitiva no era exactamente la empleada por Miller, sus principios siguen siendo válidos en líneas generales, ya que la intensa actividad volcánica y los rayos atmosféricos se combinaron con los impactos intensos y continuados de asteroides junto con la radiación UV del sol, creando hidrógeno y ácido cianhídrico, que luego reaccionó con el hierro de la corteza terrestre, formando azúcares tipo ribosa, que se polimerizaron para dar cadenas de ácido ribonucleico, o ARN, un componente clave de la vida (Patel et al. 2009).

4ª. Teoría de la arcilla: ¿Cómo se convirtieron estas moléculas de ARN en complejas estructuras celulares rodeadas de membranas protectoras?. La clave puede estar en los coacervados de la sopa primitiva de Miller, que actuaron como protocélulas concentrando el ARN primitivo y otros compuestos orgánicos (Criado-Reyes et al. 2023). En estos últimos pasos, hay un consenso general en que la interacción organomineral, fue clave en la formación de los polímeros (lípidos, nucleótidos, proteínas, etc.), que dieron lugar a la protocélula de la que partió la vida en la tierra o teoría de la arcilla ¿por qué precisamente las arcillas son nuestras presuntas implicadas?. Porque, como veremos, sus propiedades las convierten en principales sospechosas.

El primero en sugerir el papel clave de la arcilla en el origen de la vida fue el francés Jean Bernal en 1949 (Bernal, 1949), que proponía las arcillas como coadyuvantes en la formación de las primeras moléculas orgánicas cercanas a la vida, por las siguientes razones:

- Sus ordenadas y repetitivas estructuras laminares: Las láminas de arcillas, que por ello se llaman silicatos laminares. están formadas por 2 o 3 capas. Hablaremos de las de 3 capas para simplificar: cada lámina es como un sándwich, en el que el pan son capas de tetraedros de SiO_4 y el jamón o queso octaedros de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, que comparten sus vértices, de forma que están compensadas las cargas positivas de Si y Al con las negativas de los O e hidroxilos, y se corresponden con los minerales talco y pirofilita. Pero la mayoría de los minerales de la arcilla presentan lo que se llaman defectos químicos o sustituciones isomórficas, esto es, algunos cationes de su red se cambian por otros de similar tamaño, pero distinta carga, así se cambia el Si^{4+} por Al^{3+} en la capa tetraédrica, y Al^{3+} por Mg^{2+} en la octaédrica, lo que crea un exceso de carga negativa en la lámina, convirtiéndose en un enorme anión, cuya carga se compensa con la entrada de cationes como Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} más o menos hidratados, que mantienen unido el siste-

Teoría de la arcilla #HASC

Jean P Bernal en 1949 señaló las arcillas como principales presuntas implicadas por las siguientes propiedades

- Ordenadas y repetitivas estructuras laminares
- Enorme capacidad de adsorción asociada a su espacio interlaminar
- Protección frente a radiación UV,
- Concentran y polimerizan moléculas orgánicas (catalizadores)

Estructura laminar de las arcillas

Se han imaginado numerosos escenarios y experimentos para comprobar el papel de nuestras presuntas implicadas

10

ma cristalino, como en micas, montmorillonitas, illitas, nontronitas, hectoritas y un largo etcétera. Y que cristalizan lámina sobre lámina, como si fuera un paquete de folios. Y esta estructura laminar les confiere:

- Una enorme capacidad de adsorción,
- Capacidad de protección frente a radiación UV de los compuestos adsorbidos, y
- Capacidad para concentrar moléculas orgánicas y catalizar su polimerización.

Son potencialmente una magnífica fábrica para sintetizar y proteger moléculas de protovida!

Desde que Bernal propuso su teoría, han sido numerosos los escenarios prebióticos, incluyendo arcillas, que se han experimentado y descrito, pero como no os quiero cansar, voy a elegir los más relevantes, empezando por los que marcaron el camino y los derroteros más actuales. Cualquier científico que observe la cristalización de un mineral, iniciada por la siembra de semillas en una disolución saturada, se verá tentado de asociar este proceso con la vida. El primero que lo encajó como un puzzle fue Cairns-Smith (1965), en su trabajo *The origin of Life and the nature of the primitive gen* publicado en el *J.Theor. Biology*, en el que identificó la información genética con los defectos cristalinos que se repiten a lo largo de la red del cristal. Es lo que él llama el gen inorgánico o genógrafo, o sea, un cristal inorgánico interactuaría como molde primitivo para transferir la información contenida en él, a las moléculas orgánicas primige-

#RASC

El crecimiento de cristales = la vida

Cairn-Smith (1965): El origen de la vida y la naturaleza del gen primitivo o la teoría del Genógrafo, J. Theor. Biology

Clave: las imperfecciones del cristal son los centros de la información genética

Quien tenía posibilidades?
Nuestras presuntas!!
Las arcillas laminares

Todos estos defectos se replican lamina a lamina

Información Genográfica

Gen o Genógrafo

Centros activos de Interacción con moléculas orgánicas COINCIDEN CON

- Defectos cristalinos
- Con la información genética

EL GEN CRISTAL INTERACTUARIA CON LAS MOLECULAS O POLIMEROS PRIMIGENIOS Y TRAS ORDENARLOS LES PASARIA LA INFORMACION ➡ REPLICANTES

nias de los coacervados de Miller, y tras su ordenación, se convertirían en las primeras moléculas orgánicas replicantes.

Según Cairn-Smith (1965) los defectos cristalinos pueden ser de tres tipos:

1. Imperfecciones físicas: suelen ocurrir en los bordes de ruptura, unión o crecimiento
2. Imperfecciones químicas: ocurren cuando un átomo es sustituido por otro, lo que crea defecto o exceso de carga, incluso tensión en la red
3. Imperfecciones complejas o mixtas: que son una mezcla de las dos anteriores, una imperfección química da lugar a una física y crea un punto que atraiga otros componentes. Estas son las más interesantes, desde el punto de vista del origen del gen, según Cairns-Smith, y como ocurre con las estructuras de los genes, estos defectos deben repetirse periódicamente.

Los mejores candidatos que cumplen estos requisitos de defectos cristalinos repetidos a lo largo de la red, son los silicatos laminares o arcillas, que ya habían sido sugeridos por Bernal como presuntas implicadas. Las posibilidades de interacción de los minerales de la arcilla con moléculas y polímeros orgánicos son casi infinitas, y están asociadas a sus centros activos de interacción, que coinciden con sus defectos crista-

linos, y que son: (a) las zonas cargadas de las láminas, cationes interlaminares, zonas polares de los bordes de los cristales, todas estas hidrófilas o compatibles con el agua, y (b) las zonas hidrófobas en la interlámina que repelen el agua. Por tanto, de acuerdo con estas habilidades, las arcillas tenían todas las “papeletas” para que Cairns-Smith las considerara implicadas en la química prebiótica, junto con las primeras biomoléculas, y según este científico, la vida se desarrolló en dos fases: un origen primario y un origen secundario. Realmente ya existían numerosas revisiones y libros dedicados a la interacción órgano-arcilla cuando Cairns Smith publicó su trabajo y se basó una gran parte en ellos. Así distingue dos fases: en la interacción biomoléculas de protovida y arcillas, el origen primario y el origen secundario.

EL ORIGEN PRIMARIO

En la figura siguiente se muestran 3 esquemas:

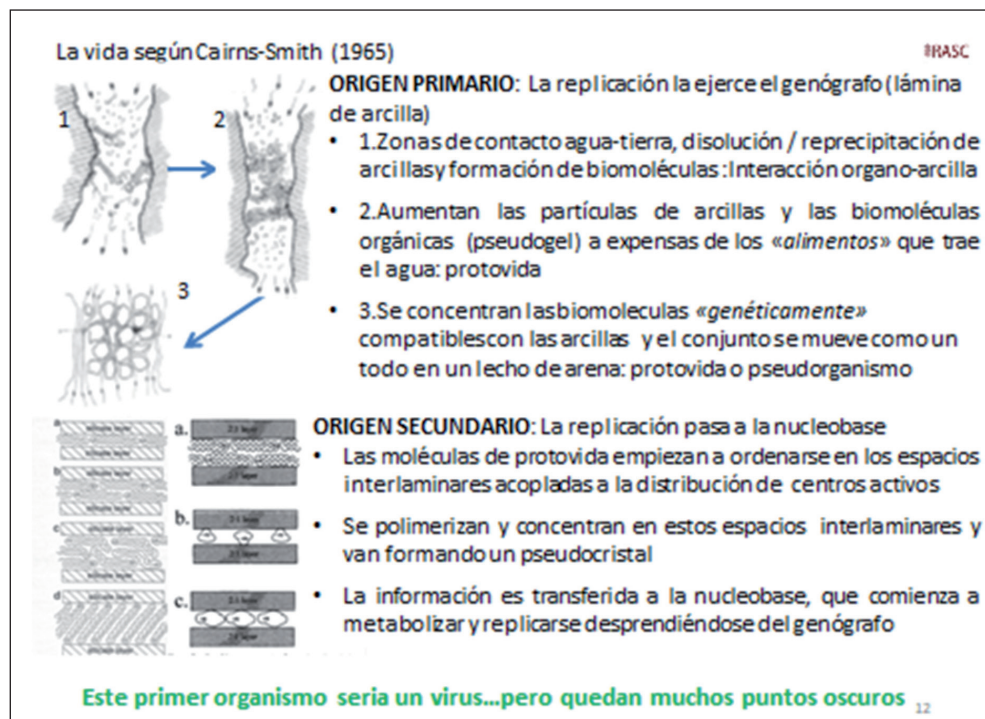
- Esquema 1: Imaginemos que en la tierra primitiva, y en zonas de contacto agua-tierra, ocurre la erosión de los cristales primigenios, que los disuelve y reprecipita en forma de arcillas laminares menos cristalinas, a la vez que se forman biomoléculas primigenias, que comienzan a interaccionar en los bordes de las láminas.
- Esquema 2: Si continua llegando disolución con “alimento”, se siguen formando las láminas de arcilla replicando sus defectos cristalinos, y las moléculas orgánicas, “genéticamente” compatibles, se van asociando, formando como un gel que sigue avanzando, creciendo y ordenándose: protovida,
- Esquema 3: Este gel con las biomoléculas genéticamente compatibles asociadas a las arcillas en sus superficies externas y bordes de paquetes laminares, se mueve como un todo en un lecho de arena: pseudo-organismo.

Como se observa en el tercer esquema estas asociaciones arcillas-biomoléculas, pueden alcanzar lugares más abiertos, y mientras encuentren el flujo de disolución alimenticia, irán favoreciendo su crecimiento, pervivencia y replicación. Aquellas que queden fuera del flujo “alimenticio”, morirán. Hasta aquí, la información es replicada por los minerales o genógrafos, y a ellos se acoplan moléculas orgánicas “ad hoc”.

EL ORIGEN SECUNDARIO

Este, ya más cercano al concepto actual de vida, se daría cuando el control genético de la información pase de las láminas de arcilla a las macromoléculas orgánicas, y para ello propone los siguientes pasos:

- Las moléculas de protovida empiezan a entrar y ordenarse en los espacios interlaminares, acopladas a la distribución de sus centros activos



- Se polimerizan y continúan concentrándose en estos espacios (polipéptidos, proteínas, nucleobases), y van formando un pseudocristal de nucleobases
- La información es transferida a los biopolímeros cristalizados, que comienzan a metabolizar y replicarse desprendiéndose del genógrafa

Este primer organismo, según el autor, sería un virus y aún quedaban muchos puntos oscuros, aunque, sin duda, este artículo sentó las bases para todo lo que se ha progresado después.

Si consideramos que la vida debe haber comenzado por una especie celular o proto-celular, ésta necesita de una membrana (polipeptídica) que la separe del entorno acuoso. También necesitaría de moléculas catalizadoras o enzimas que son proteínas, para realizar su trabajo químico/metabólico y también, moléculas depositarias de la información para transferirla y replicarla, o sea, polinucleótidos. Todos los componentes fundamentales de la posible protocélula son pues polímeros.

Ahora veremos como este tipo de polímeros pueden formarse en presencia de arcilla, gracias a su papel catalizador, como sugería Bernal, en 1949.

(A) **La síntesis de polímeros polipéptidos** a partir de aminoácidos, parece una sencilla reacción por condensación de dos moléculas monómeras; se pierde una molécula

#RASC

Formación de oligopéptidos , polipéptidos y proteínas a partir de aminoácidos

peptide bond

Caolinita y montmorillonita
Humectación/desecación
25/95

$n = 6 \text{ o } 50$

$+n\text{H}_2\text{O}$

- Lahav en el 1978 demostró la oligomerización de glicina en presencia de montmorillonita y sometidas a humectación/desecación y fluctuando temperatura entre 25-95°C se obtenían oligómeros de hasta 6 monómeros
- Repitiendo el ciclo, centrifugando y añadiendo disolución fresca, se llegaba hasta 50 monómeros (polipéptido)
- Esto mismo se ha comprobado después para numerosos aminoácidos y sus combinaciones
- La arcilla podría de esta forma contribuir a la formación de la membrana y al paso de los coacervados a vesículas

de agua y aparece el enlace peptídico. Pero esta reacción no es energéticamente favorable en medio acuoso, solamente es posible si al medio acuoso se añade un agente condensante o un grupo activador al monómero, o en presencia de arcillas, de lo que tenemos bastantes pruebas científicas

Lahav (1976) demostró que la glicina se polimeriza en presencia de caolinita y montmorillonita sódicas, mediante fluctuaciones de humectación/desecación y temperaturas (25/94°C) hasta formar cadenas de 5-6 monómeros, mientras que sin la arcilla solo se formaban trazas de dímeros. Se ha demostrado para otros aminoácidos: histidil-histidina, alanina, uracilo, e incluso para combinaciones de ellos, siempre en presencia de montmorillonita. Si se emplea el dímero en lugar del monómero y repitiendo el ciclo de centrifugación y disolución nueva, se pueden formar cadenas de hasta 50 monómeros, y por tanto, **las arcillas pueden catalizar la formación de polipéptidos, uno de los componentes principales de la membrana celular.**

(B) Vamos a fijarnos ahora en **la síntesis del ARN**, porque hay un consenso general que es el biopolímero más importante en la temprana vida en la tierra, lo que se le llama el mundo del ARN. Aquí se muestra un monómero de ARN activado con un grupo Imidazol: se trata del (Imidazolfosforiboso-adenina) ImpA, que puede formar cadenas uniéndose por los grupos fosfatos de otros monómeros. Ferris y Ertem (1993) han demostrado el papel catalizador de la arcilla montmorillonita, al comprobar que este monómero, en presencia de esta arcilla, producía oligómeros de 6-14 monómeros de adenina, disponibles para seguir creciendo mediante enlaces fosfodiésteres. Se ha de-

mostrado que, igualmente, se forman nucleótidos de otras bases como citosina, guanina, ionosina y uracilo y de la combinación de varios. Separando la disolución y añadiendo nueva disolución fresca de monómeros (Ferris 2002), se pueden llegar a polinucleótidos de hasta 55 monómeros después de 14 ciclos, y a partir de 40 monómeros el ARN ya puede replicar y metabolizar.

Esto podría ocurrir en cualquier entorno terrestre donde la tierra y agua se encontrasen, y hubiera este tipo de mineral, por otra parte, muy abundante desde los primeros estadios terrestres y el agua trajera estas moléculas prebióticas como proponía Cairns-Smith. Y el ARN ya es el precursor más cercano a la vida celular, y estamos, por tanto, ya muy **cerca del mundo del ARN y las arcillas favorecen su formación**. El ARN no se ha encontrado aún en ningún asteroide de los explorados en el espacio, pero **sí** se ha hallado la nucleobase uracilo en las muestras traídas del asteroide Rygú cercano a Neptuno.

Esto sin duda nos habla de que la protovida se puede estar generando en otros planetas, incluso en otros mundos. Actualmente la astrobiología es una ciencia apasionante.

Pero las arcillas, especialmente las laminares expandibles como la montmorillonita, además de catalizar la formación de moléculas de protovida, pueden adsorber estas moléculas entre sus laminas y protegerlas, o incluso transformarlas o inducir cierto grado de metamorfosis. ¿Dónde pueden adsorberse las proteínas en las arcillas? Volvamos a ver los centros activos de adsorción en las montmorillonitas:

#RASC

Ferris y Ertem 1993 y Ferris 2002: ARN

Montmorillonita-Na

Imidazolfosforibosadenanina

+ nH_2O

n = 14-55 mon

- La arcilla montmorillonita cataliza la formación de polinucleótidos (ARN) de hasta 14 mns
- Repitiendo el proceso, reponiendo disolución nueva del monómero (simulando rocas en continuo contacto con bajas concentraciones de biomoléculas): 55 mns
- Se forman nucleótidos de otras bases como citosina, guanina, inosina y uracilo y de la combinación de varios
- A partir de 40 monómeros estos nucleótidos ya pueden mantener la información y catalizar las reacciones de otras moléculas ARN: Mundo del ARN

Las biomoléculas, además de formarse, pueden adsorberse y así estar protegidas

• Las biomoléculas están formadas por una parte lipófila y otra hidrófila

#RASC

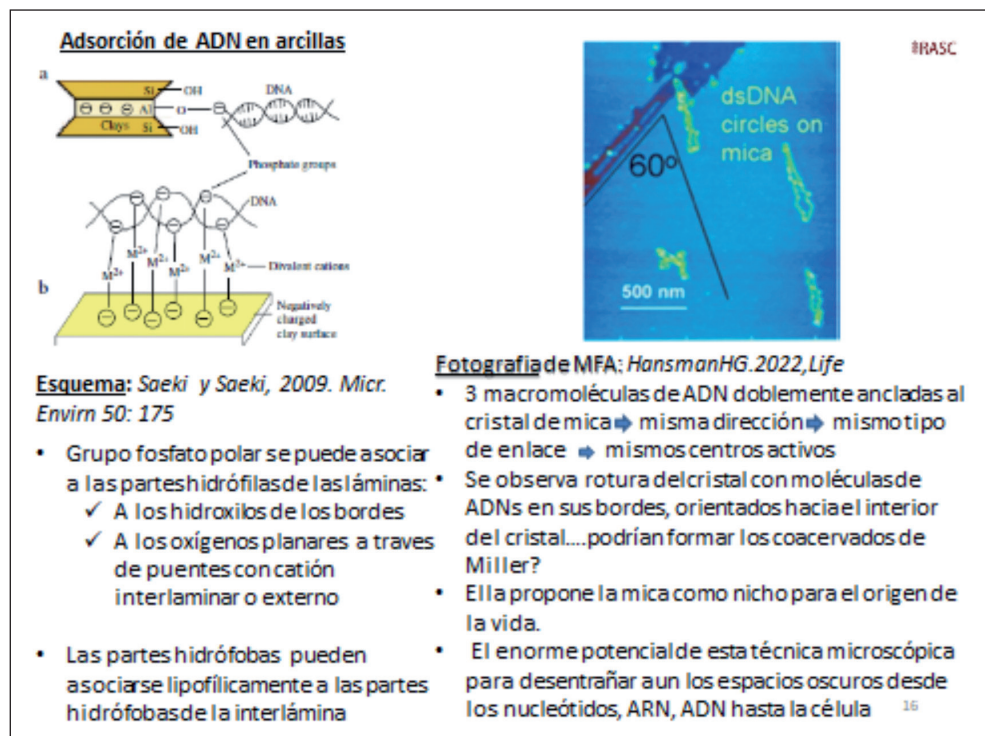
- Las partes hidrófilas se unen a las zonas polares de los bordes y los cationes interlaminares
- Las partes hidrófoba se asocian con las zonas hidrófobas (azul) del espacio interlaminar que se expande
- El espacio interlaminar de las arcillas es una zona de confort y protección para las biomoléculas
- Las cantidades adsorbidas dependen de la cantidad, distribución de carga laminar, del catión de cambio, del pH y del peso molecular, tamaño y conformación de la proteína

15

Las proteínas tienen dos partes iónicas o hidrófilas, el grupo amino positivo y el grupo carboxilo negativo y entre ellos los enlaces peptídicos y cadenas o ciclos de carácter lipófilo, que constituye el cuerpo principal de la molécula: si los grupos amino están cargados positivamente pueden desplazar a los cationes de cambio, los carboxilos a los hidroxilos de los bordes o al agua interlaminar, y su parte central lipófila se encontraría agustísimo entre estas superficies interlaminares azules de carácter lipófilo. Sin duda, la cantidad de proteína que se puede adsorber, tiene que ver con la localización y distribución de carga, del catión interlaminar de la arcilla, del pH del medio y del peso molecular, volumen y conformación de la proteína. La lista de proteínas cuya adsorción se ha demostrado es casi interminable (Sun et al. 2007, Johnston et al. 2012, Yu et al. 2013), entre las que están las enzimas soportadas en arcillas.

Igualmente se ha comprobado ocurre con el ARN y el ADN que aquí mostramos en forma de esquema en la parte superior izquierda de la siguiente figura, en la que vemos la molécula de ADN enganchada a los bordes de los cristales por cambio de ligando: el OH de la red se sustituye por el grupo fosfato, o este por puente de catión a las cargas negativas de las zonas planares de las láminas, y siempre por el grupo fosfato (Saeki y Saeki 2009).

Este modelo se corresponde con un complejo arcilla-ADN aislado en un suelo. Todo esto se ha demostrado en repetidas ocasiones y con diversos tipos de arcillas como, illita,



caolinita, nontronita, hectorita etc., y siempre la adsorción se distribuye entre la superficie externa e interna... **por tanto, lo de presunta ya parece sobrar...**

Estos trabajos descritos probaban esta adsorción interlaminar, y el enlace a centros activos, principalmente por difracción de RX o espectroscopia IR, pero hoy en día es cada vez más fácil casi ver las moléculas por microscopia electrónica de transmisión de alta resolución y sobre todo de FA, como las que muestra en su trabajo Helen Hansman, en la revista *Life* 2022, en el que reivindica la mica, otro silicato laminar, como nicho adecuado para el origen de la vida (Hansman 2022). Sirva pues, como muestra final, esta fotografía de AFM a la derecha de la figura, que parece reproducir el esquema de la izquierda, y que son 4 moléculas de ADN sobre un cristal de mica que muestra: 3 macromoléculas de ADN doblemente ancladas al cristal de mica que sirve de soporte, y todas orientadas en la misma dirección, sugiriendo el mismo tipo de enlace a unos mismos centros activos en las tres, y una cuarta con distinta conformación. También se observan puntos verdes en los bordes de rotura del cristal que corresponderían a moléculas de ADN que estarían orientadas hacia el interior del cristal y que podrían formar los coacervados de Miller. Aquí aún queda mucho tajo por aclarar, pero lo más importante para mí, es mostrar el enorme potencial que esta técnica microscópica ofrece para desentrañar aun los espacios oscuros desde los nucleótidos, ARN y ADN hasta la célula a través de la arcilla.

Por cierto, el recién concedido Premio Nobel de Química 2023 va de proteínas y

Por cierto, el recién concedido Premio Nobel de Química 2023, va de proteínas, y lo comparten 3 científicos bastante jóvenes, la mitad para David Baker (Zhang et al. 2024) por el diseño de proteínas por computación, y la otra mitad conjuntamente a Demis Hassabis y John Jumper, por la predicción de la estructura de las proteínas mediante el uso de la inteligencia artificial (Jumper y Hassabis 2022). Sin duda, las herramientas y equipos actuales nada tienen que ver con los de hace 40 años, y podrán ayudar a aclarar el papel que jugaron las arcillas en el paso de la química prebiótica a la célula, un trabajo apasionante que, como he dejado entrever en algunos puntos de mi exposición, tiene importantes implicaciones en la existencia de vida en otros mundos. Seguro que la computación y ahora la IA podrán sernos de gran ayuda y por ahí van los tiros y ya termino:

La vida, en cierto sentido, es una especie de accidente químico, que ha seguido una danza giratoria y no se ha detenido en más de 3500 millones de años, en la que las arcillas a través de la interacción órgano mineral habrían tenido un relevante papel y espero haberles aclarado que son unas presuntas implicadas, muy presuntas.

- Podría haberse dado o estar dándose estos mismos pasos en otros planetas de nuestro Universo?
- Podrán la Computación y la IA ayudar concretar los pasos aun por conocer desde las moléculas prebióticas asociadas a la arcilla hasta la células?

Seguro que sí!... pero esto daría para otra charla

Y esta ha llegado a su fin, espero no haberos cansado demasiado, muchísimas gracias por vuestra atención

BIBLIOGRAFÍA

- ALFARO, E.J. 2018. La Ley de Hubble-Lamaitre. Revista del Instituto de Astrofísica de Andalucía. 56, <https://revista.iaa.es>.
- BAN, N., NISSEN, P., HANSEN, 391 J., MOORE, P.B., STEITZ, T.A.2000. The complete atomic structure of the large ribosomal subunit at 2.4 Å resolution. *Science* 289:905-909.
- BERNAL, J.D. 1949. The physical basis of life. The Proceedings of the physical Society Section A62, 537-558.
- BONTOGNALI, T.R., MARTINEZ-RUIZ, F.C., MCKENZIE, A., ANJOR, S., VASCONCE-LOS, C. 2014. Smectite synthesis at low temperature and neutral pH in the presence of succinic acid. *Applied Clay Sci*, 101, 553-557.
- BRACK, A. 2006. Clay Minerals and the origin of life. *Handbook of Clay Minerals*. (F.Bergaya, BKG Theng, G. Lagaly) Developments in Sedimentology. Vol.I. Chapter 7.4, pp.:379-389.
- CAIRNS-SMITH, A.G. 1965. The origin of life and the nature of the primitive genes. *J. Theoret. Biol.* 10, 53-88
- CLEAVES, I.I., H.J., SCOTT, A.M., HILL, F.C., LESZCZYNSKI, J., SAHAI, N. & HAZEN, R. 2012, Mineral-organic interfacial processes: Potential roles in the origin of life. *Chem. Soc. Rev.* 41, 5502-5525.
- CRIADO-REYES, J., BIZZARRI, B.M., GRACIA-RUIZ, J.M., SALADINO R., MAURO, E. 2023. The role of borosilicate glass in Miller-Urey. *Sci. Rep.* 11, 21009.
- FERRIS, J.P. 2002. Montmorillonite catalysis of 30-50 mers oligonucleotides: laboratory demonstration of potential steps in the origin of the RNA world. *Origin of Life and Evolution of the Biosphere* 32: 311-322.
- FERRIS, J.P., ERTEM, G. of RNA oligomer formation in aqueous solution: A model for prebiotic formation of RNA. *J. Amer. Chem. Soc.* 115:12270-12275.
- HANSMAN, H.G. 2010. Possible origin of life between mica sheets. *J. Theor. Biol.* 266, 175-188.
- HANSMAN, H.G. 2022. DNA and the origins of life in micaceous clay. *Biophysical J.* 121, 4867.
- HANSMAN, H.G. 2022. Potassium at the origins of life: Did Biology emerge from Biotite in micaceous clay? *Life*, 12, 301.
- JOHNSTON, C.T., PREMACHANDRA, G.S., SZABÓ, T., LOK, J. Y SCHOONHEYDT, R.A. 2012. Interactions of biological molecules with clay minerals: a combined spectroscopic and sorption study of Glycine on saponite. *Langmuir* 28: 611-619.

- LAHAV, N., CHANG, S. 1976. The posible role of solid surface área in condensation reactions during chemical evolution: Re-evaluation. *J. Mol. Evol.* 8, 357-380.
- JUMPER, J., HASSABIS, D. 2022. Protein structure predictions to atomic accuracy with AlphaFold. *Nature Methods* 19:11-12.
- MILLER, S.L. 1953. A production of aminoacids under posible primitive Earth conditios. *Science* 117: 528-529.
- MILLER, S.L., UREY, S.C. 1959. Organic compounds synthesis on the primitive Earth: Several questions have been answered, but much remaintp be. *Science* 130 :245-247
- NATIONAL GEOGRAPHIC. 2024. Cual fue el origen del Universo. <https://www.nationalgeographic/cual-fue-elorigen-del-universo>. Consultado el 28/7/24.
- PATEL, B.H., PERCIVALLE, C., RITSON, D.J., DUFFY, C.D., SUTHERLAND, J.D. (2015) Common origins of RNA, protein and lipid precursors in a cyanosulfidic protometabolism. *Nature Chemistry*, 7: 301-307.
- SAEKI, K., SAKAI, M. 2009.The influence of soil organic matter on DNA adsorption on andosols. *Microbes Environments* 50: 175-179.
- SUN, X.F., LI, C., WU, W.S., XU, X.L., REN, L., ZHAO, H.S. 2007. Adsorption of protein from model wine solution by different bentonites. *Chines Journal of Chemical Engineering* 15: 632-638.
- SZOSTAK, J.W. 2021. Attemptss to define life do not help to understand the origen of life. *J. Biomol. Structure and Dynamics* 29: 599-600.
- WATTERS, L.A., DEKA, P., CORRENT, C., CALLENDER, D., VARANI G., SOSNIK, T., BAKER, D. 2007. The Highly Cooperative Folding of Small Naturally Occurring Proteins Is Likely the Result of Natural Selection. *Cell Theory* 128: 613-624.
- YU, U.W., LI, N., TONG, D. S., ZHOU, C.H., LIN, C. X., XU, C.Y. 2013. Adsorption of proteins and nucleic acids on clay minerals and their interactions. *Appl. Clay Sci.*80-81: 443-450.
- ZAUG, A.J., CECH, T.R. 1986. The intervening sequence RNA od Tetrahymena is an enzyme. *Science* 231: 470-475.

ACTO DE APERTURA DEL CURSO 2024-25

*Palabras del
Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta,
Presidente de la Real Academia
Sevillana de Ciencias,
el día 29 de octubre de 2024*



La inauguración del curso, junto con la conferencia completa se puede ver en:
[Acto de apertura del curso 2024-25 de la Real Academia Sevillana de Ciencias.](#)

Buenas tardes a todos.

Teniente de alcalde, Álvaro Pimentel, muchas gracias por acogernos en esta tu casa, que es también la casa de todos los sevillanos, este lugar tan singular y sin igual que es el Real Alcázar de Sevilla.

Quisiera comenzar disculpando la ausencia del rector de la Universidad Hispalense, Miguel Ángel Castro, quien por compromisos de última hora no ha podido estar con nosotros. En su lugar, nos honra con su presencia el vicerrector de investigación, Julián Martínez. Asimismo, quisiera agradecer su compañía a los otros dos miembros de la mesa –Benito Valdés, presidente del Instituto de Academias de Andalucía, y Enrique Fernández Cara, secretario de la Real Academia Sevillana de Ciencias– y a nuestra conferenciante de hoy, la académica Carmen Hermosín.

Nuestras palabras de agradecimiento y bienvenida van dirigidas también a las autoridades que nos acompañan esta tarde, quienes, a pesar de la lluvia y el mal tiempo, han tenido a bien estar con nosotros en este acto de apertura de curso. Un acto que, sin duda, representa uno de los momentos más significativos y solemnes de nuestra Academia a lo largo del año. Gracias a todos:

- Juan de la Rosa, cuarto teniente de alcalde del Ayuntamiento de Sevilla.
- Antonio Oropesa, presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias Veterinarias.
- Daniel Bilbao, académico de la Real Academia Santa Isabel de Hungría de Sevilla y decano de la Facultad de Bellas Artes.
- Luis Herrero, decano de la Facultad de Biología.
- Juan Luis Pérez Bernal, decano de la Facultad de Química.

- Ramón Pico, director de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Otilio Fernández, decano del Colegio Oficial de Químicos del Sur.

Y, por supuesto, muchas gracias a todos los académicos y acompañantes, compañeros y amigos que hoy nos honran con su presencia.

LECCIÓN INAUGURAL DEL CURSO

Querida Carmen, gracias por tu generosidad al ofrecernos esta conferencia, por tu magnífica exposición sobre el origen de la vida, que ha resuelto muchas de las dudas que teníamos, aunque sean muchas más las preguntas que nos dejas. La evolución debe entenderse como un proceso vivo y en marcha, que probablemente –o con total certeza, como nos has contado– comenzó con las arcillas y todavía hoy continúa. Nos ha tocado vivir en este tiempo concreto, pero ¿quién sabe qué futuro depara el proceso evolutivo?

Quisiera reiterar mi agradecimiento a Álvaro Pimentel y a Juan de la Rosa, tenientes de alcalde que hoy nos acompañan, así como a Julián Martínez, como representante del rector, pues creo que este es un claro ejemplo de interacción institucional. A menudo hablamos de la relación interdisciplinar en ciencia, de cómo se conectan las distintas disciplinas. Pero también es fundamental la relación entre instituciones, y hoy estamos siendo testigos de ello: la Academia, la Universidad y el Ayuntamiento, que representa a la sociedad, a la que, sin duda, nos debemos.

La idea de abrir la Academia a la sociedad, de acercarnos a ella, responde también a nuestros estatutos. En su primer artículo se establece como una de nuestras funciones el fomento y el cultivo de la ciencia, pero también su difusión, divulgación y la interacción con la ciudadanía.

Este acto solemne, de apertura de curso, es también un momento para rendir cuentas, como se ha hecho a través de la memoria presentada por el secretario. Pero me gustaría remontarme a la apertura del curso pasado. En aquel entonces, la actual Junta de Gobierno apenas llevaba dos o tres meses al frente de la Academia. Llegábamos con ideas, ilusión y proyectos. Hoy, tal como hemos escuchado en la memoria, muchas de esas ideas se han convertido en realidades, en proyectos puestos en marcha.

Nuestra estrategia durante este año ha pivotado sobre dos ejes fundamentales:

- La difusión del nuevo conocimiento dentro de la comunidad científica, entre iguales.
- La divulgación de ese conocimiento a la sociedad, entendida como el acercamiento de los nuevos avances a la ciudadanía no especializada.

Dentro de este marco, hay que hablar también de una concepción holística de la ciencia. A pesar de nuestra tradicional separación en disciplinas y facultades, la ciencia es una. Hoy contamos aquí con los decanos de Ciencias, entendidas como facultades que con frecuencia actúan como compartimentos independientes, pero la ciencia res-

ponde a problemas reales de la sociedad, que requieren soluciones integradoras desde la bioquímica, la biología, la matemática, la computación, etc. Tú misma, Carmen, nos has hablado del reciente Premio Nobel de Química y de esa intersección entre predicción estructural, computación e inteligencia artificial. Este es el camino de la ciencia del futuro, y una de las funciones principales de la Academia es facilitar una visión global e integradora.

El otro eje fundamental de nuestra gestión ha sido abrirnos a la sociedad, para que esta entienda y reconozca que necesita de la ciencia. Hay una necesidad social de ciencia. Los grandes problemas actuales –muchos de ellos globales– no pueden resolverse a nivel individual o local, sino mediante una respuesta conjunta y científica. La ciencia es imprescindible para mejorar la salud, la sostenibilidad del planeta y el bienestar general, y es nuestra responsabilidad transmitir esta idea a los ciudadanos.

La Academia cumplirá el año próximo 40 años. Tiene una historia consolidada y somos herederos de una gestión y un legado importantes. Actividades como los premios a jóvenes investigadores con la Real Maestranza de Caballería de Sevilla, los ciclos con Fundación Cajasol, o las conferencias de “los martes de la Academia” en el Ateneo, son iniciativas que han venido consolidándose. Pero también hay proyectos nuevos, ideas que hace un año eran solo propuestas y que hoy son una realidad. Voy a destacar solo dos, en las que participan algunos de nuestros mecenas principales. (Prefiero usar la palabra mecenas más que patrocinador, pues el mecenazgo es desinteresado y altruista, movido por el interés en el conocimiento más que por el eventual beneficio). Las dos iniciativas son:

Con el Ayuntamiento de Sevilla, firmamos un protocolo con el alcalde, José Luis Sanz, para realizar actividades conjuntas entre Ayuntamiento y Academia. Este acto de hoy es fruto de ese acuerdo. Además, presentamos una idea que fue acogida con entusiasmo: utilizar la ciencia que se hace en Sevilla como instrumento para promocionar la ciudad. Sevilla es ya una ciudad atractiva por sí sola, pero poco se sabe sobre la ciencia que aquí se genera. Proponemos que esa ciencia sirva también para proyectar Sevilla al mundo, como parte de su identidad cultural e intelectual. Estamos trabajando en ello y confiamos en que el próximo año podamos presentar avances significativos.

Con la Universidad de Sevilla, firmamos también un convenio de colaboración, con el apoyo del vicerrector de investigación y los decanos de Ciencias. Como parte de este acuerdo:

- Se ha organizado un acto de apertura conjunto de los másteres de Ciencias, con una conferencia inaugural común, promoviendo la interdisciplinariedad.
- Se ha instaurado un premio a la mejor tesis doctoral en el ámbito de las Ciencias, que se entrega en el acto de San Alberto Magno, rotando cada año por las distintas facultades.
- Se está desarrollando una jornada de convivencia entre nuestros jóvenes investigadores premiados por la Academia y doctorandos de la Universidad, para compartir experiencias, retos y trayectorias, más allá de la ciencia.

También gracias al apoyo de la Universidad, el ciclo de Historia y Filosofía de la Ciencia, coordinado por Francisco Sánchez Burgos y Manuel Castillo, contará con una conferencia inaugural impartida por especialistas externos.

Por último, me gustaría destacar un proyecto especialmente simbólico: el de Arte y Ciencia, desarrollado con la Facultad de Bellas Artes, gracias en buena parte al apoyo de su decano, Daniel Bilbao, y de la presidenta de la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular (SEBBM), Isabel Varela. Inspirados por el concepto de inmolación celular –células que mueren de forma ordenada para mantener el equilibrio del organismo–, se promovió un diálogo entre científicos y artistas. Fruto de este intercambio surgieron 20 obras, creadas no solo por alumnos sino también por profesores, que se expusieron con gran éxito y asistencia en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología de La Coruña, coincidiendo con el congreso de la SEBBM. A través del arte, hemos logrado que niños, profesores y familias comprendan mejor conceptos complejos de la biología celular. La ciencia, transmitida así, impacta más profundamente. Y por ello seguiremos desarrollando esta iniciativa el próximo curso.

En definitiva, todas estas actividades forman parte de un proyecto coherente, que persigue una ciencia más abierta, interdisciplinar y cercana a la sociedad. Necesitamos el mecenazgo institucional, y hoy es un gran ejemplo de esa colaboración. Porque no somos solo científicos: somos ciudadanos. Y la ciencia es también un compromiso con la sociedad.

Finalmente, y ahora sí concluyo, el año que viene celebraremos los 40 años de la Academia, fundada en 1985. Es una institución joven en comparación con otras, pero ya muy rica en trayectoria. Y, además de todo lo que hacemos, quiero resaltar el extraordinario capital humano de nuestra Academia: contamos con premios Jaime I, Príncipe de Asturias, Premios Nacionales, internacionales e incluso premios Nobel. Una riqueza que queremos seguir poniendo al servicio del conocimiento, del progreso y de la sociedad.

Muchas gracias.

LOS CARBOHIDRATOS EN LA COMUNICACIÓN CELULAR: EL IDIOMA DE LA VIDA



*Discurso de toma de posesión
como Académico de Número
por el Ilmo. Sr. D. José Manuel García Fernández,
el día 25 de noviembre de 2024*

Excelentísimo Señor Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, Excelentísimo Señor Presidente del Instituto de Academias de Andalucía, Ilustrísimas Autoridades,

Ilustrísimos Sres. y Sras. académicos, Queridos compañeros, amigos y familia, Señoras y Señores,

1. AGRADECIMIENTOS Y RECUERDOS

Es para mí un gran honor haber sido elegido para formar parte de esta prestigiosa institución. La oportunidad de colaborar con sus miembros y aprender de ellos en múltiples campos de la ciencia es un privilegio que valoro profundamente. Agradezco a los académicos que me propusieron y a todos aquellos que han apoyado este nombramiento. En especial, mi gratitud al Dr. Rodríguez González-Elipe por honrarme respondiendo a este discurso.

Este logro no es un viaje que uno emprenda solo; es el resultado del apoyo y contribuciones de muchas personas. Es momento de expresar mi agradecimiento a todos los que han sido parte de mi camino, permitiéndome estar aquí, recibiendo el alto honor de ser aceptado como miembro numerario de la Academia Sevillana de Ciencias.

En el ámbito académico, mi agradecimiento a todos mis profesores de la licenciatura de Química, algunos de los cuales han contribuido, y continúan contribuyendo, al prestigio de esta Institución. En cuanto a mi faceta investigadora, debo destacar especialmente a cuatro personas que han marcado decisivamente mi trayectoria. Mi director de Tesis, el Dr. José Fuentes Mota, quien sentó las bases de mi conocimiento en la química de carbohidratos y despertó mi curiosidad por estas fascinantes moléculas. Al Dr. Jacques Defaye, del Centro de Estudios Nucleares de Grenoble, en Francia, por los cinco años de rica colaboración que me brindaron una profunda comprensión de la investigación básica y su aplicación a la solución de problemas sociales. Un recuerdo muy

especial para el Dr. Yoshiyoki Suzuki, de la Universidad de Tokyo, en Japón, pediatra y neurólogo infantil, cuya influencia fue decisiva no solo en lo profesional, sino también en lo personal. Finalmente, la Dra. Carmen Ortiz, cuyo apoyo y compañerismo durante 40 años han sido invaluable. Nuestra trayectoria compartida en la ciencia y en la vida es inseparable y constituye la base de todo lo que puedo contar hoy.

A lo largo de mi carrera científica, he tenido la fortuna de estar rodeado de investigadores e investigadoras excelentes, tanto en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas como en la Universidad de Sevilla. Profesionales de primer nivel, comprometidos y talentosos. Muchísimas gracias a todos.

Dejo para el lugar de honor a mi familia. A mis padres, quienes siempre me apoyaron en todas las decisiones, incluso cuando no eran las más seguras laboralmente. A mis hermanos, con quienes he compartido alegrías y frustraciones. Y, una vez más, a Carmen, y a mis hijos, por soportar las limitaciones de tiempo que la investigación impone. Tengo la firme intención de que no ocurra lo mismo con mis nietas.

Gracias a todos por estar aquí y por ser parte de este momento tan significativo en mi vida.

2. PRÓLOGO Y RESUMEN

Podría seguir dando las gracias, gracias y gracias hasta consumir el tiempo que razonablemente debe durar este discurso, y no sería suficiente. Por ejemplo, gracias a la Academia Sevillana de Ciencias por confiar en mí ya en el año 1997, cuando me concedió el Premio a Jóvenes Investigadores de esta Real Academia, convocado de forma conjunta con la Real Maestranza de Caballería de Sevilla. Pero deber obliga, y es momento de repasar, con la perspectiva que dan los años, los temas, los proyectos y los problemas que he tenido la oportunidad de abordar desde que en el año 1988 defendí mi Tesis Doctoral y empecé una aventura que continúa.

En el año 2015 se celebró el 75 aniversario del CSIC y, como Director entonces del Instituto de Investigaciones Químicas, tuve ocasión de asistir al acto institucional en la sede central de Serrano, en Madrid. En aquel entonces, el CSIC estaba adscrito al Ministerio de Economía. Recuerdo que el ministro, quizás con la complicidad inconsciente de algunos, ensalzó la investigación de excelencia, asimilándola a la parte visible de un iceberg. Su razonamiento pretendía justificar los recortes que esperaban: hay que focalizar los recursos en la parte visible de la investigación, no en la que queda por debajo de la línea de flotación. La réplica la dio un investigador insigne, el Dr. José Elguero: “La investigación de excelencia no es la punta de un iceberg, es la cima de una duna; cada grano importa. Si se elimina la arena de la base, toda ella se desmorona” (Fig. 1).

Las palabras que suceden pretenden ilustrar mi grano de arena, confiando en que ayude a que la duna sea cada vez más sólida y más alta. Me centraré en algunos de los aspectos que han sido el eje de mi actividad y que están relacionados con una de las familias de biomoléculas imprescindibles para la vida tal y como la conocemos: los carbohidratos. Más allá de las calorías, les avanzo que ustedes, todos, somos lo que

FIGURA 1
REFLEXIÓN SOBRE LA INVESTIGACIÓN DE EXCELENCIA COMO LA PUNTA
DE UN ICEBERG O COMO LA CIMA DE UNA DUNA



somos por los carbohidratos que nos caracterizan como especie y como individuos. Los carbohidratos permiten a nuestras células reconocer si otra célula es también nuestra o si es de un patógeno, si podemos estar tranquilos o si hay que defenderse, y pueden determinar incluso si un fármaco actúa donde debe o donde no debe.

3. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO: LA PIEDRA ROSETTA DEL LENGUAJE CELULAR

Al leer el prospecto de cualquier medicamento, es común experimentar cierta inquietud ante los posibles efectos secundarios que podría desencadenar. Es cierto que un medicamento aprobado por las agencias regulatorias y recetado por un profesional médico cuenta con niveles de seguridad garantizados. Nuestra sociedad del bienestar se ha construido, en gran medida, sobre la base del acceso a terapias cada vez más eficaces. No obstante, siempre existe un riesgo asociado. En situaciones extremas, como en el caso de los medicamentos utilizados en la quimioterapia contra el cáncer, el equilibrio entre los beneficios y los riesgos es sumamente delicado. Aquí, el especialista debe evaluar no solo si el tratamiento es el más adecuado para combatir el tipo de tumor en cuestión, sino también si el paciente podrá tolerarlo. Es crucial tener en cuenta que estos tratamientos no solo afectan a las células cancerosas, sino que también pueden impactar el tejido sano del organismo (Fig. 2).

FIGURA 2
EL RIESGO DE EFECTOS SECUNDARIOS DE LOS MEDICAMENTOS



Estos desafíos relacionados con los efectos secundarios se derivan principalmente de que la mayoría de los medicamentos disponibles en la actualidad no pueden distinguir específicamente las células en las que deben actuar. En última instancia, todo se reduce a un problema de comunicación entre el fármaco y las células del cuerpo.

La raíz de esta falta de comunicación no reside en las células, sino en el diseño mismo del medicamento. Las células tienen una notable capacidad para interactuar y reconocerse entre sí de manera precisa. Un ejemplo claro de esto es el proceso de fecundación, que solo puede ocurrir entre gametos de individuos de la misma especie. Del mismo modo, cuando se trata de organismos invasores, la especificidad es la norma: ciertas bacterias pueden causar una infección en el sistema respiratorio, como la neumonía, mientras que otras afectarán, por ejemplo, el sistema digestivo. Este nivel de especificidad celular contrasta con la incapacidad de muchos medicamentos para distinguir entre células sanas y células anómalas, lo que contribuye a los efectos secundarios no deseados que pueden golpear nuestro organismo (Fig. 3).

Prácticamente desde que se formuló la hipótesis de la célula, se sugirió que los procesos de reconocimiento en la biología podrían estar regulados por estructuras complementarias en las membranas celulares, de manera análoga al modelo llave-cerradura propuesto para las enzimas (Lombard 2014). Sin embargo, hasta mediados del siglo XX, la naturaleza química de las moléculas involucradas en estos procesos era completamente desconocida. Durante la década de 1960, una serie de descubrimientos revelaron de manera concluyente que los azúcares eran los principales responsables de estos fenómenos de reconocimiento celular. El más significativo de estos hallazgos fue la identificación de un revestimiento glucídico en la membrana celular, compuesto por oligosacáridos unidos a proteínas o lípidos de membrana. Esto implicaba que cualquier agente externo que interactuara con la célula debía primero atravesar este revestimiento glucídico, denominado glicocálix, el cual, además, es distintivo de cada tipo celular (Wisnovsky & Bertozzi, 2022; Fig. 4). El hallazgo transformó por completo la percepción que se tenía sobre los azúcares en la comunidad científica. Hasta entonces, los

FIGURA 3
LA COMUNICACIÓN CELULAR, SU IMPORTANCIA EN FENÓMENOS COMO LA FECUNDACIÓN O LOS PROCESOS INFECCIOSOS Y SU FALTA EN LA INTERACCIÓN CON UN FÁRMACO

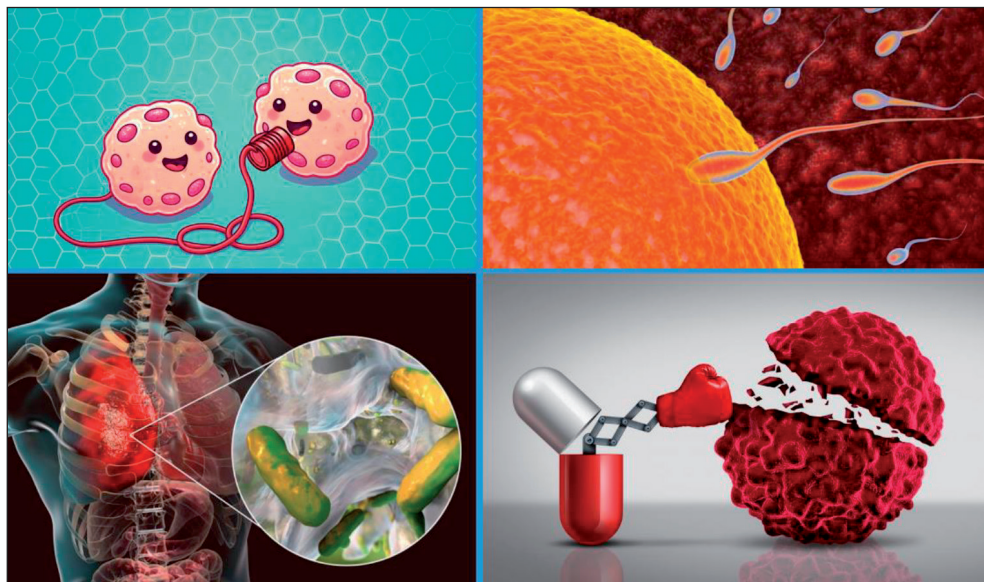
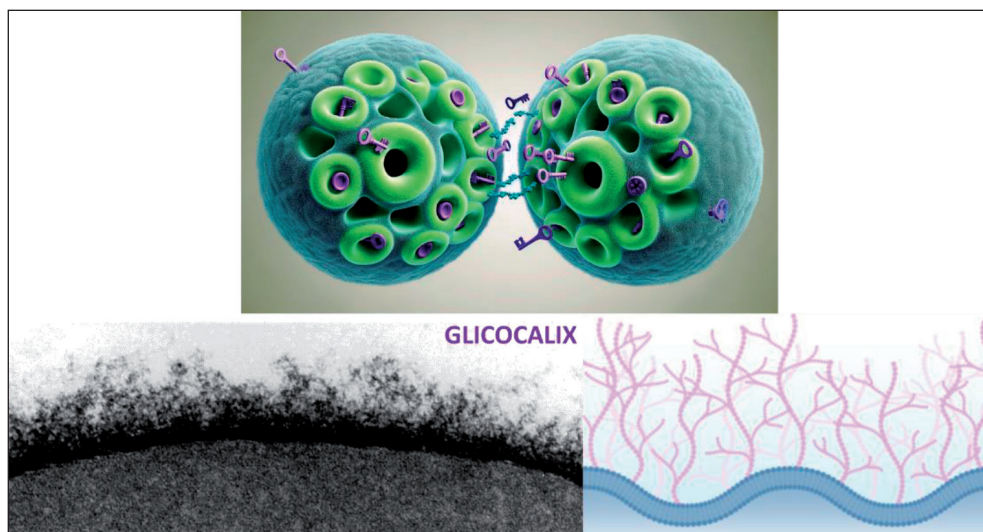


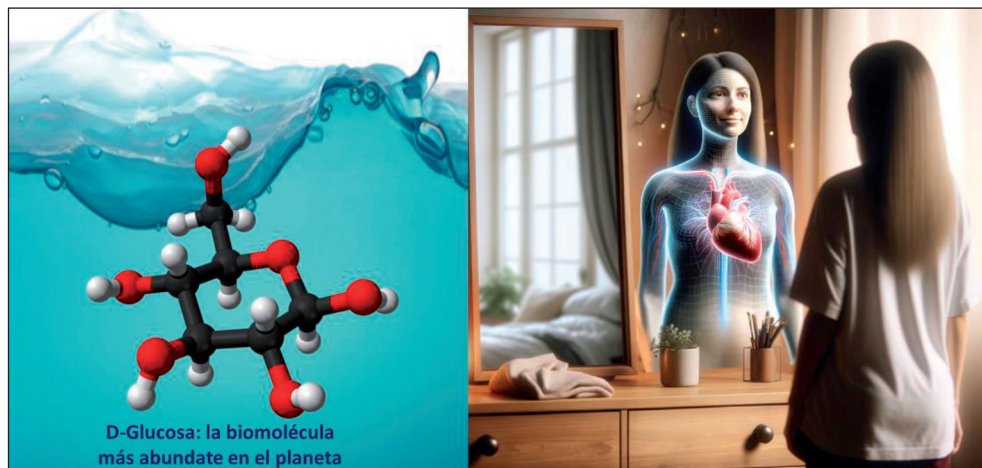
FIGURA 4
ALEGORÍA DEL MODELO LLAVE-CERRADURA EN EL RECONOCIMIENTO CÉLULA-CÉLULA, IMAGEN DEL GLICOCÁLIX EN EL EXTERIOR DE LA MEMBRANA CELULAR Y REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL MISMO



carbohidratos habían sido considerados biomoléculas secundarias en comparación con los ácidos nucleicos y las proteínas, a los que se les asignaban las funciones más cruciales para la vida. Se pensaba que los azúcares estaban principalmente asociados con funciones estructurales, como la celulosa en las plantas o la quitina en el exoesqueleto de los insectos, o con el almacenamiento de energía, como el almidón y el glucógeno.

Desde el punto de vista químico, los azúcares son compuestos complejos y multifacéticos que pueden resultar desafiantes e incluso irritantes para los investigadores. Tomemos el ejemplo de la D-glucosa, el componente más abundante en la naturaleza, especialmente como elemento base de la celulosa en la masa forestal. Aunque es posible cristalizar la D-glucosa y obtenerla en su forma pura, al disolverla en agua nos encontramos con al menos cinco especies diferentes, y todas ellas son glucosa y pueden generar las otras cuatro de manera espontánea. Esta multiplicidad puede explicarse químicamente, pero su gestión no es sencilla. Además, los azúcares forman parte de lo que conocemos como moléculas quirales, que son inequivalentes a su imagen especular. Nosotros mismos somos quirales; por ejemplo, nuestra imagen reflejada en un espejo tendría el corazón en el lado derecho en lugar del izquierdo. Pero, mientras que en los humanos la imagen especular no existe en el mundo real, para muchos azúcares ambas formas se encuentran en la naturaleza (Fig. 5).

FIGURA 5
REPRESENTACIÓN DE LA MOLÉCULA DE D-GLUCOSA E IMAGEN ILUSTRANDO
LA INEQUIVALENCIA DE UNA PERSONA Y SU REFLEXIÓN EN EL ESPEJO



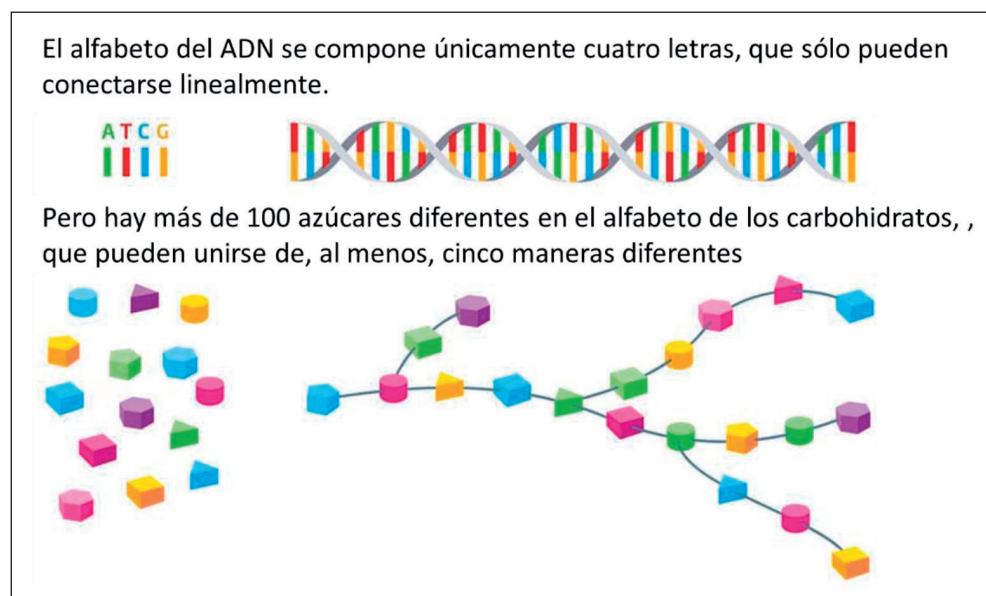
A esta complejidad se suma la variedad estructural y las formas en que dos unidades de azúcar pueden conectarse entre sí, que son innumerables. Para los químicos, esto puede representar un desafío considerable, pero para las células, y para la vida en general, representa una oportunidad única para almacenar una información sumamente diversa en un espacio reducido. Los carbohidratos son las biomoléculas que permiten el

mayor número de combinaciones posibles, lo que significa una capacidad excepcional para codificar información por unidad de masa, en comparación con las proteínas o los ácidos nucleicos. Por ejemplo, con un aminoácido o un nucleótido se puede construir un único oligómero lineal, independientemente del número de repeticiones. Sin embargo, con un simple monosacárido, si consideramos una sucesión lineal de un componente repetido cinco veces, ya existen más de 17.000 posibilidades. Esta diferencia se amplía exponencialmente si incluimos cinco monómeros diferentes, superando los 20 millones de combinaciones posibles, en comparación con las 120 para ácidos nucleicos o proteínas. Con seis unidades, ya superamos el billón (Laine 1997; Fig. 6).

Los azúcares, por lo tanto, constituyen el alfabeto ideal para encriptar el “código fuente” que determina las diferencias entre las células de todos los organismos vivos y el estado en que se encuentra cada una de esas células. A diferencia de la estructura de las proteínas, que está codificada en el genoma, la estructura de los carbohidratos depende de la expresión de un conjunto de enzimas en una ubicación específica, lo que los hace ideales para distinguir y etiquetar las singularidades que caracterizan a un organismo complejo. No todas nuestras células son iguales; varían según su ubicación y función; incluso en un mismo individuo, pueden cambiar en respuesta a factores como el embarazo o la enfermedad, aunque la información genética sea la misma.

Hasta los albores del siglo XXI, la hipótesis generalmente aceptada era que el grado de evolución de los diferentes organismos se medía por el volumen de su genoma, es decir, el número de genes. El razonamiento detrás de esta idea era lógico: los genes son

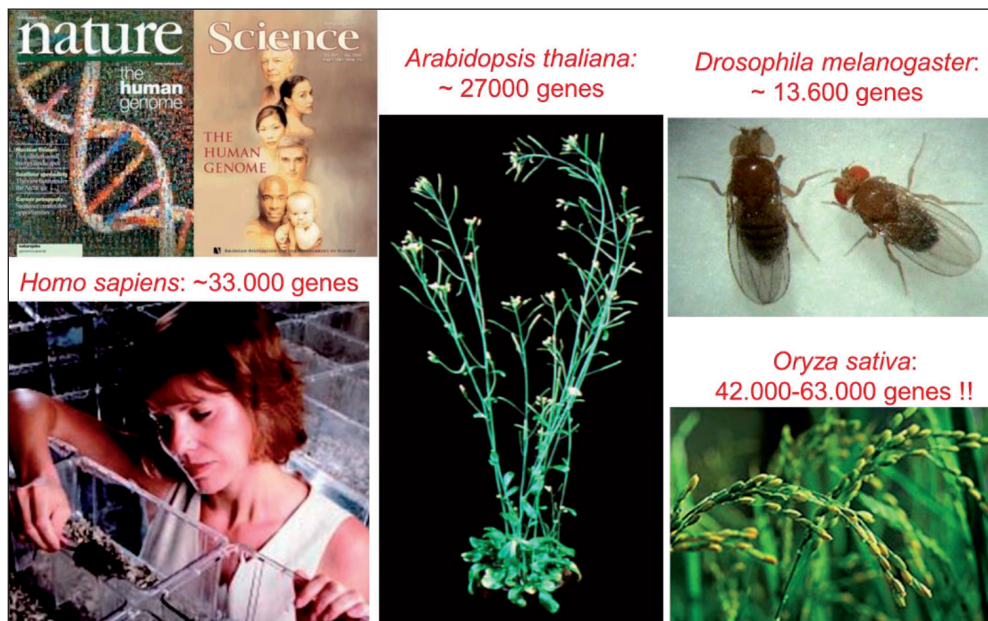
FIGURA 6
COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD PARA CODIFICAR INFORMACIÓN DE LOS ÁCIDOS NUCLEICOS Y DE LOS CARBOHIDRATOS



las unidades funcionales que determinan la herencia y, como son los responsables de codificar las proteínas (el proteoma), se pensaba que a más genes, más diversidad de proteínas y, por ende, mayor complejidad. Para respaldar esta teoría y trazar el mapa genético humano, se lanzó en la década de 1980 el Proyecto Genoma Humano. En febrero de 2001, este proyecto publicó sus resultados hasta la fecha, presentando una secuencia completa de aproximadamente el 90 por ciento de los tres mil millones de pares de bases en el genoma humano, lo que permitió estimar el número de genes humanos en alrededor de 33.000 (International Human Genome Sequencing 2001; Venter *et al.* 2001). Este número es mayor que el que se había determinado previamente para una planta común que suele crecer en las cunetas de las carreteras, arábidopsis, o para la mosca de la fruta, lo que resultaba reconfortante.

Sin embargo, la sorpresa surgió cuando se completó el genoma de la planta de arroz y se descubrió que su número de genes era aproximadamente el doble que el del genoma humano (Yu *et al.*, 2005). Ante esta evidencia, los científicos se enfrentaban a dos alternativas: (a) admitir que la planta de arroz era un organismo más complejo que el *Homo sapiens*, o (b) revisar la teoría aceptada hasta ese momento. Se optó por lo segundo: no se necesitaban más proteínas, y por lo tanto más genes, para alcanzar una mayor complejidad. De hecho, lo que marca la diferencia es la capacidad de un organismo para modificar sus proteínas y que puedan así ejercer diferentes funciones. Y en más del 50% de los casos, estas modificaciones implican la incorporación de carbohidratos para formar glicoproteínas (Fig. 7).

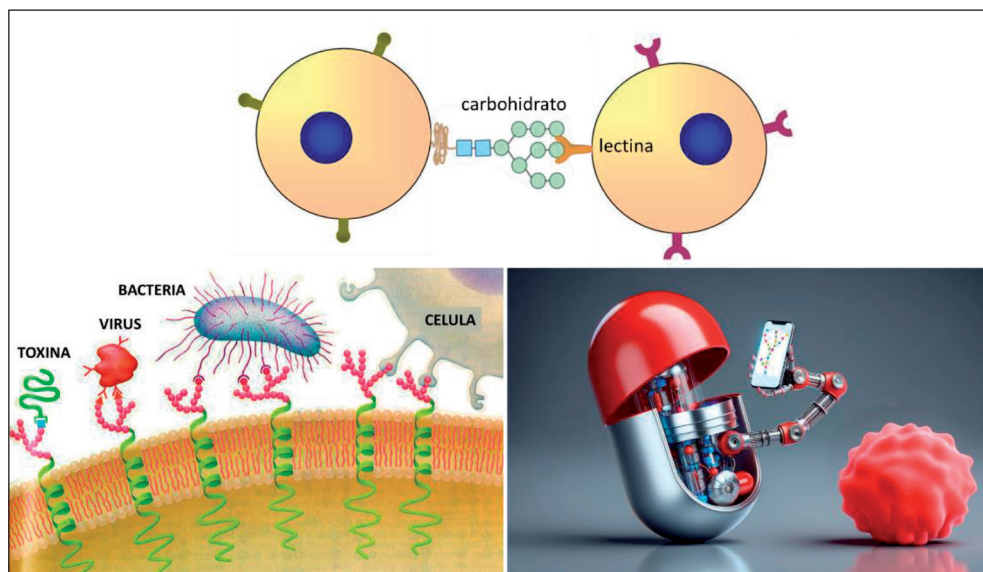
FIGURA 7
COMPARATIVA DEL NÚMERO DE GENES DEL *HOMO SAPIENS* Y DE OTROS ORGANISMOS



Por lo tanto, no es el genoma ni el proteoma lo que hace que los humanos sean más complejos o más inteligentes que otros organismos, sino la capacidad de nuestras células para almacenar y transmitir información utilizando el conjunto de carbohidratos que nos caracteriza, conocido como el glicoma. La toma de conciencia de la función fundamental de los azúcares en la biología celular ha dado lugar a un nuevo campo especializado de la ciencia, que integra disciplinas que van desde la química y la física hasta la biología y la medicina, al que nos referimos con el término “glicociencias”.

Supongamos que deseamos prevenir o tratar una infección vírica respiratoria. A la vista de lo comentado, si queremos desarrollar un fármaco que se dirija de manera certera al lugar de la infección, es imperativo comprender el código de carbohidratos que permite al virus infectar las células pulmonares y descifrar esta información para poder integrarla en el diseño del propio fármaco. Necesitamos que los medicamentos hablen el lenguaje de las células. Un medicamento basado en la estructura de los carbohidratos naturales es lo que denominamos un glicofármaco. Entre los más populares se encuentran los oligosacáridos relacionados con la heparina, utilizados como agentes antitrombóticos. Una estrategia alternativa consistiría en combinar un principio activo con un carbohidrato que actúe como motivo de reconocimiento para un receptor celular específico, una “lectina”, término que, como “electo” procede del latín “lectus”, que significa “escogido” o “seleccionado”. De esta manera, transportaríamos este principio activo al lugar donde se requiere (Fig. 8).

FIGURA 8
REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA INTERACCIÓN CARBOHIDRATO-LECTINA, SU IMPORTANCIA EN MÚLTIPLES EVENTOS CELULARES Y ALEGORÍA DEL CONCEPTO DE “GLICOMEDICAMENTO”



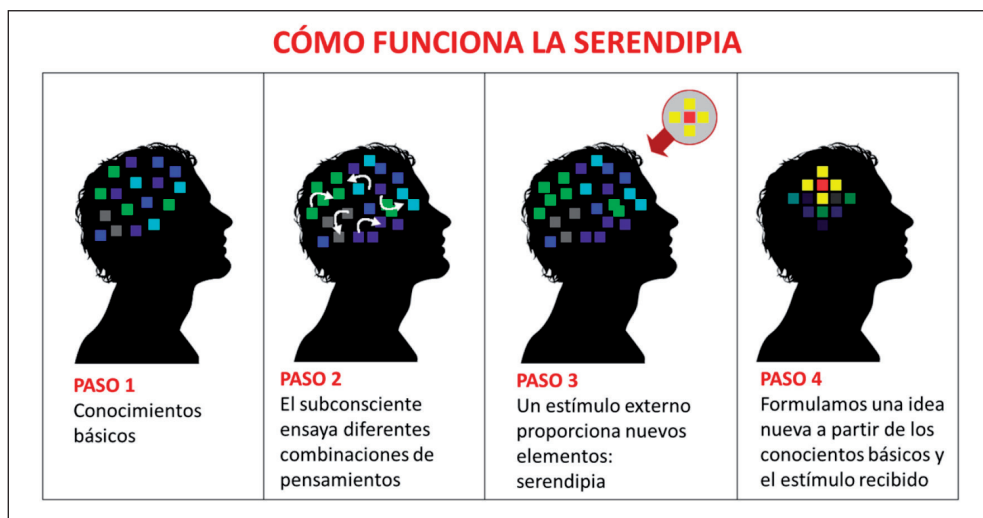
En conclusión, la integración de los azúcares en el diseño de medicamentos representa una revolución en la farmacología moderna. Comprender y utilizar el glicoma nos permitirá desarrollar terapias más específicas y con menos efectos secundarios, llevando la medicina a un nuevo nivel de precisión y eficacia.

4. GLICOFÁRMACOS: ATACANDO LAS ENFERMEDADES RARAS

Ambas aproximaciones, el diseño de glicofármacos y el diseño de glicotransportadores, tienen un enorme potencial en medicina y han sido pilares importantes de mi carrera investigadora. Las patologías específicas a las que hemos dirigido nuestros esfuerzos han estado determinadas por las colaboraciones que hemos establecido con colegas en la academia y la industria. Quiero hacer un inciso aquí: estar abiertos a colaborar y ser proactivos en establecer colaboraciones con todos los sectores es fundamental, tanto en investigación básica como aplicada. La oportunidad de realizar avances significativos se multiplica si abordamos los problemas desde diversas disciplinas.

A los investigadores se nos suponen los conocimientos en nuestro campo y la capacidad de combinarlos, esa es la base. Pero las colaboraciones aportan estímulos muy poderosos para que surjan ideas y se abran caminos que no habíamos anticipado. El azar puro no existe en investigación, no es una lotería. La serendipia, esas ideas que surgen de un comentario o de una conversación con alguien que no es de tu campo, son las que hacen la diferencia (The Horizons Tracker 2015; Fig. 9).

FIGURA 9
ETAPAS DEL PROCESO QUE CONDUCE A NUEVAS IDEAS POR SERENDIPIA

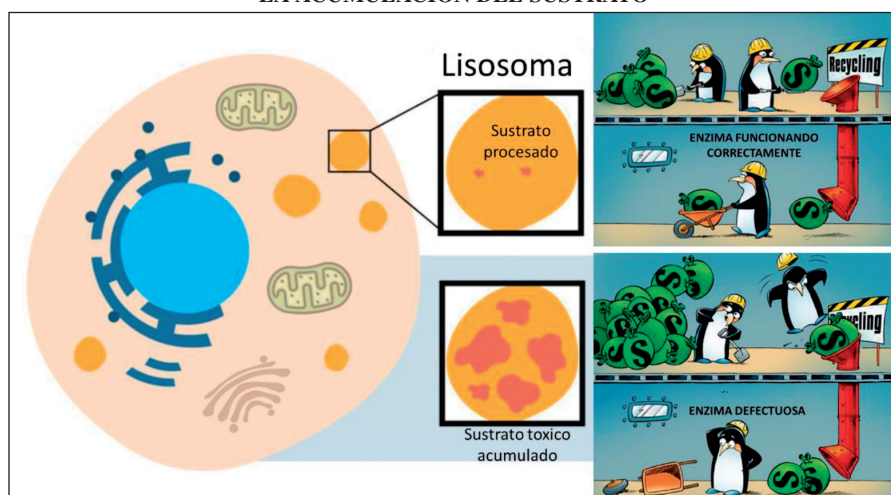


En lo relativo a la concepción de nuevos glicofármacos, por serendipia y gracias al apoyo generoso de la Fundación Ramón Areces, a principios del nuevo milenio nos vimos inmersos en un proyecto que buscaba explorar terapias para el tratamiento de enfermedades raras. Estas son afecciones poco frecuentes que padece una pequeña fracción de la población y, lamentablemente, los recursos dedicados a la investigación de sus causas y posibles terapias son escasos. Como expresó el Doctor en Farmacia y ex-Ministro de Educación y Ciencia, Federico Mayor Zaragoza: “Todos los seres humanos somos iguales en dignidad y debemos protegernos de la misma manera. Para una persona que convive con una determinada patología, su enfermedad es su día a día, no algo excepcional ni raro, y eso es lo que verdaderamente importa”.

En el año 2003 (Matsuda *et al.* 2003) nos topamos con una publicación que presentaba una estrategia innovadora para el tratamiento de una familia particular de enfermedades raras: las enfermedades de depósito lisosomal. En ese momento, no disponíamos de financiación específica para este tema, pero nos impresionó profundamente la realidad de estos pacientes. Aprendimos que los carbohidratos desempeñaban un papel decisivo en la progresión de sus patologías y descubrimos que también podían ser parte de la solución. Simplemente, no podíamos dejar pasar la oportunidad de contribuir a este campo.

Las enfermedades de depósito lisosomal se originan por la mutación de un gen que causa defectos en una enzima crucial para el metabolismo de carbohidratos en los lisosomas, los orgánulos encargados del reciclaje de las biomoléculas. Como consecuencia, la cadena de procesamiento se detiene y el último componente se acumula de manera exagerada en las células, provocando toxicidad (Fig. 10).

FIGURA 10
COMPARATIVA DEL ESTADO DEL LISOSOMA EN CÉLULAS DE UN INDIVIDUO SANO Y DE UN PACIENTE DE ENFERMEDAD DE ALMACENAMIENTO LISOSOMAL, E ILUSTRACIÓN ANIMADA DEL DEFECTO ENZIMÁTICO QUE CONDUCE A LA ACUMULACIÓN DEL SUSTRATO

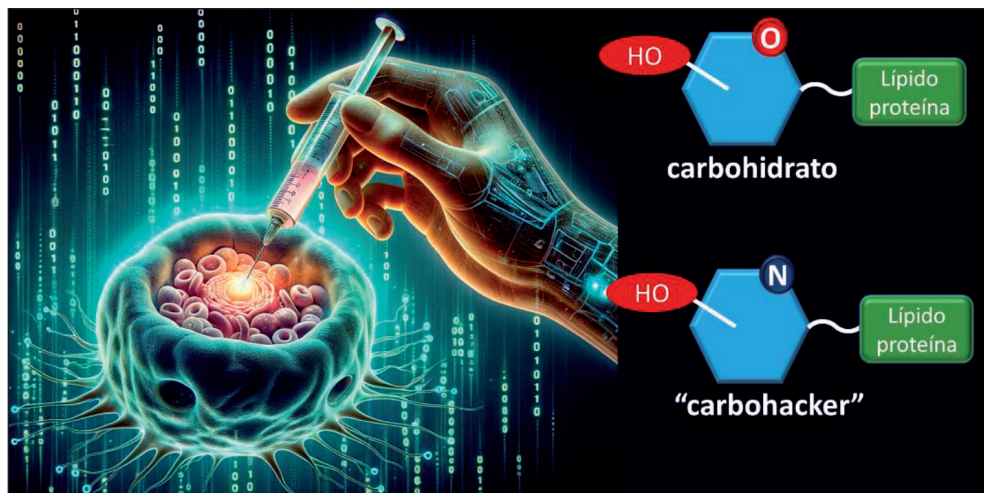


Son situaciones dramáticas, donde el paciente es generalmente asintomático los dos primeros años de vida. Luego, la enfermedad debuta y comienza un deterioro físico y neurológico que puede ser más o menos rápido. Irónicamente, la mutación no inhabilita la enzima; podría funcionar, pero el propio paciente la destruye. El problema es que no se pliega correctamente, y esto hace que no pase el control de calidad del organismo. El artículo que descubrimos proponía rescatar esta enzima, utilizando una molécula que imite al carbohidrato que procesaría en una persona sana. La proteína se plegaría correctamente alrededor de la molécula, y esta la acompañaría de manera segura hasta el lugar donde se acumula el sustrato sacarídico, restaurando así su actividad. Este mecanismo se conoce como “terapia de chaperona farmacológica” (Platt 2018).

Sin entrar en detalles de la química, la estrategia general consistía en diseñar compuestos que la célula pudiese confundir con sus propios carbohidratos, permitiéndonos así interferir en sus comunicaciones y hackear o incluso reprogramar su disco duro. En colaboración con el investigador japonés que lideraba estos trabajos, un neurólogo infantil y una persona excepcional, descubrimos que sustituyendo un elemento clave en la estructura de los azúcares, un átomo de oxígeno por un átomo de nitrógeno en una localización precisa, podíamos efectivamente conseguir este objetivo de manera casi quirúrgica (Fig. 11).

Fue especialmente emocionante comprobar que algunos de los compuestos eran capaces de revertir el daño en el sistema nervioso central en ratones humanizados, no solo desde el punto de vista histológico, en un corte cerebral, sino también en términos neurológicos. El ratón tratado recuperaba habilidades motoras y se atenuaban todos los síntomas de la enfermedad (Takai 2013).

FIGURA 11
ILUSTRACIÓN DE LA ESTRATEGIA SEGUIDA PARA DISEÑAR ANÁLOGOS DE CARBOHIDRATOS CAPACES DE INTERFERIR EN LOS PROCESOS CELULARES EN LOS QUE ESTOS INTERVIENEN



A partir de ahí el sentido de nuestro trabajo en el laboratorio cambió radicalmente. Las familias con niños que padecen estas enfermedades, los propios niños y las asociaciones de enfermos son realmente héroes. Es inevitable emocionarse al recordar los encuentros. No fue fácil enfrentarse a esas historias, y sigue sin serlo, pero es imposible no comprometerse con estas personas. Casi diez años después, en 2022, la empresa estadounidense Amicus Therapeutics, que tiene en el mercado el único medicamento actualmente aprobado basado en el mecanismo de chaperona farmacológica, el Galafold®, nos contactó. Pusimos entonces en marcha un programa para expandir esta terapia a una cohorte más amplia de afectados. Quizás algunos recuerden la película “Medidas extraordinarias”, protagonizada en 2010 por Harrison Ford y Brendan Fraser. El guion está basado en la historia real del fundador de Amicus Therapeutics, cuyos dos hijos, Megan y Patrick, padecían una de estas enfermedades de depósito lisosomal, la enfermedad de Pompe. La esperanza de vida era entonces de 5 años; ambos han llegado a la edad adulta. En nuestro caso, la enfermedad en la que se centra el proyecto que desarrollamos con ellos es la enfermedad de Fabry, de la que se estima que hay entre 8.000 y 10.000 afectados en el mundo, aproximadamente 500 diagnosticados en España. Es difícil, pero vale la pena intentarlo (Riccio 2020; Fig. 12).

FIGURA 12
ILUSTRACIÓN DE UNA CHAPERONA FARMACOLÓGICA RESCATANDO LA ENZIMA DE UN PACIENTE DE ENFERMEDAD DE FABRY ELABORADA POR LA EMPRESA AMICUS THERAPEUTICS Y CARTEL DE LA PELÍCULA “MEDIDAS EXTRAORDINARIAS” QUE NARRA LA HISTORIA DEL FUNDADOR DE LA COMPAÑÍA

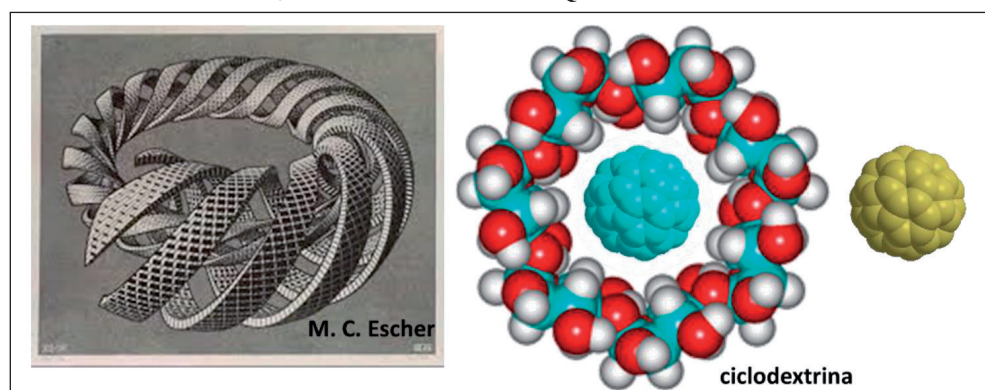


5. GLICOTRANSPORTADORES: DONDE Y CUANDO SE NECESITA

Consideremos ahora una situación mucho más común en el desarrollo de fármacos: disponemos de un medicamento que, en teoría, es efectivo para lograr el efecto deseado, como la eliminación de células tumorales, pero su aplicación en la práctica clínica se ve obstaculizada por problemas de compatibilidad con el entorno biológico. La idea de envolverlo en un revestimiento que proporcione biocompatibilidad y que, además, pueda interactuar con las células, utilizando carbohidratos, es sin duda atractiva. El reto radica en transformar el comportamiento caótico de un azúcar (recordemos la paradoja de la multiplicidad de la glucosa en agua) en una estructura ordenada capaz de cumplir esta función.

En general, los químicos especializados en carbohidratos compartimos el sentimiento expresado por el artista holandés Maurits Cornelis Escher: “Sentimos una atracción irresistible por el caos porque nos encanta producir orden”. Una molécula de glucosa por sí sola es caótica y difícil de controlar. Sin embargo, al conectar de manera precisa 6, 7 u 8 de estas moléculas y cerrar el círculo uniendo la primera con la última, creamos una estructura ordenada conocida como ciclodextrina. Esto automáticamente divide el espacio en dos: el interior de la cavidad que forma la estructura de caja y el exterior. Donde antes reinaba el caos, ahora hemos generado orden. Un fármaco que se encuentre cercano en el espacio puede ahora protegerse alojándose en la cavidad, aprovechando así la biocompatibilidad de los azúcares para desplazarse en el organismo y llegar al sitio de acción (Fig. 13).

FIGURA 13
OBRA DEL ARTISTA HOLANDÉS MAURITS CORNELIS ESCHER Y REPRESENTACIÓN DE UNA MOLÉCULA DE CICLODEXTRINA, MOSTRANDO COMO UN POSIBLE FÁRMACO PUEDE ALOJARSE EN SU CAVIDAD O QUEDAR EN EL EXTERIOR

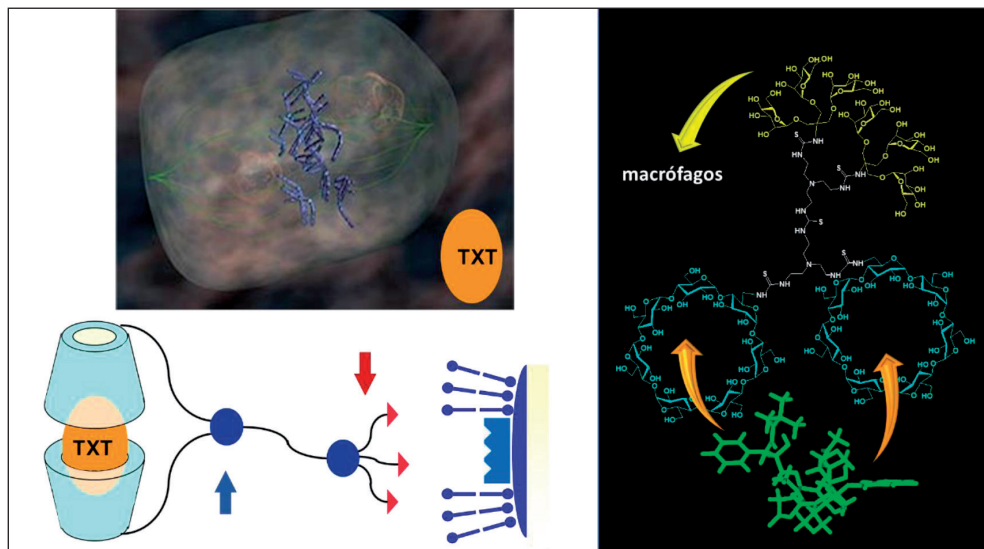


Permítanme compartir un ejemplo concreto: el diseño de un transportador para un medicamento utilizado en quimioterapia contra el cáncer, que permite dirigirlo específicamente a las células del sistema inmunitario. El medicamento en cuestión es un

derivado de una molécula que se descubrió en un árbol, el tejo, y que se comercializa con el nombre de Taxotero®. El Taxotero® inhibe la división celular y, por ende, el crecimiento tumoral. Sin embargo, su solubilidad en agua es mínima, y afecta también a tejidos sanos, con efectos secundarios graves.

El enfoque consistió en crear un caparazón personalizado utilizando dos unidades de ciclodextrinas, que además incorporan una antena para comunicarse directamente con las células del sistema inmunitario. Para lograr esto, en la parte terminal de la antena se incorporaron varias copias de un carbohidrato, la manosa, que es complementario de receptores presentes en la membrana celular de macrófagos, leucocitos, monocitos y otras células responsables de protegernos frente a agresiones externas o internas. Como resultado de estos trabajos, la solubilidad del fármaco aumentó en más de 10.000 veces, mientras se evitaba que otras células se vieran negativamente afectadas (Benito *et al.* 2004; Fig. 14). Es importante destacar que estas investigaciones también surgieron de una colaboración industrial, específicamente con la farmacéutica Rhône Poulenc.

FIGURA 14
IMAGEN DE UNA CÉLULA CUYA DIVISIÓN QUEDA INHIBIDA POR EL FÁRMACO TAXOTERO® (TXT), ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA ESTRATEGIA DISEÑADA PARA ELABORAR UN GLICOTRANSPORTADOR DEL MISMO A CÉLULAS DEL SISTEMA INMUNE Y FÓRMULA DESARROLLADA DE LA MOLÉCULA SINTETIZADA

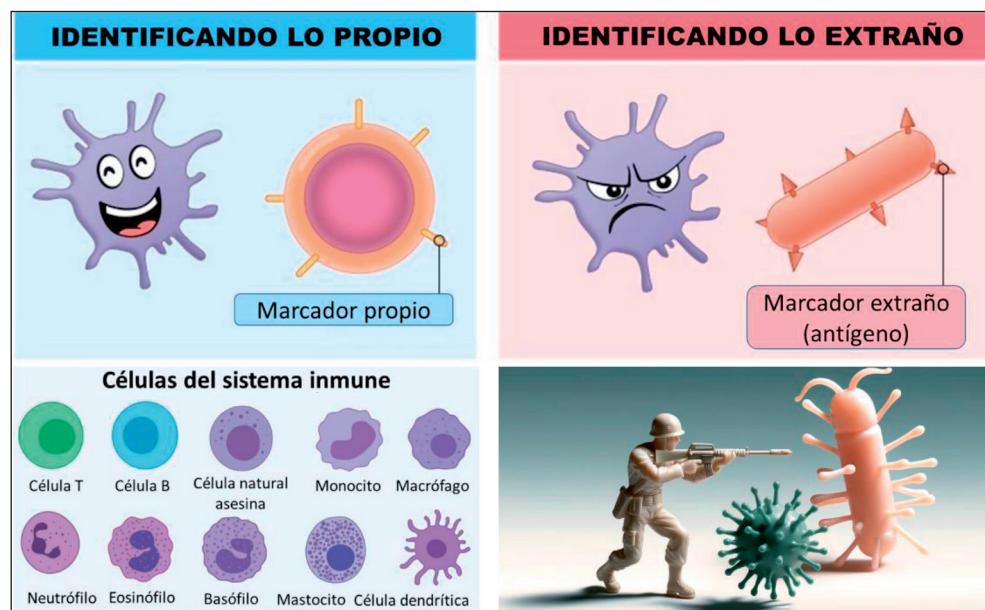


6. LOS CARBOHIDRATOS Y EL SISTEMA INMUNE: “SELF OR NON-SELF”, ESA ES LA CUESTIÓN

Asumido el papel de los azúcares como las biomoléculas depositarias de la información que diferencia las células de un organismo vivo de las de otro, resulta inmediato

entender que desempeñan una función central en la respuesta inmunitaria. Cuando una célula se encuentra con otra, interpreta el código cifrado en los carbohidratos de esta última para determinar si es una aliada, una célula propia (“self”) o extraña, una célula invasora (“non- self”) y, en este segundo caso, desencadena mecanismos de protección. Contamos con un ejército de células especializadas equipadas con una variedad de receptores para interceptar las señales del enemigo y activar nuestras defensas, una función vital para la supervivencia (Fig. 15).

FIGURA 15
ILUSTRACIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL RECONOCIMIENTO DE LO “PROPIO” Y DE LO “EXTRAÑO” Y DEL PAPEL DEL SISTEMA INMUNE PARA NUESTRA SUPERVIVENCIA



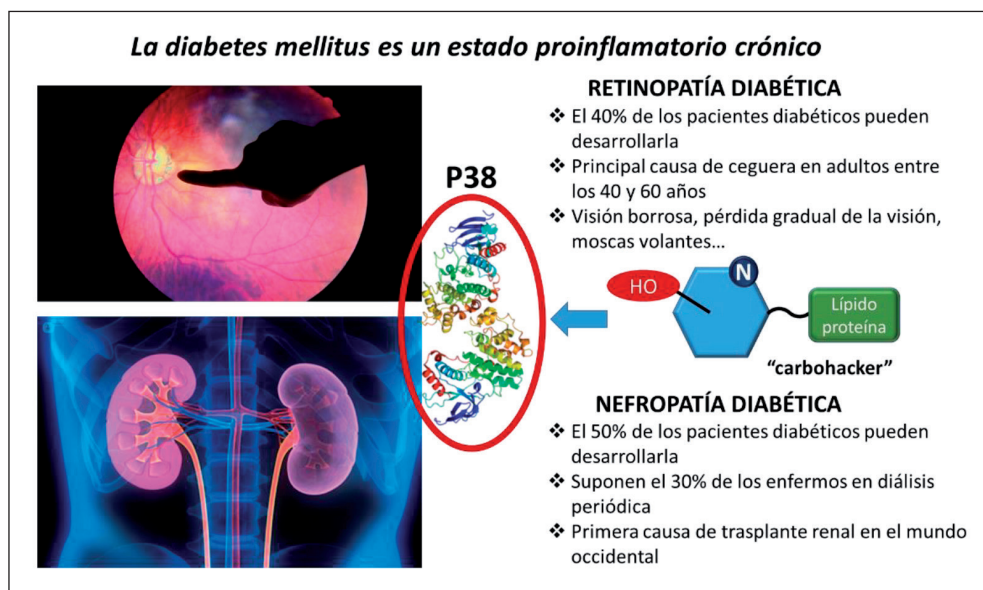
Desafortunadamente, a veces los procesos que se ponen en marcha durante la respuesta inmune se desregulan, y los mecanismos destinados a protegernos se vuelven contra nosotros. Esto ocurre, por ejemplo, en las enfermedades autoinmunes, en las alergias o en los procesos inflamatorios agudos. También puede ocurrir que la célula o el organismo enemigo sea capaz de evadir o anular nuestras defensas, o que simplemente no podamos responder a la amenaza con la suficiente rapidez y eficacia. Es el caso del cáncer y de muchos procesos infecciosos que se cobran la vida de millones de personas. No es extraño que la investigación en terapias que permitan regular el sistema inmune, la inmunoterapia, concentre un esfuerzo considerable a nivel global.

Dado que muchos de los receptores que conforman nuestro sistema inmune innato se activan en respuesta a la presencia de carbohidratos que no son reconocidos como propios, una estrategia interesante para el diseño de inmunomoduladores consiste en

el desarrollo de análogos capaces de actuar sobre estos mismos receptores e interferir en la transmisión de la comunicación. Esto puede dar lugar a dos escenarios: la inhibición de la ruta de respuesta correspondiente, lo que resultaría en un inmunosupresor o antiinflamatorio, o la activación de la misma, lo que se traduciría en un compuesto inmunoestimulante.

Por ejemplo, en colaboración con investigadores del Hospital Puerta del Mar en Cádiz, hemos optimizado compuestos que promueven la resolución de la inflamación asociada a la diabetes en órganos como el ojo o el riñón, actuando sobre un regulador maestro del proceso inflamatorio conocido como proteína P38. Este enfoque nos permite investigar las posibilidades de nuevos glicofármacos para el tratamiento de la retinopatía y la nefropatía diabéticas. No se trata en estos casos de enfermedades raras ni mucho menos: constituyen las causas más prevalentes de ceguera y de trasplante de riñón en adultos, y su prevalencia alcanza entre el 30 y el 50% de todas las personas que sufren diabetes (Fig. 16).

FIGURA 16
DATOS RELEVANTES SOBRE LA RETINOPATÍA Y LA NEFROPATÍA DIABÉTICAS Y
ESTRATEGIA PARA SU TRATAMIENTO MEDIANTE EL USO DE ANÁLOGOS DE
CARBOHIDRATOS INMUNOSUPRESORES



Recientemente, en colaboración con inmunólogos de la Academia Sinica de Taiwán, hemos ampliado nuestros trabajos sobre el control de la inflamación para abordar el desarrollo de glicofármacos destinados al tratamiento del asma. El asma puede tener múltiples causas, que van desde la contaminación hasta el estrés, todas las cuales provocan una hiperreactividad de las vías respiratorias. Si bien la mayoría de los casos de

crisis asmáticas responden razonablemente bien a los tratamientos clásicos con antiinflamatorios, como los corticoesteroides, aproximadamente un 15% de los pacientes no obtienen un beneficio satisfactorio. En estos casos, las crisis asmáticas están asociadas a una componente inmune, por ejemplo, pueden ser desencadenadas por infecciones respiratorias. Se observa entonces la activación específica de un tipo de células inmunitarias llamadas células T asesinas naturales, lo que resulta en un desequilibrio en nuestro sistema inmunitario que agrava significativamente los síntomas del asma (Hammad & Lambrecht 2021). Este desequilibrio puede abordarse activando rutas de señalización que contrarresten la acción de estas células o inhibiéndolas directamente. En el laboratorio, hemos podido diseñar glicofármacos específicos para los receptores clave que controlan ambos tipos de procesos. Estos compuestos se han ensayado en ratones transgénicos que desarrollan asma y hemos podido proporcionar una prueba de concepto que abre nuevas posibilidades de tratamiento para estos pacientes (González-Cuesta et al 2023; Fig. 17).

FIGURA 17
ASMA AUTOINMUNE, IMPLICACIÓN DE LAS CÉLULAS T ASESINAS NATURALES Y NECESIDAD DE DESARROLLAR INMUNOTERAPIAS ESPECÍFICAS QUE COMPLEMENTEN LOS TRATAMIENTOS ANTIINFLAMATORIOS ACTUALES CON CORTICOESTEROIDES

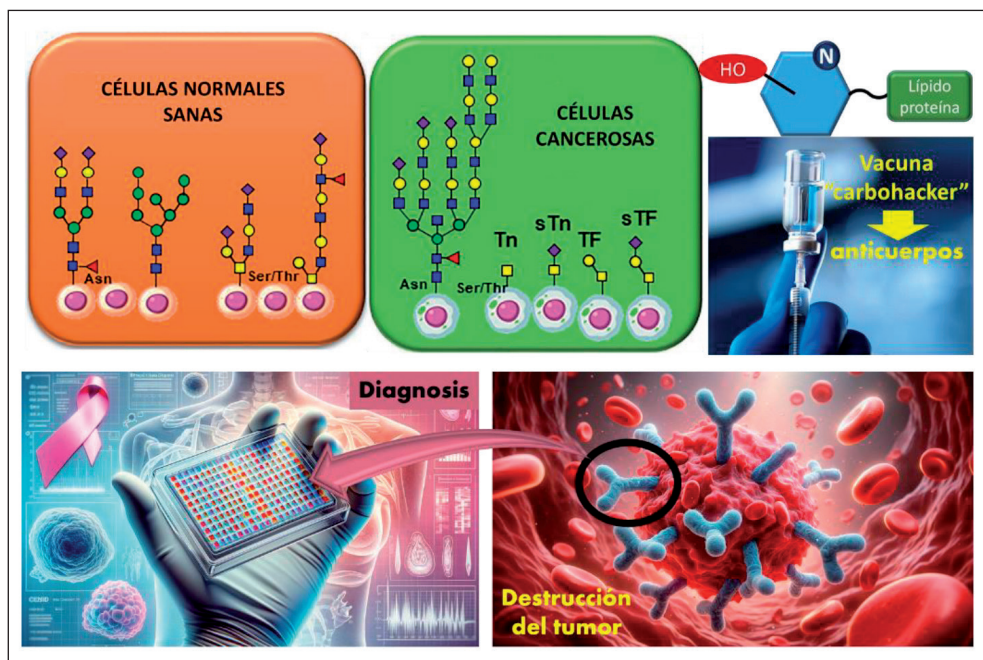


Los compuestos que estimulan el sistema inmune, por su parte, tienen dos grandes campos de aplicación: la inmunoterapia del cáncer y el desarrollo de vacunas contra enfermedades infecciosas. Como comenté al principio de mi exposición, el código de carbohidratos de una célula depende no sólo de la especie (humano o arroz) o de su localización (pulmón o hígado, por ejemplo), sino también de su estado. Cuando una célula se vuelve tumoral, sus carbohidratos son diferentes, y nuestro sistema inmune puede potencialmente identificarlas como dañinas y destruirlas. Esto no sucede de manera general porque la célula tumoral es capaz de neutralizar la respuesta inmune o de evadirla. Lo consiguen, por ejemplo, presentando carbohidratos que, aunque diferentes

de los de las células sanas, producen niveles bajos de anticuerpos, insuficientes para que la respuesta sea eficaz y podamos eliminar el tumor. Si conseguimos desarrollar análogos de los carbohidratos presentes en tumores que se comporten como antígenos eficaces, es decir, que sí promuevan la producción masiva de anticuerpos y generen memoria, tendríamos una vacuna contra el cáncer.

En el año 2019 nos embarcamos, junto con otros grupos en centros de investigación en España, Japón y Reino Unido, en un proyecto que se proponía explorar una hipótesis nueva en este sentido. La idea central consiste en diseñar análogos de los carbohidratos que caracterizan un tumor, de manera que sean lo suficientemente diferentes como para despertar nuestro sistema inmune y provocar una respuesta potente, y lo suficientemente parecidos como para que los anticuerpos que se produzcan con el análogo no natural ataquen también al carbohidrato diana natural en la célula tumoral. No estamos cerca de curar el cáncer, ni mucho menos, pero la hipótesis de la vacuna funciona, al menos en cáncer de mama en el modelo de ratón (Bermejo *et al.* 2020; Figura 18).

FIGURA 18
COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE OLIGOSACÁRIDOS EN CÉLULAS SANAS Y CÉLULAS TUMORALES MOSTRANDO QUE SON REALMENTE MUY DIFERENTES, USO DE ANÁLOGOS PARA FORMULAR VACUNAS QUE GENEREN ANTICUERPOS CAPACES DE RECONOCER LOS OLIGOSACÁRIDOS ASOCIADOS AL CÁNCER EN TUMORES Y DESTRUIRLOS, Y FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS QUE USAN ESTOS ANTICUERPOS PARA DIAGNOSTICAR CÁNCER DE MAMA EN ESTADIO TEMPRANO



Una derivada de estas investigaciones es que el componente diseñado para estimular el sistema inmune contra las células tumorales también es capaz de reconocer los anticuerpos de baja intensidad que producen los enfermos de cáncer. Estos autoanticuerpos se generan en fases muy tempranas del desarrollo tumoral, por lo que su detección permite un diagnóstico precoz que aumenta la eficacia de los tratamientos y mejora considerablemente el pronóstico. En este caso, la validación del método se realizó utilizando suero sanguíneo de pacientes con cáncer de mama en diferentes estadios y controles de pacientes sanos, confirmando su utilidad para el diagnóstico incluso en la fase I del tumor, cuando todavía no ha dado la cara, con un alto grado de confianza (Guillén-Poza *et al.* 2020).

7. COVID-19 Y ARN MENSAJERO: APRENDIENDO DE LOS VIRUS

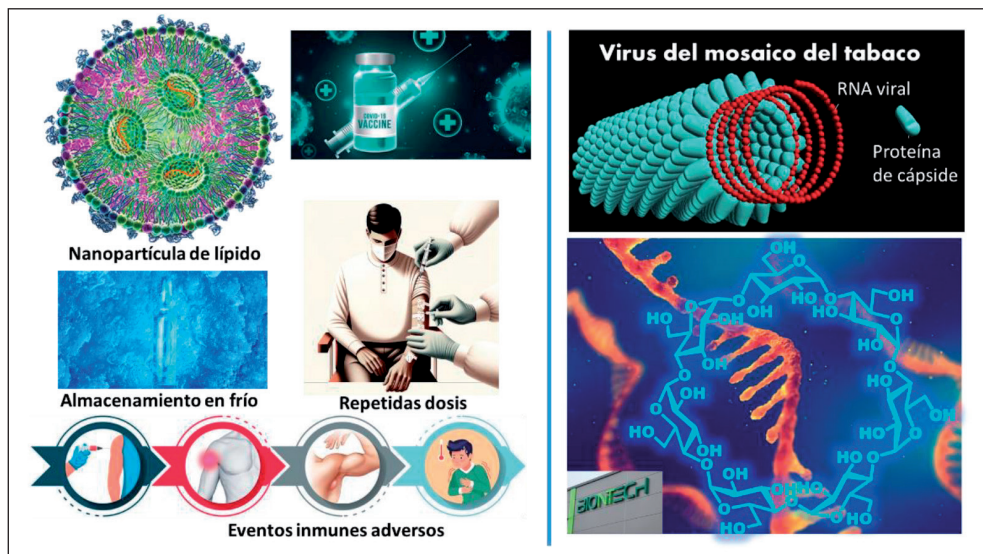
En el año 2020, el tsunami que representó la pandemia de COVID-19 nos cogió a todos por sorpresa. Es asombroso cómo el mundo parece haber olvidado rápidamente esta amenaza y sus cifras aterradoras de muertes. Sin embargo, en la parte positiva, aprendimos que la tecnología de vacunas basadas en ácido ribonucleico mensajero (ARNm) salva vidas y ha llegado para quedarse.

En ese momento, nosotros estábamos inmersos en nuestras investigaciones sobre comunicación celular, transporte de medicamentos y regulación del sistema inmune, un cóctel de conocimientos básicos fundamental para la formulación de vacunas. No fue por casualidad que los desarrolladores de la vacuna de Pfizer-BioNTech se pusieran en contacto con nosotros: el transporte del ARNm, su direccionalización a células del sistema inmune y el control de la inmunización son cuestiones claves en las que, gracias a nuestra experiencia, podíamos aportar.

El ARNm es una biomolécula muy frágil. Nuestras células están diseñadas para defenderse de un ácido nucleico extraño, no para aceptarlo como un medicamento. Requiere una cubierta protectora biocompatible para poder administrarse. En las vacunas actuales, esto se consigue con una mezcla de componentes que se organizan alrededor del ARNm, encapsulándolo en una estructura llamada nanopartícula de lípidos. El éxito de estas formulaciones para protegernos del COVID ha sido innegable, y por ello estamos aquí sin mascarillas. Sin embargo, presentan limitaciones que dificultan su desarrollo de manera universal: problemas de estabilidad que requieren su transporte a temperaturas muy bajas, problemas de eficacia que implican la necesidad de repetir la inmunización y problemas de efectos secundarios en algunos pacientes debido a una reacción inmune exagerada, que es el motivo por el que nos hacían esperar unos minutos antes de marchar del centro de vacunación (Lee *et al* 2023; Figura 19).

Nosotros ya nos habíamos interesado anteriormente en el desarrollo de sistemas de transporte de ácidos nucleicos utilizando azúcares, con una aproximación completamente diferente a la de las nanopartículas de lípidos. La fuente de inspiración de nuestro trabajo son los propios virus, los auténticos profesionales en este tema. Los virus consiguen resguardar su ARN e introducirlo en las células objetivo envolviéndolo con una

FIGURA 19
REPRESENTACIÓN DE UNA NANOPARTÍCULA DE LÍPIDO COMO LAS USADAS EN LAS VACUNAS DE MODERNA O PFIZER-BIONTECH CONTRA LA COVID-19 Y DE SUS LIMITACIONES ACTUALES (IZQUIERDA) E ILUSTRACIÓN DE LA ESTRATEGIA BASADA EN EL USO DE CARBOHIDRATOS, INSPIRADA EN LA ESTRUCTURA DE LOS VIRUS NATURALES, PARA FORMULAR VACUNAS QUE SUPEREN ESTAS LIMITACIONES



cápside formada, en la mayoría de los casos, por un único componente proteico. Una sola clase de biomolécula, bien definida, que contiene toda la información necesaria para constituir partículas virales con capacidad de infección. El uso de poliformulaciones, como en las nanopartículas de lípidos, dificulta el control y la optimización para una aplicación concreta. En cambio, la capacidad intrínseca de los carbohidratos para codificar información, junto con estrategias de química de precisión, permite elaborar sistemas monomoleculares, perfectamente definidos, que pueden programarse para desempeñar las funciones que se necesitan. Por ejemplo, al mismo tiempo que condensan y garantizan la estabilidad del ácido nucleico, pueden dirigirse a los nódulos linfáticos u otros órganos de interés y estimular o atenuar la respuesta inmune según se requiera (Carbajo-Gordillo 2021; Ortega-Caballero 2024; Fig. 19).

Desde el año 2020, estas investigaciones las llevamos a cabo en el contexto de un acuerdo de colaboración con la empresa BioNTech en Mainz, Alemania, y hasta la fecha han conducido a 22 patentes de invención, todas ellas ya licenciadas o con opción de licencia. La actividad ha sido realmente frenética en este tiempo. Es un campo tremendamente competitivo. Imposible saber si será esta tecnología la que finalmente prevalezca, pero una cosa es segura: los fármacos basados en ácidos nucleicos han llegado para quedarse y van a jugar un papel central en la medicina a medio plazo y en las próximas pandemias, que inevitablemente vendrán.

8. EPÍLOGO

Señores académicos, queridos amigos, familiares y colegas:

Honestamente, creo que he sido muy afortunado tanto en mi vida personal como en mi vida profesional. Hoy, me encuentro rodeado de todos ustedes, recibiendo un honor que nunca imaginé. Y el futuro no podría ser más ilusionante.

En este punto, supongo que tengo que asumir la responsabilidad de transmitir algunas recomendaciones a aquellos que están comenzando su carrera científica. Aunque no estoy seguro de ser la persona más adecuada para orientar, considerando mis propias limitaciones, me gustaría compartir algunas reflexiones.

En primer lugar, animo a todos a confiar en su instinto. Es natural cuestionarse qué rumbo tomar, especialmente frente a las incertidumbres de una carrera investigadora. Sin embargo, mantenerse fiel a esa brújula interna y persistir ante los desafíos es la manera de encontrar el camino correcto.

En segundo lugar, dejen que la curiosidad sea la fuerza impulsora de su investigación. Busquen respuestas a las preguntas que les inquietan, no teman explorar territorios desconocidos y disfruten de las sorpresas que encuentren en el camino. El peligro, claro está, es la dispersión: hay demasiados desafíos atractivos. Afortunadamente, siempre he tenido a alguien a mi lado que me ha recordado la importancia de mantener el enfoque. No estaría aquí hoy de no ser por ella. Un toque de carácter práctico siempre es necesario.

Mi tercera y última recomendación es esforzarse por crear un entorno de trabajo cooperativo. He visto demasiados casos de rivalidad y competencia insana entre investigadores. Pasamos gran parte de nuestra vida en el laboratorio, y es fácil que estas cuestiones traspasen lo profesional y afecten lo personal. No vale la pena. Se pierde mucho tiempo y energía. Cultivar la empatía y el espíritu constructivo no solo genera un ambiente más saludable, sino que también abre puertas al desarrollo profesional y a nuevas conexiones personales. Instinto, curiosidad y colaboración; con estos principios, creo que se puede tener un impacto significativo en cualquier campo del conocimiento (Fig. 19).

Para concluir, quisiera responder a una pregunta que me hicieron recientemente en una entrevista sobre mi trayectoria vital y profesional: “Si pudiese organizar una cena con tres personajes históricos que identifique con valores o aspectos asociados a la investigación, ¿a quién invitaría?”

Me encantaría compartir esa cena con Julio Verne, Leonardo da Vinci y Marie Curie. Pienso que representan las tres cualidades más importantes para disfrutar y sobrevivir en nuestro mundo: imaginación, curiosidad y perseverancia para superar la frustración. Los tres descansan en Francia, así que tendría que ser en un restaurante francés. Puedo soportarlo; confío en que Carmen se apuntará. Además, esto me permitirá rendir tributo a la tradición científica francesa, a la que tanto debo (Fig. 20).

Gracias a todos por estar aquí y por vuestro continuo apoyo.

FIGURA 20
CONSIDERACIONES SOBRE LOS PRINCIPIOS QUE DEBEN GUIAR LA ACTIVIDAD
INVESTIGADORA



FIGURA 20
FOTO FICTICIA QUE MUESTRA A LEONARDO DA VINCI (IZQUIERDA), JULIO VERNE (EN EL CENTRO) Y MARIE SKŁODOWSKA-CURIE (DERECHA) COMPARTIENDO CENA
EN UN RESTAURANTE FRANCÉS



9. BIBLIOGRAFÍA

- ALCALDE-Estévez, E.; Arroba, A.I.; Sánchez-Fernández, E.-M.; Ortiz Mellet, C.; García Fernández, J.M. *et al.* The sp^2 -iminosugar glycolipid 1-dodecylsulfonyl-5*N*,6*O*- oxomethylidenenojirimycin (DSO₂-ONJ) as selective anti-inflammatory agent by modulation of hemoxygenase-1 in Bv.2 microglial cells and retinal explants. *Food Chem. Toxicol.*, **2018**, *111*, 454-466.
- BENITO, J.M.; GÓMEZ-GARCÍA, M.; ORTIZ MELLET, C.; BAUSSANNE, I.; DEFAYE, J.; GARCÍA FERNÁNDEZ, J.M. Optimizing saccharide-directed molecular delivery to biological receptors: design, synthesis, and biological evaluation of glycodendrimer–cyclodextrin conjugates. *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 10355-10363.
- BERMEJO, I.A.; NAVO, C.D.; CASTRO-LÓPEZ, J.; GUERREIRO, A.; JIMÉNEZ-MORENO, E. *et al.* Synthesis, conformational analysis and *in vivo* assays of an anti-cancer vaccine that features an unnatural antigen based on an sp^2 -iminosugar fragment. *Chem. Sci.* **2020**, *11*, 3996-4006.
- CARBAJO-GORDILLO, A.I.; GONZÁLEZ-CUESTA, M.; JIMÉNEZ BLANCO, J.L.; BENITO, J.M.; SANTANA-ARMAS, M.L. *et al.* Trifaceted Mickey Mouse amphiphiles for programmable self-assembly, DNA complexation and organ-selective gene delivery. *Chem. Eur. J.* **2021**, *27*, 9429-9438.
- GÓMEZ-JARAMILLO, L.; CANO-CANO, F.; SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, E.M.; ORTIZ MELLET, C.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, J.M. *et al.* Unravelling the Inflammatory Processes in the Early Stages of Diabetic Nephropathy and the Potential Effect of (Ss)-DS-ONJ. *Int. J. Mol. Sci.* **2022**, *23*, 8450.
- GONZÁLEZ-CUESTA, M.; LAI, A.C.; CHI, P. Y.; HSU, I. L.; LIU, N.T. *et al.* *J. Med. Chem.* **2023**, *66*, 4768-4783. Serine-/cysteine-based sp^2 -iminoglycolipids as novel TLR4 agonists: evaluation of their adjuvancy and immunotherapeutic properties in a murine model of asthma.
- GUILLÉN-POZA, P.A.; SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, E.M.; ARTIGAS, G.; GARCÍA FERNÁNDEZ, J. M.; HIROSHI HINOUE, H. *et al.* Amplified detection of breast cancer autoantibodies using MUC1- based Tn antigen mimics. *J. Med. Chem.* **2020**, *63*, 8524-8533.
- HAMMAD, H.; LAMBRECHT, B.N. The basic immunology of asthma. *Cell*, **2021**, *184*, 1469-1485.
- INTERNATIONAL HUMAN GENOME SEQUENCING CONSORTIUM. Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature* **2001**, *409*, 860-921.
- KALI, G.; HADDADZADEGAN, S.; BERNKOP-SCHNÜRCH, A. Cyclodextrins and derivatives in drug delivery: New developments, relevant clinical trials, and advanced products. *Carbohydr. Polym.* **2024**, *324*, 121500.
- LAINE, R.A. Information capacity of the carbohydrate code. *Pure Appl. Chem.* **1997**, *69*, 1867-1873.
- LEE, Y.; JEONG, M.; PARK, J. JUNG, H.; LEE, H. Immunogenicity of lipid nanoparticles and its impact on the efficacy of mRNA vaccines and therapeutics. *Exp. Mol. Med.* **2023**, *55*, 2085-2096.
- LOMBARD, J. Once upon a time the cell membranes: 175 years of cell boundary research. *Biol. Direct* **2014**, *9*, 32.
- MATSUDA, J.; SUZUKI, O.; OSHIMA, A.; YAMAMOTO, Y.; NOGUCHI, *et al.* Chemical chaperone therapy for brain pathology in G(M1)-gangliosidosis *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, **2003**, *100*, 15912-15917.
- ORTEGA-CABALLERO, F.; SANTANA-ARMAS, M.L.; TROS DE ILARDUYA, C.; DI GIORGIO, C.; TRIPIER, R. *et al.* Trehalose-polyamine/DNA nanocomplexes: impact of vector architecture on cell and organ transfection selectivity. *J. Mater. Chem. B*, **2024**, *12*, 3445-3452.
- PLATT, F.M. Emptying the stores: lysosomal diseases and therapeutic strategies. *Nat. Rev. Drug Discov.* **2018**, *17*, 133-50.
- RICCIO, E.; ZANFARDINO, M.; FERRERI, L.; SANTORO, C.; COCOZZA, S. *et al.* Switch from enzyme replacement therapy to oral chaperone migalastat for treating Fabry disease: real-life data. *Eur. J. Hum. Genet.* **2020**, *28*, 1662-1668.

- SHARON, N.; LIS, H. History of lectins: from hemagglutinins to biological recognition molecules. *Glycobiology* **2004**, 53R-62R.
- TAKAI, T.; HIGAKI, K.; AGUILAR-MONCAYO, M.; MENA-BARRAGÁN, T.; HIRANO, Y. A bicyclic 1- deoxygalactonojirimycin derivative as a novel pharmacological chaperone for GM1 gangliosidosis. *Mol. Ther.* **2013**, 21, 526-532.
- THE HORIZONS TRACKER. How to make serendipity happen. **2015**, <https://adigaskell.org/2015/01/14/how-to-make-serendipity-happen/>
- VENTER, J.C.; ADAMS, M.D.; MYERS, E.W.; LI, P.W.; MURAL, R.J., *et al.* *Science* **2001**, 291, 1304-1351.
- WEI, M.-M.; WANG, Y.-S.; YE, X.-S. Carbohydrate-based vaccines for oncotherapy. *Med. Res. Rev.* **2018**, 38, 1003-1026.
- WISNOVSKY, S.; BERTOZZI, C.R. Reading the glyco-code: New approaches to studying protein-carbohydrate interactions. *Curr. Opin. Structur. Biol.* **2022**, 75, 102395.
- YU, J.; WANG, J.; LIN, W.; LI, S.; LI, H., *et al.* The genomes of *Oryza sativa*: A history of duplications. *PLoS Biol* **2005**, 3, e38.

**RESPUESTA AL DISCURSO DE
RECEPCIÓN DEL ACADÉMICO
DE NÚMERO, ILMO. SR.
D. JOSÉ MANUEL GARCÍA FERNÁNDEZ**



*Por el Ilmo. Sr. D. Agustín Rodríguez González-Elipe,
Académico de Número,
el día 25 de noviembre de 2024*

Excmo. Sr. Presidente de la Academia Sevillana de Ciencias, Excmo. Sr. Presidente del Instituto de Academias de Andalucía, compañeros académicos, señoras y señores, apreciado José Manuel.

En la sociedad actual, en ciertos medios de comunicación y redes sociales o incluso para algunos políticos con capacidad de decisión en asuntos públicos, la palabra “química” suele generar impresiones y reacciones negativas. Tales connotaciones asocian la Química a fuente de productos no naturales que, según su uso, pueden resultar dañinos para la salud y el medio ambiente.

El trabajo y la obra del nuevo académico desacreditan totalmente estos prejuicios. Hablan además de nuevos conocimientos y metodologías, así como de aplicaciones de gran impacto en la salud o en la industria.

El término de referencia en su producción científica se relaciona con algo tan familiar como el azúcar o los azúcares, una serie de compuestos que pueden indudablemente denominarse como “productos químicos”, independientemente de que se produzcan como resultado de la actividad biológica de seres vivos o mediante su síntesis en un laboratorio. Hay pocos ejemplos más claros donde la frontera entre los conceptos “natural” y “artificial” carezca de sentido.

Los compuestos a los que nos referimos llevan nombres como D-glucosa, azúcares, carbohidratos, polisacáridos, glicoproteínas, glicoma o glicofármacos, términos que denotan un orden creciente de complejidad estructural y funcionalidades cada vez más precisas y específicas.

Es parte del conocimiento común la función de los azúcares más sencillos como edulcorantes e ingredientes de nuestra dieta, así como como fuente de bebidas alcohólicas tras su fermentación. Es menos conocido que estructuras más complejas de azúcares y su asociación con otros grupos moleculares vehiculan funciones esenciales de la bioquímica celular. De ello ha ido la magnífica lección que hemos escuchado.

Déjenme comentar primero sobre lo más simple, para avanzar posteriormente a lo más complejo.

Recuerdo que cuando los estudiantes de mi promoción estudiábamos los azúcares, su estructura, formulación y cosas por el estilo, lo hacíamos con un cierto escepticismo, pensando erróneamente que esa química era clásica y estaba vinculada a pequeñas moléculas orgánicas con una reactividad que seguía cánones bien establecidos. Eso sí, estudiamos con cierta profundidad, seguramente con el ánimo de superar lo mejor posible los exámenes, el compuesto de referencia para la gran variedad de posibles conglomerados moleculares de los azúcares. Me refiero a la glucosa.

El nombre “glucosa” fue acuñado por el francés *Jean-Baptiste Dumas* en 1838 y procede del griego “gleukos” que designaba al vino y al mosto y de “glykis”, apelativo de dulce.

Los antiguos intuían, y hoy día lo sabemos, que la glucosa es abundante en las uvas y que su fermentación da lugar a la formación de alcohol en el proceso de transformación de mosto a vino. La glucosa es además el vector energético por excelencia de los organismos vivos. En los mamíferos se encuentra en el torrente sanguíneo y se genera a partir de polisacáridos como resultado de la actividad metabólica de sus organismos (en el hombre, por ejemplo, la concentración normal de glucosa en sangre es de 90 a 130 mg por decilitro, pudiendo el hígado generar entre 180 y 220 gr de glucosa por día). El descontrol del nivel de glucosa en sangre da lugar a enfermedades y disfunciones por todos conocidas.

Los estudiantes de mi época llegamos a conocer que la glucosa puede existir en dos formas estructurales que se denominan isómeros ópticos. Este término designa su capacidad de desplazar el plano de polarización de la luz polarizada, bien a la izquierda (a este isómero se le denomina L-glucosa) o a la derecha (isómero conocido como D-glucosa). Se trata de dos compuestos enantiómeros quirales (quiral, viene del griego “kheir” que significa mano, lo que hace una referencia clara a la simetría especular que rige entre enantiómeros).

La quiralidad fue el primer descubrimiento de un científico genial como pocos, *Pasteur*, quien, con veinte y cinco años, estudiando la respuesta óptica del ácido tartárico, descubrió en su tesis doctoral que este componente del vino presentaba dos formas cristalinas diferentes, una imagen especular de la otra. Interpretando este descubrimiento, ha habido estudiosos de la obra de *Pasteur* que la han considerado como el resultado de un proceso de serendipia, muy influenciado por su actividad juvenil como ilustrador gráfico usando técnicas litográficas. *Pasteur* en su juventud fue un pintor y diseñador bastante aventajado y estuvo dudando si seguir su vocación artística como ilustrador gráfico o decantarse, como finalmente hizo, por su vocación científica. Como es sabido el molde de una litografía y su impresión en papel, la obra impresa, son una la imagen especular de la otra, una relación que habría contribuido a que *Pasteur* tuviera una inspiración genial para identificar las relaciones quirales en los cristales de ácido tartárico.

Fuese la causa un rayo de imaginación o el resultado de una labor incansable frente al microscopio óptico separando cristalitos de ácido tartárico según su aspecto, el hecho es que *Pasteur* abrió al mundo científico una nueva avenida por la que transitar. Creo poco en la serendipia y más en el contenido de una frase atribuida al propio *Pasteur*, según la cual “la suerte sólo favorece a la mente preparada”. Esta frase cobra toda su vi-

gencia en el caso del profesor *García-Fernández* y su fecunda trayectoria investigadora en el campo de las glicoproteínas y los glicofármacos.

A lo largo del desarrollo científico, el estudio de los azúcares ha sido fecundo en descubrimientos que han contribuido al desarrollo de nuevos principios y metodologías en Química y han tenido una gran repercusión, tanto fundamental como aplicada. Baste recordar algunos nombres famosos como *Kekulé*, *Emil Fischer*, premio Nobel en 1902, *Jacobus Henricus van 't Hoff*, *Otto Meyerhof*, premio Nobel en medicina en 1922 por descubrir el metabolismo de la glucosa, o *Hans von Euler-Chelpin* y *Arthur Harder*, premios Nobel en 1929 por desvelar el papel de las enzimas en la fermentación de la glucosa.

Muy significativamente en 1970, el argentino *Luis Leloir* recibió el premio Nobel en Química por su descubrimiento sobre el papel de derivados nucleótidos de la glucosa en la biosíntesis de carbohidratos en los organismos vivos (los nucleótidos son los componentes básicos del ADN y ARN; están integrados por una base nitrogenada y una molécula de azúcar, la desoxirribosa en el ADN y la ribosa en el ARN). Conviene aquí resaltar que *Luis Leloir* fue también pionero en el estudio de las glicoproteínas, una actividad que, según diversos científicos actuales, ha sido tan relevante e influyente como la de los estudios que le valieron el Nobel de Química. Sus trabajos en este campo abrieron una aproximación bioquímica al estudio de entidades tan importantes como los anticuerpos y muchas hormonas y enzimas, todas ellos elementos que juegan un papel clave en procesos vitales esenciales.

No cabe duda que desde esos momentos iniciales en el desarrollo de las glicoproteínas hasta la situación actual se han dado pasos de gigante. La identificación del *glicocáliz* como elemento básico de la membrana celular dotado de una capacidad única de identificación molecular es un paso esencial en la comprensión de las dinámicas celulares. También es fuente de nuevos interrogantes.

De entrada, resulta curioso y singularmente intrigante verificar que en los seres vivos la forma mayoritaria de glucosa es la D-glucosa. ¿Por qué esta forma y no la L-glucosa que puede sintetizarse sin dificultad alguna en los laboratorios? Tal y cómo hemos aprendido en la lección del nuevo académico, también lo es la gran capacidad de las glicoproteínas de codificar información, así como su inmensa variabilidad en función de los distintos monosacáridos que se enlazan en sus cadenas. Sin olvidar la gran capacidad de adaptación y respuesta de las glicoproteínas del *glicocáliz* a entornos cambiantes o, como ocurre con los procesos infecciosos, agresivos.

Para los no especializados en los mecanismos evolutivos, resulta complicado imaginar el conjunto de interacciones que, a lo largo de los milenios, ha podido condicionar la variabilidad del *glicocáliz* a nivel celular y molecular. Los científicos que andamos a caballo entre la Física y la Química, entendemos con relativa facilidad los procesos de mutación genética provocados en el genoma, por ejemplo, por la interacción con radiación UV u otras radiaciones ionizantes. Sin embargo, nos resulta arcano imaginar los mecanismos bioquímicos que pueden haber intervenido en el desarrollo evolutivo del *glicocáliz* hasta alcanzar una configuración específica para cada especie o, incluso, para cada individuo concreto.

Puede servir de consuelo saber que estas preguntas no tienen todavía una respuesta única ni precisa.

El cuento del escritor argentino *Jorge Luis Borges* “La Biblioteca de Babel”, contenido en su serie de relatos cortos “Ficciones”, suele tomarse como una metáfora literaria sobre el lugar del hombre en el universo y las dimensiones y posibilidades de este. Describe Borges una biblioteca imaginaria de dimensiones colosales (en la práctica infinita al ser inabordable en el interregno de una vida humana). La biblioteca estaba regida por un patrón recurrente de organización en pisos, escaleras, pasillos, anaqueles o estantes. En esta biblioteca se acumulaba un número incontable de libros con el mismo formato (igual número de páginas, líneas por página y letras por línea). Los libros recogían en sus líneas agrupaciones al azar de 25 signos gráficos, veintidós letras, el punto, la coma y el espacio (¡compárense estos 25 signos con las 100 letras y cinco formas de unirse entre sí que hemos escuchado que presentan los monosacáridos ¡). Tal era el número de volúmenes acumulado en los estantes que ni durante el transcurso de una vida humana resultaba posible encontrar un texto con sentido, más allá de alguna palabra o frase escueta dentro de un océano de cacofonías absurdas o lenguajes ininteligibles, pasados o futuros.

Creo que esta analogía puede hacernos vislumbrar por qué, a día de hoy, se conoce relativamente poco sobre la gran diversidad de glicoproteínas en la naturaleza y en los distintos tipos de células que integran el espectro amplísimo de los seres vivos.

Todas las especies presentan glicoproteínas complejas, hasta tal punto que ha habido científicos que han postulado que los polisacáridos fueron las macromoléculas primigenias que dieron lugar al origen de la vida. Hemos aprendido en la lección del profesor *García Fernández* que las glicoproteínas presentan una variabilidad enorme tanto en estructura como en abundancia y modelos de distribución, dentro y fuera de las células. Es así paradójico que cuando se creía que todo estaba bien acuñado en el genoma, resulte que la estructura de las glicoproteínas celulares no lo está de forma rígida, de modo que su génesis y transformaciones están también condicionadas por la acción de un conjunto de enzimas. El *glicofenotipo*, entendido como la manera de expresarse el conjunto de glicoproteínas, sería así el resultado de la expresión de una red amplia de genes, enzimas, nutrientes y otros factores exógenos siguiendo una correlación que no es en absoluto simple.

En este escenario, la manera en que las fuerzas de la selección natural han afectado a la evolución de las glicoproteínas y en qué medida agentes externos, patógenos o no, han condicionado su desarrollo a lo largo de la existencia de una especie o influido en la generación de nuevas especies, es algo por dilucidar. Se conocen algunos mecanismos que afectan a las interacciones involucradas en estos procesos evolutivos y algunos de sus resultados. La propia reproducción sexual por fecundación entre espermatozoide y óvulo parece presentar condicionantes que dependen del reconocimiento entre las glicoproteínas del primero y las del segundo, lo que daría ventaja a ciertas parejas frente a otras en términos de capacidad reproductiva.

Las derivadas cognitiva y epistemológica de todas estas nociones son múltiples y afectan no sólo a los conocimientos científicos, sino también a cuestiones de carácter

filosófico. En ese contexto no me resisto a recordar al filósofo *Shopenhauer* y sus postulados sobre lo que él denominaba la “voluntad de la especie”, una fuerza latente en la especie humana que la impulsa a perpetuarse, no extinguirse e incluso mejorarse. También a las derivadas de este concepto sobre el sentido del enamoramiento, según el filósofo el resultado de una complementariedad preexistente entre los dos individuos de la pareja que los llevaría a unirse para dar lugar a la mejor descendencia posible.

Me refería al principio de estas reflexiones al escepticismo latente en nuestra sociedad sobre la Química, que podemos hacer extensible a las vacunas y diversos desarrollos en bioquímica molecular y celular. Los descubrimientos sobre *glicofármacos* basados en procedimientos sintéticos en el laboratorio que nos ha presentado el profesor *García Fernández* y su interacción con el *glicocálix* desacreditan estos prejuicios. Sus trabajos muestran con claridad que, bien como portadores selectivos de principios activos o, incluso de ARN mensajero, las estructuras moleculares y los procesos involucrados no son de una naturaleza radicalmente diferente a la de las interacciones que han condicionado a lo largo del tiempo los mecanismos de selección natural.

El profesor *García Fernández* nos ha ilustrado también con resultados recientes de su actividad científica que están conduciendo al desarrollo de *glicofármacos* específicos para terapias de enfermedades poco frecuentes. La estrategia consiste en la síntesis de análogos de carbohidratos que actúan como ligandos, potentes pero reversibles, de ciertas enzimas que el organismo receptor es incapaz de sintetizar. El objetivo es “engañar” a la célula, hacer que confundan las estructuras sintéticas con sus propios carbohidratos, permitiendo el acceso y actuación de las enzimas que transportan. Son todas ellas metodologías imaginativas que requieren tanto un conocimiento profundo del *glicocalix* como un dominio muy preciso de los procedimientos del laboratorio capaces de desarrollar una síntesis orgánica muy compleja. Cabe decir que el azar de los procesos evolutivos en la naturaleza se sustituye por el conocimiento científico reglado, propiciando el desarrollo de nuevas estructuras con funciones específicas que hasta ahora no existían en aquella.

No quisiera dejar de mencionar que la síntesis dirigida que se realiza en los laboratorios no termina con aplicaciones en el campo de la salud. La Química biotecnológica está explorando nuevos procesos con gran potencial en ámbitos como en el desarrollo nuevos materiales, la energía, la cosmética o la alimentación, donde se vislumbran perspectivas claras de explotación industrial. Mencionaré como ejemplos algunas derivadas sintéticas más afines a mi propia especialización, en concreto el impacto de la tecnología de los azúcares, glicanos o glicoproteínas, en campos tales como los materiales poliméricos, la fabricación de recubrimientos selectivos de glicoproteínas para sensores, el desarrollo de polímeros para cromatografía de glicoproteínas o el de aditivos poliméricos para reducir la fricción superficial. La variedad de posibilidades en la industria es amplísima y apenas hoy empezamos a cotejar las áreas de trabajo que, fuera del ámbito biotecnológico, se beneficiarán de los resultados de la investigación en glicoproteínas y derivados relacionados.

Término ya, pero abusando de la bonhomía del *Doctor García Fernández* me voy a permitir una sugerencia que espero no incomode al nuevo académico. Yo completaría la

lista de los tres comensales franceses de su cena científica ideal, con un cuarto, *Pasteur*, a quién debemos el descubrimiento de la quiralidad, de fenómenos como la fermentación y la pasteurización, la negación de las teorías de la generación espontánea o las primeras formulaciones de las vacunas y, quién movido por una curiosidad inmensa, nunca consideró un tema de investigación como inapropiado. Hay también un motivo menos académico en la sugerencia: *Pasteur* haría uso de su amistad con el empresario danés *Jacob Christian Jacobsen*, dueño de la empresa cervecera *Calsberg* y un verdadero convencido de la necesidad de la innovación científica en los procesos industriales y de una colaboración estrecha entre Ciencia e Industria. Estoy seguro que a instancias de su amigo *Pasteur*, el industrial aportaría con gusto algunos de sus mejores productos para la mesa.

ARTE Y CIENCIA. LA AUTO-INMOLACIÓN DE LAS CÉLULAS

Conferencia impartida

*por el Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta,
Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias
en la Facultad de Bellas Artes, Universidad de Sevilla,
el día 24 de enero de 2024*



PRESENTACIÓN DEL CONFERENCIANTE POR DANIEL BILBAO PEÑA, DECANO DE LA FACULTAD DE BELLAS ARTES DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Los avances tecnológicos y las bellas artes van de la mano. Con este motivo inauguramos el curso 2023-24 celebrando en nuestra facultad la jornada de la cátedra Telefónica. También en el primer cuatrimestre, nuestro rector inauguró el mural realizado en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) por un equipo de alumnos de Bellas Artes y la artista María Ortega. El mural representaba los avances aportados por el científico Antonio de Ulloa. Hoy, una vez más, las bellas artes se alían con la ciencia para unir el conocimiento científico y su percepción desde la práctica artística.

Arte y Ciencia es un proyecto interdisciplinar que fomenta la sinergia entre ramas del conocimiento, un espacio híbrido de investigación teórico-plástica donde se apuesta por la innovación a través de la aplicación de las nuevas tecnologías en diferentes fases del proyecto y la transferencia del conocimiento a la sociedad. Quiero agradecer a Miguel Ángel de la Rosa por ser el promotor de la idea y ofrecer a la Junta de Bellas Artes esta atractiva colaboración entre ciencia y arte. Nuestro agradecimiento también a las doctora Alejandra Guerra, investigadora postdoctoral de la Universidad de Sevilla en el Instituto de Investigaciones Químicas (cicCartuja), a la profesora Raquel Barrionuevo, escultora y Vicedecana de Ordenación Académica, y a la profesora Laura Nogaledo, escultora y Coordinadora de nuestro Máster en Arte: Idea y Producción. Ellas tres serán las coordinadoras del proyecto.

Asimismo queremos agradecer la importante colaboración de la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular (SEBBM), que contribuirá a la financiación de la exposición y la edición del libro con las obras que surjan de este proyecto.

A continuación, voy a presentar a Miguel Ángel de la Rosa. Catedrático de Bioquímica y Biología Molecular de la Universidad de Sevilla, se licenció y doctoró por la

misma universidad. Completó su formación en el King's College de Londres. Desarrolla su investigación en el Instituto de Investigaciones Químicas, perteneciente al Centro de Investigaciones Científicas Isla de la Cartuja (cicCartuja), del que fue director entre 2009 y 2018. Sus estudios se centran en la relación entre la estructura y la función de metaloproteínas de transferencia de electrones y, en años más recientes, en el doble papel del citocromo *c* respiratorio en la vida y muerte programada de las células. Es autor o coautor cuatro libros, dos patentes, más de 200 artículos en revistas Indexadas y numerosas contribuciones de divulgación y opinión. Ha impartido alrededor de 200 conferencias científicas en países de todo el mundo, es socio de honor de la SEBBM, de la que fue su Presidente, Secretario General de la Federación Europea de Sociedades de Bioquímica (FEBS) y Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Es académico ordinario de la *Academia Europaea* (MAE) y académico correspondiente de la Academia de Ciencias de Murcia.

Y les dejo con Miguel Ángel de la Rosa, que impartirá la conferencia titulada “Arte y Ciencia: La Inmolación de las Células”, una idea que encierra una gran poética y que estamos seguros servirá de inspiración a nuestros artistas desde la argumentación científica.

CONFERENCIA

Buenos días a todos, y bienvenidos. Quisiera empezar dando las gracias al Decano de la Facultad de Bellas Artes, Daniel Bilbao, por sus amables palabras de introducción y presentación, y a la Vicepresidenta de la SEBBM, Irene Díaz Moreno, aquí entre nosotros, por la contribución de la Sociedad a la cofinanciación de los gastos que conlleve el proyecto. A ambos, nuestro reconocimiento por acoger desde el principio con tanta ilusión la idea que les propusimos.

Asimismo, agradecer a María José García del Moral, exprofesora de esta facultad, hoy jubilada, con la que contacté inicialmente y quien me introdujo a Daniel Bilbao, a vuestro decano, tras la proposición de “unir” arte y ciencia, y a las tres coordinadoras del proyecto, Raquel Barrionuevo, Laura Nogaledo y Alejandra Guerra, por su entrega y dedicación.

Mi agradecimiento igualmente a los miembros de la Real Academia Sevillana de Ciencias que hoy nos acompañan. Como podéis ver, el proyecto no solamente ha despertado interés entre los artistas, también entre los científicos. Están con nosotros Benito Valdés, Presidente del Instituto de Academias de Andalucía y miembro de la Real Academia Sevillana de Ciencias, José Luis de Justo, mi predecesor en el cargo de Presidente, los académicos Diego de la Rosa y Juan Cornejo, y Otilio Fernández, Decano del Colegio Oficial de Químicos de Sevilla, entre otros.

Imagino que todos venís expectantes, motivados, lógicamente, por la ilusión y el interés de la idea y el proyecto. Como habéis podido ver en el cartel anunciador, hablaremos de la inmolación de las células (Ilustración 1). Pero me gustaría empezar precisando el título un poco más, pues vamos a hablar de “autoinmolación programada”, no

ILUSTRACIÓN 1



solo de inmolación. Es decir, de células que se autoinmolan, que se sacrifican y mueren para ponerse a disposición del organismo vivo del que forman parte. No se trata del sacrificio de un cordero a los dioses, sino de células que se suicidan de manera programada y ordenada en beneficio de la comunidad. Por eso es necesario precisar el concepto que vamos a desarrollar.

En principio se puede pensar que arte y ciencia son dos mundos separados, ajenos el uno al otro, inmiscibles como el aceite y el agua (Ilustración 2). Mundos que hablan diferente lenguaje, imposibles de entenderse entre sí. Pero podemos tratar de hacer que se encuentren, agitándolos con fuerza, como si la agitación fuera la energía de activación, o elemento dinamizador, que facilite el encuentro entre científicos y artistas, como hacemos cuando agitamos el aceite y el agua (Ilustración 3). Lo podemos intentar, y hasta ser capaces de hablar y entendernos, como estamos haciendo aquí ahora, gracias a la disponibilidad y el deseo de llegar a un punto de encuentro.

La sorpresa viene al poco. Si agitáis el aceite y el agua con una varilla, incluso con una batidora, en efecto se mezclan, pero si lo dejáis reposar y volvéis al día siguiente, el agua y el aceite se han separado, el aceite arriba y el agua debajo. Igual ocurre con frecuencia en el diálogo arte-ciencia, que con el tiempo languidece. Necesitamos un

ILUSTRACIÓN 2



ILUSTRACIÓN 3



emulsionante, un agente que anule la repulsión, como hace la proteína del huevo cuando preparamos mayonesa (Ilustración 4). Tenemos químicos en la audiencia que saben de qué estamos hablando, de las fuerzas que repelen el aceite y el agua. ¿Las podemos vencer? Sí, por supuesto, podemos salvar esa energía de repulsión mediante un agente emulsionante, tenemos que encontrar la fórmula que haga factible la relación duradera y estable entre esos dos mundos, el arte y la ciencia, que se encuentren y no se separen. Tenemos que ser capaces de establecer puentes de unión permanentes, que los científicos y los artistas podamos hablar y entendernos con fluidez y continuidad.

ILUSTRACIÓN 4



Esta es la idea, el objetivo del proyecto que hoy nos ocupa. En esencia, os estoy hablando de una visión global de la cultura porque, a fin de cuentas, arte y ciencia son dos maneras de entender la cultura, producto de la evolución social de la humanidad durante decenas de miles de años (Ilustración 5). Arte y ciencia han recorrido caminos diferentes, paralelos más que divergentes, con perspectivas e intereses distintos, pero al mismo tiempo han contribuido en su evolución al desarrollo y progreso del hombre. Nos cuesta ver los puntos de encuentro, ¿qué tienen en común el arte y la ciencia?, pero si alzamos la vista y analizamos la historia de la civilización con una perspectiva

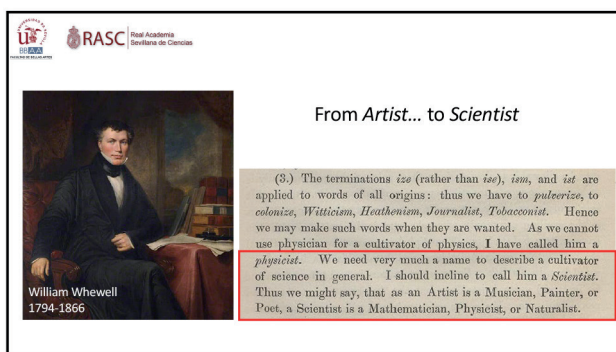
ILUSTRACIÓN 5



panorámica empezaremos a abrazar esa idea holística e integradora, entendiendo arte y ciencia como un binomio esencial de la cultura, como si fueran las dos caras de un Jano.

Mas no estoy diciendo nada original al pretender asimilar arte y ciencia. ¿Sabéis de dónde viene la palabra “científico”? Fue el inglés William Whewell, a mediados del siglo XIX, quien acuñó el término al darse cuenta de que artistas y científicos comparten la creatividad como el leitmotiv que impulsa su trabajo y su vida. Así, Whewell propuso el término *scientist* por analogía con *artist*: “Necesitamos un nombre para describir a la persona que cultiva la ciencia en general, y me podría inclinar por la palabra “científico”. En el sentido de que igual que hablamos del “artista”, que es un músico, un pintor o un poeta, de manera parecida podríamos hablar del “científico”, que es un matemático, un físico o un naturalista” (Ilustración 6). Pues bien, tomando la creatividad como elemento común, vamos a tratar de encontrar el punto de encuentro entre arte y ciencia.

ILUSTRACIÓN 6



El científico –conocido como “filósofo de la naturaleza” antes de Whewell– es una persona que crea, que imagina, que diseña nuevas ideas, que elabora nuevos conceptos y, en definitiva, que ve, observa y analiza la naturaleza de forma distinta. El científico, por tanto, se relaciona con el artista, pero también con el filósofo que interroga a la natu-

raleza de la que forma parte. Los primeros filósofos, en la Grecia clásica, tenían al propio hombre, su razón de ser y existir en el universo, como objeto principal de estudio. Cuando el hombre empieza a filosofar observando la naturaleza de manera profunda, tratando de formular y comprobar mediante la experimentación las leyes que la gobiernan, nos damos de bruces con el inicio de la ciencia moderna, cuyo padre fundador es Galileo Galilei. A punto estuvo de morir condenado por la Santa Inquisición al defender la teoría heliocéntrica de Copérnico, afirmando que la Tierra gira alrededor del Sol y no al revés, lo que significaba desplazar al hombre de su papel central en el universo y fin último de la creación (Ilustración 7).

ILUSTRACIÓN 7



El ejercicio filosófico de pensar, de observar e interpretar la naturaleza, la emoción del científico al descubrir y la del artista al crear, deben ser los emulsionantes que nos permitan fundir a científicos y artistas en fructífero diálogo. Para el científico la emoción de descubrir y de ser el primero en ver algo que nadie antes ha visto es absolutamente inenarrable. Como decía Severo Ochoa, galardonado con el premio Nobel de fisiología o medicina en 1959, la emoción del científico al realizar un descubrimiento único es un sentimiento tan profundo, tan inigualable que es imposible describir con palabras (Ilustración 8). Así también lo es la emoción del artista cuando ejecuta una obra realmente original, una obra que, como se suele decir, rompe moldes.

Muchas veces me encuentro en el laboratorio a algún estudiante de doctorado desanimado porque no ha obtenido los resultados esperados. Los experimentos no siempre salen como uno quiere, y hasta se rompe un tubo de ensayo o las células no crecen. Entonces le digo que “no debe de sentirse nunca como si fuera un trabajador del sector de la ciencia, como si fuera un operario apretando tornillos, con todo respeto, en una fábrica de automóviles; eso no es trabajar en un laboratorio” (Ilustración 9). Un científico tiene que sentirse como el artista, tiene que entrar cada mañana en el laboratorio con la ilusión y la emoción por descubrir de Ochoa. Como pueden atestiguar algunos compañeros del grupo de investigación que hoy nos acompañan, suelo decirles a los doctorandos que “al cicCartuja venimos a divertirnos con el trabajo, como los artistas” (Ilustración 10).

ILUSTRACIÓN 8

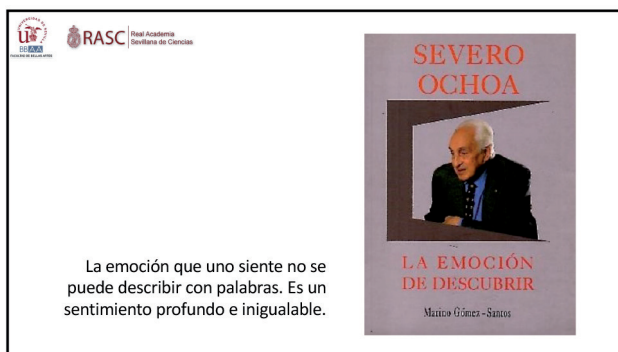


ILUSTRACIÓN 9

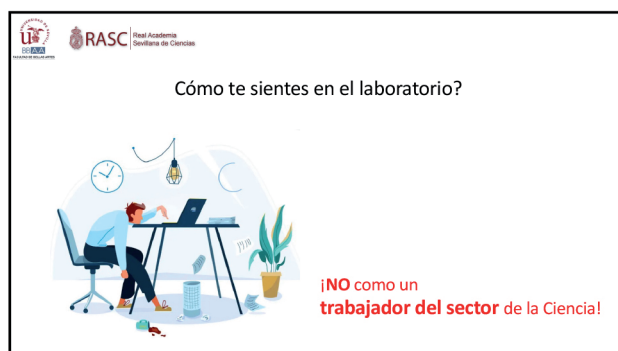


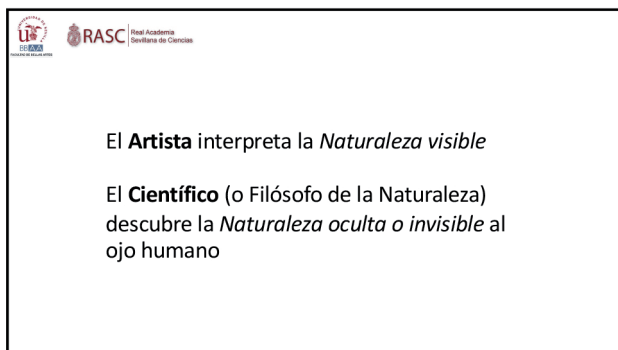
ILUSTRACIÓN 10



Los nexos entre artistas y científicos parecen, pues, fuera de discusión, pero hay una diferencia clave que conviene resaltar pues, a la postre, se torna apasionante. El artista trabaja sobre la naturaleza visible, pinta o esculpe al dictado de lo que tiene delante de sus ojos tras pasar por el filtro interpretativo de la mente, ya sea realista, poético o fantástico. El científico, sin embargo, puede operar sobre la naturaleza fuera del alcance

del ojo desnudo, mas recurriendo a instrumentos de alta sofisticación para hacer visible lo invisible (Ilustración 11). Y aquí es donde surge ese nuevo y apasionante nexo, o punto de encuentro: cuando el científico, con sus microscopios y telescopios, facilita al artista la revelación de lo infinitamente pequeño o infinitamente grande, de lo que hasta entonces quedaba inaccesible a su reflexión.

ILUSTRACIÓN 11



Los telescopios, por ejemplo, permiten al científico admirar la inmensidad del universo, pero también ver lo que ocurrió a años luz de distancia de la Tierra (la distancia de un año luz es el trayecto recorrido por la luz en un año). Por ejemplo, cuando vemos con el telescopio una estrella situada a diez mil años luz, lo que en realidad estamos viendo es lo que aconteció en ese astro cuando nuestros antecesores todavía se refugiaban en cavernas. Para hacernos una idea de cómo de grande es el universo podemos fijarnos en el número de estrellas –no digo ya planetas, satélites o cometas, sino estrellas, la mayoría más grandes que el Sol– que lo componen. ¡Son del orden de diez cuatrillones (10×10^{24})! Es una estimación, una cifra aproximada, lejos del alcance de nuestra capacidad de imaginación o entendimiento. Y ese es el universo que suponemos conocido, o sospechado, es decir, el universo al alcance de nuestros telescopios y ecuaciones, pero ignoramos si hay algo más que se escapa al saber científico de hoy. ¿Cuántas estrellas componen el universo “real”? (Ilustración 12). Y al igual que nos aproximamos a lo infinitamente grande, podemos adentrarnos en la ciencia que nos permite desentrañar lo infinitamente pequeño. Con el microscopio podemos ver nuestras células, las células de nuestro organismo y las de cualquier otro ser vivo. Los cálculos recientes apuntan a que el cuerpo de un hombre varón de 70 kilos de peso se compone de unos treinta y seis billones de células (36×10^{12}). ¡Es decir, del orden de un billón menos que estrellas en el universo! ¡Y hasta de un número similar de bacterias! (Ilustración 13).

Sea grande o pequeña, lejana o cercana, la naturaleza se hace visible y deja de estar oculta gracias a la instrumentación científica. Pero lo interesante de la actividad del científico no es sólo ver, sino pensar e interpretar lo que ve. Como decía el premio Nobel húngaro Albert Szent-Györgyi, “investigar es ver lo que todos han visto, y pensar lo que nadie ha pensado” (Ilustración 14). Y aquí hallamos de nuevo ese punto de encuen-

ILUSTRACIÓN 12



ILUSTRACIÓN 13

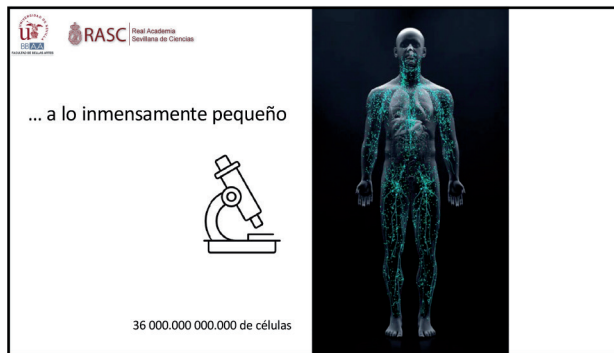
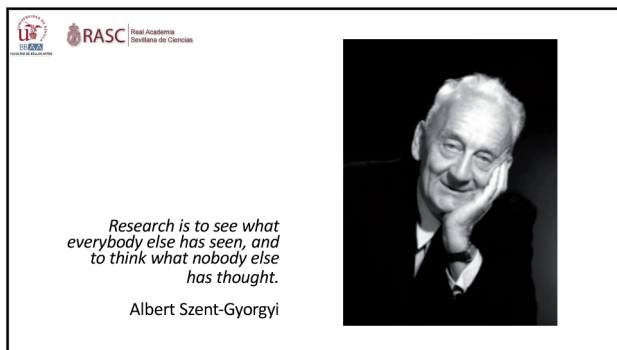


ILUSTRACIÓN 14



tro que nos acerca al artista, la creatividad y la imaginación a la hora de interpretar e interrogar a la naturaleza, la emoción del pensamiento singular o la obra única.

La interacción entre el arte y la ciencia que planteamos con este proyecto se basa, por tanto, en la similitud de aproximaciones y actitudes, de formas de analizar y entender la naturaleza. En particular, el reto que lanzamos a los artistas –y a los alumnos de

este máster, en particular– es cómo interpretar lo que la ciencia nos revela, lo que la ciencia hace visible. El objetivo del proyecto es que vosotros, con vuestra creatividad de artistas, interpretéis la naturaleza revelada, hasta ahora ajena, gracias a la información que os facilitamos los científicos. Y aquí hago hincapié en un aspecto clave: la ciencia permite no solo determinar la estructura o forma en que se disponen las piezas de lo revelado, sino también analizar su dinámica funcional, la actividad para la que fueron diseñadas y la manera en que desempeñan su cometido. Con dicha información, estructural y funcional, se trata de que las obras que vayáis a realizar recojan vuestra huella interpretativa (Ilustración 15).

ILUSTRACIÓN 15

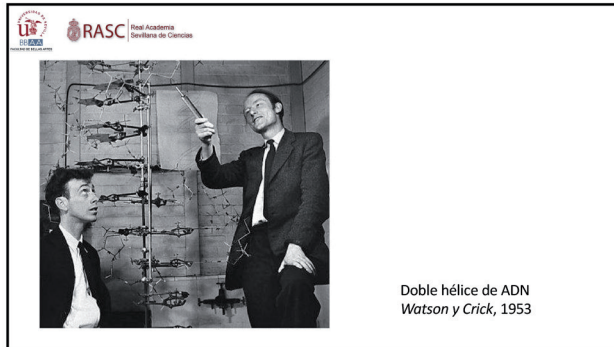


Los científicos podemos mostraros, por ejemplo, una preciosa fotografía de una célula al microscopio electrónico con múltiples colores, resultado del marcaje de diversas biomoléculas (en general, proteínas) con pigmentos fluorescentes. La imagen puede resultar original y única, incluso bella desde el punto de vista artístico, pero tal cual carece de vida, no tiene función. La vida es movimiento, y la falta de movimiento es la mejor evidencia de la muerte. Necesitamos entender cómo funcionan esa célula y sus proteínas constituyentes, los mecanismos internos de la naturaleza. Por consiguiente, no se trata solo de ver las células y sus moléculas, sino aproximarnos a su razón de ser y existir, conocer cómo desempeñan el papel para el que fueron diseñadas. En otras palabras: entender la función de la materia, comprender su esencia anímica y vital.

Una de las mejores interpretaciones artísticas de la naturaleza oculta y hecha visible gracias a la ciencia la encontramos en Salvador Dalí, uno de nuestros pintores más universales y reconocidos. En la década de los años cincuenta del pasado siglo, en 1953, el descubrimiento de la estructura en doble hélice del ácido desoxirribonucleico –más conocido por su sigla ADN– abrió la puerta a la revolución biológica que dominó la ciencia en las décadas que siguieron. De hecho, la ciencia del siglo XX se dividió en dos grandes períodos: la primera mitad dominada por la física, con el desarrollo de la teoría de la relatividad de Einstein, la mecánica cuántica, el descubrimiento del átomo y la energía nuclear, y la segunda mitad dominada por la biología molecular a raíz de la resolución de la estructura del ADN, conocida como la molécula de la vida. Fueron

los bioquímicos ingleses James Watson y Frederick Crick (Cambridge, UK) quienes revolucionaron la genética del momento con su modelo de bolitas y varillas en forma de doble hélice, sentando así las bases de toda una época (Ilustración 16). El desarrollo de la moderna biología –y, en concreto, de la biomedicina– hizo posible que el hombre extendiera su esperanza de vida decenas de años, muy por encima de la que tuvieron nuestros abuelos.

ILUSTRACIÓN 16



Watson y Crick terminaban todas las tardes su trabajo cenando en el *Eagle*, reconocido pub en Cambridge que a día de hoy viene a ser como la meca de peregrinación y visita obligada para los biólogos moleculares. En un rincón del *Eagle* se puede ver la placa que rememora precisamente la mesa donde Watson y Crick continuaban sus discusiones vespertinas sobre el modelo estructural del ADN. El *Eagle* se hizo famoso mucho antes, durante la Segunda Guerra mundial, porque de allí salían los pilotos de la Royal Air Force a luchar contra los alemanes cuando sonaban las sirenas anunciando que se acercaban los aviones enemigos. Las paredes están repletas de fotos y recuerdos, de los que iban y no volvían tras morir en combate (Ilustración 17).

ILUSTRACIÓN 17



Salvador Dalí desarrolló un particular interés en su obra por el ADN y, en general, por la biología, siendo realmente visionario al interpretar la estructura molecular del ADN. La doble hélice llega a ser recurrente en sus cuadros, siempre con distinto significado y explicaciones místicas. En la *Estructura del ADN - obra estereoscópica*, con dos brazos extendidos significando un abrazo, la doble hélice le sirve a Dalí para simbolizar la enorme similitud genética de la humanidad y la comunión de todos los hombres (Ilustración 18). En *Paisaje de mariposas* –obra realizada en 1957, apenas cuatro años después de la revelación de la estructura del ADN– llama la atención la perfecta ejecución de la molécula de ADN, deducida a partir del modelo primario de bolas y varillas metálicas de Watson y Crick, sin nada que envidiar a los modelos que se obtienen hoy con los más modernos ordenadores y programas informáticos (Ilustración 19). Famosa es su frase “Esto es para mí la prueba verdadera de la existencia de Dios”, tras la realización de su obra *Galacidalacidesoxyribonucleicacid*, en homenaje a Chris y Watson, en la que Gala asiste al milagro de la vida, entre estructuras de ADN e iconos religiosos (Ilustración 20).

ILUSTRACIÓN 18

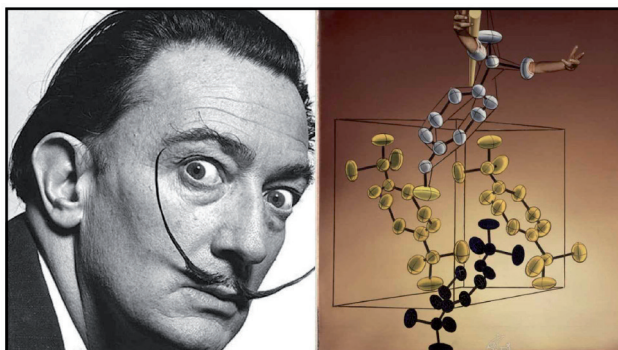


ILUSTRACIÓN 19



ILUSTRACIÓN 20



En sus cuadros, Dalí interpreta lo que Watson y Chris le permitieron ver, porque lógicamente él como artista no podía ver el ADN, pero la ciencia le permite ver –y además entender– cómo es una molécula y cómo se desarrolla la vida. Dalí interpreta la belleza, la complejidad, la elegancia de la molécula. Y entiende que las dos hebras de la doble hélice permiten al abrirse que las células se dividan y haya reproducción. El mecanismo íntimo de funcionamiento del ADN constituye la base mecánico-molecular de la biología y de la vida. Se trata, por tanto, de que los científicos os digamos a los artistas no solo qué es lo que se ve, sino cómo funciona lo que vemos. Os podemos explicar cómo es la estructura del ADN y cómo se abre para construir dos copias de una misma molécula, de modo que se pueda transmitir a las células hijas y cada célula hija pueda disponer de una molécula completa.

Dalí fue muy amigo de Severo Ochoa desde la época en que ambos coincidieron en la singular Residencia de Estudiantes de Madrid, antes de la guerra civil. Allí coincidieron con Luis Buñuel, Federico García Lorca y muchos otros de los que configuraron, sin duda, una de las épocas más brillantes de la cultura española. Siendo jóvenes y en el exilio, la amistad se vio reforzada por el interés científico de Dalí y el artístico de Ochoa. La amistad y reciprocidad de intereses llevaron pronto a Dalí a intentar comprender los entresijos mecánicos de la biología, como así plasmó años después en la portada del libro *Reflections on Biochemistry: In Honour of Severo Ochoa*, editado por compañeros y discípulos del Premio Nobel en su 75 cumpleaños (Ilustración 21). Años antes, en 1969, Dalí realiza el cartel anunciador del Congreso Europeo de Bioquímica, celebrado en Madrid, en el que la portentosa imagen de un virus sobrecogedor suspendido en el aire aparece dominante como dueño y señor de la vida y todo lo creado (Ilustración 22).

Esa sinergia y colaboración entre arte y ciencia –tan bien representada por Dalí con Ochoa, Watson y Crick– se ha producido infinidad de veces a lo largo de la historia. Dalí se nutría de los científicos como fuentes de inspiración, que le facilitaban la información necesaria para satisfacer sus inquietudes sobre los mecanismos íntimos de la vida. Si queréis profundizar un poco más en el tema, os recomiendo un artículo reciente de Daniel López Rincón (Universidad de Barcelona), del año 2016, sobre la fascinación que sentía Dalí por la biología molecular. Se titula “La biología molecular en la trayectoria artística de Salvador Dalí” (Ilustración 23).

ILUSTRACIÓN 21



ILUSTRACIÓN 22

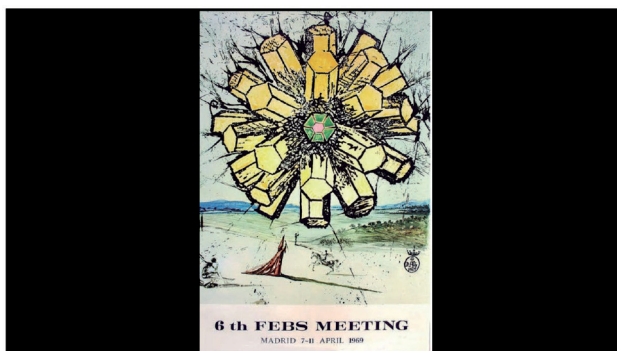
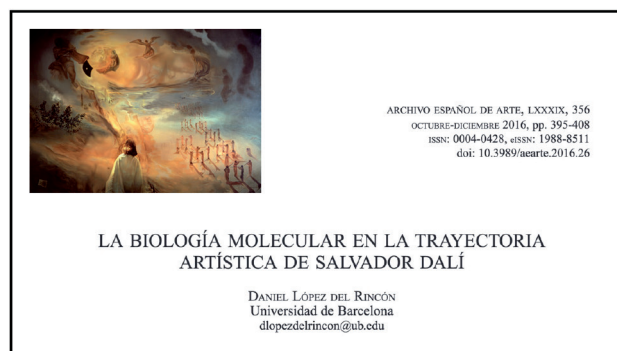
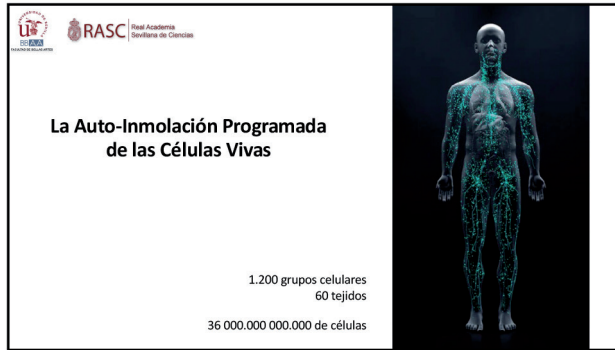


ILUSTRACIÓN 23



Volviendo al tema del principio, la fusión de arte y ciencia, para este curso académico en concreto habíamos pensado proponer un tema que os pudiera inspirar con facilidad: la inmolación –o, mejor dicho, la autoinmolación– de la célula viva (Ilustración 24). En la complejidad de su estructura, la célula dispone de un núcleo e infinidad de orgánu-

ILUSTRACIÓN 24



los: mitocondrias, cloroplastos, lisosomas, retículo endoplásmico, aparato de Golgi, etc. Todo eso está ahí, en el interior de una célula de unas 10-30 micras de diámetro (una micra es la millonésima parte de un metro) (Ilustración 25). En semejante pequeñez tenéis un mundo absolutamente complejo, infinitamente más pequeño que cualquier factoría que podáis imaginar o que pueda diseñar el hombre. Tanta complejidad en tanta pequeñez resulta absolutamente inimaginable según los cánones del mundo que conocemos. Entonces, exactamente igual que tenemos esas células diminutas y complejas en nuestro organismo, las encontramos en cualquier ser vivo. Un árbol también está compuesto de células, como las de nuestro cuerpo y otros organismos (Ilustración 26). Y lo que es importante, todas las células y seres vivos proceden unos de otros por evolución, exhibiendo por tanto toda una serie de semejanzas y similitudes, aunque también de diferencias peculiares. Las enormes diferencias entre el mundo animal y vegetal, de hecho, responden a la estricta especialización de las células y sus orgánulos para realizar las funciones para las que están diseñadas (Ilustración 27).

Una particularidad crucial de la vida es el movimiento, siendo la falta de movimiento la mejor evidencia de la muerte. La vida es función, la vida es dinamismo. Es absolutamente increíble, impensable, la cantidad de reacciones e interacciones que tienen lugar

ILUSTRACIÓN 25

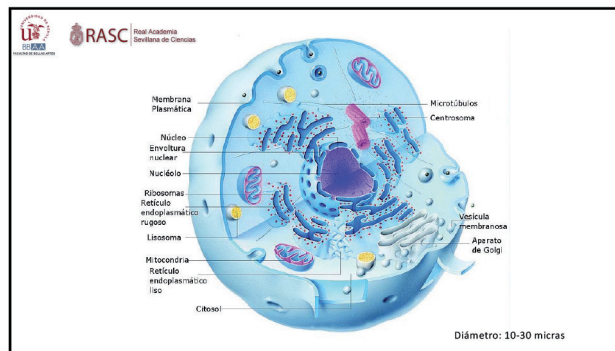
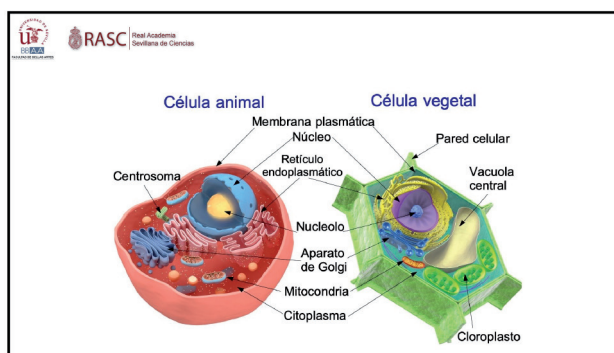


ILUSTRACIÓN 26



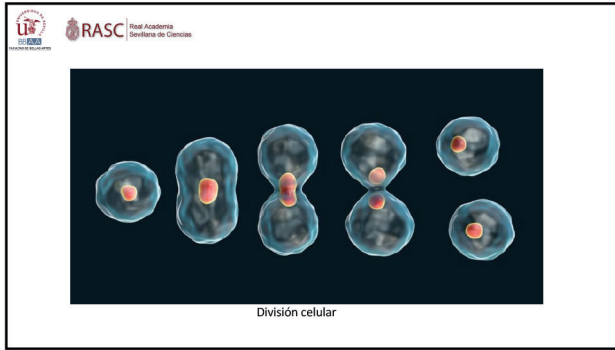
ILUSTRACIÓN 27



en el interior de la célula. Uno de los momentos clave de la vida celular es la división, cuando la célula madre, ya adulta, llega al fin de sus días y debe desdoblarse en dos células hijas (Ilustración 28). Estas a su vez crecen y crecen hasta que se dividen de nuevo y engendran otras dos células hijas cada una. Si el proceso continuara de manera indefinida y sin control, cualquier organismo vivo, un árbol o nuestro propio cuerpo, derivaría en gigante monstruoso. Entonces, ¿por qué no nos convertimos en gigantes si nuestras células están continuamente dividiéndose? La respuesta es sencilla: no todas las células se dividen al llegar a la edad adulta, sino que muchas se mueren sin descendencia. Es asombroso, por ejemplo, cómo envejecemos con el paso de los años y, sin embargo, conservamos el parecido. Alguien que nos hubiera visto hace siete o diez años no tendría dificultad alguna en reconocernos, a pesar de los cambios por la edad, pero no estaría viendo ni una sola de las células en ninguno de nosotros que vio años atrás. Estaría viendo un cuerpo compuesto por células totalmente distintas. Ello se debe a que existe un mecanismo de regulación del crecimiento, de control de las células que se dividen o se mueren, que se denomina “muerte celular programada”.

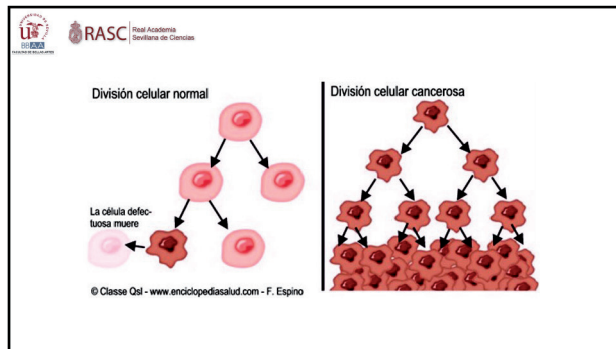
El proceso de muerte celular programada, también conocido como apoptosis, es fundamental para el mantenimiento de la homeostasis y la eliminación de células dañadas

ILUSTRACIÓN 28



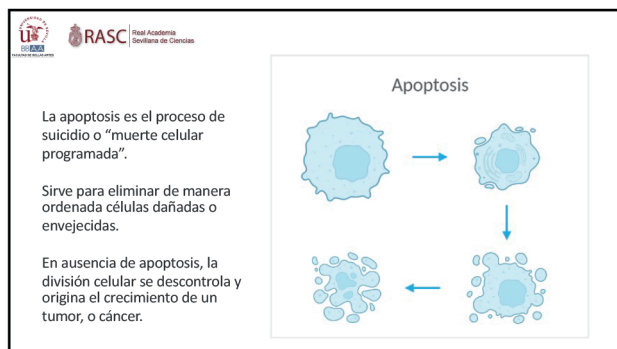
o no necesarias en un organismo. Las células, que contienen el ADN con toda la información genética en su núcleo, se dividen para producir células hijas con un contenido genético similar al de la célula madre. Sin embargo, es crucial que este proceso esté controlado y programado para evitar la proliferación descontrolada de células, que podría llevar al desarrollo de enfermedades como el cáncer (Ilustración 29). Cuando las células se tornan anormales, o resultan dañadas, ya sea por factores genéticos, ambientales o patológicos, pueden activar los mecanismos de muerte celular programada para eliminarse de manera ordenada. En este proceso, las células se “suicidan” de manera controlada, liberando sus componentes celulares para ser reutilizados por otras células en el organismo (Ilustración 30).

ILUSTRACIÓN 29



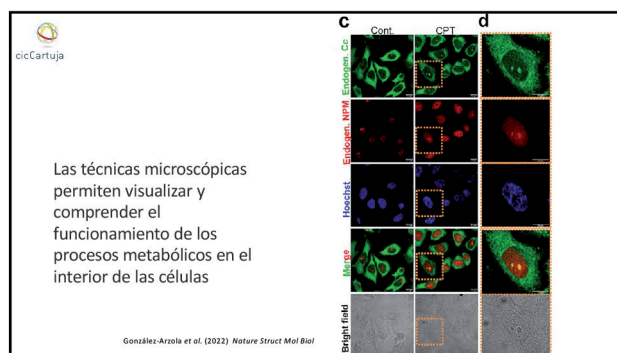
Si los mecanismos de regulación de la muerte celular fallan, pueden surgir problemas como el cáncer. En el cáncer, las células pierden la capacidad de someterse a la apoptosis y continúan dividiéndose de manera descontrolada, formando tumores que pueden invadir tejidos circundantes y propagarse a otras partes del cuerpo. Es importante, por consiguiente, comprender la importancia de la programación y regulación de la muerte celular para mantener la salud y prevenir enfermedades.

ILUSTRACIÓN 30



Las células, al darse cuenta de que ya se están haciendo mayores, se programan para suicidarse; lógicamente, si no hubiera muerte celular, el crecimiento celular se descontrola y aparece el tumor. La muerte celular es crucial para nuestra homeostasis, para mantener el equilibrio del organismo completo. Y ¿cómo llegamos a entender qué es lo que ocurre en el interior de esas células tan pequeñas, de 10-30 micras? Pues con la instrumentación científica. Con las técnicas microscópicas, por ejemplo, os podemos enseñar qué es lo que vemos los científicos. Podemos centrarnos en las proteínas, que son las que interaccionan en el interior de la célula, como los obreros en una fábrica, haciendo el trabajo. Y podemos marcar varias biomoléculas de manera específica con distintos fluoróforos, o compuestos químicos que emiten luz de varios colores, a fin de localizar dichos componentes en las células. Por ejemplo, podemos identificar en azul el ADN del núcleo; en verde, proteínas de hierro, como el citocromo c, en la mitocondria o repartido por el citoplasma; y en rojo, otra proteína, la nucleofosmina (NPM), que se localiza en el interior del núcleo. Al superponer imágenes, se puede ver si el ADN y las dos proteínas están en compartimentos distintos o en el mismo, e incluso realizar ensayos cinéticos para seguir lo que ocurre a lo largo del tiempo (Ilustración 31). Es decir, podemos ver no solo la distribución de esas proteínas, sino también su evolución en el

ILUSTRACIÓN 31



tiempo, lo que permite ir construyendo los complejos mapas de interacciones metabólicas que ocurren en el interior de una célula.

Un tema interesante en biología celular es el denominado *crowding* molecular, esto es, el efecto de aglomeración o super-acumulación de moléculas en la célula. ¿Cómo es posible que las moléculas se puedan reconocer e interaccionar de manera específica con su pareja en semejante multitud? Imaginad que uno de vosotros tiene que devolver un billete de 50 euros a un amigo y quedáis en la calle Sierpes, que uno entra por la plaza de San Francisco y el otro se acerca desde la Campana. Pero claro, no es lo mismo quedar un domingo cualquiera a las diez de la noche, con la calle vacía, que el jueves santo de madrugada mientras pasa la Macarena o el Gran Poder. La multitud de la madrugada con toda seguridad hará mucho más difícil el encuentro. Pues exactamente igual es la situación en el interior de una célula, donde millones y millones de moléculas se tienen que encontrar e interaccionar de manera específica e inequívoca a una velocidad endiablada.

En cualquier caso, con técnicas bioquímicas, biofísicas y de biología celular podemos ir desentrañando el complejo mecanismo de interacciones moleculares y celulares que gobiernan el metabolismo de todo ser vivo. Así, el citocromo c, una proteína que está recluida en el interior de la mitocondria de las células normales, desempeñando un rol determinado, sale del orgánulo en las células dañadas o envejecidas. Cuando llega la hora de la apoptosis, del suicidio, de la auto-inmolación celular, el citocromo c abandona masivamente la mitocondria e invade toda la célula, inunda el citoplasma e incluso llega al núcleo, que es donde está el ADN, y provoca un cambio metabólico profundo en la célula. El cambio se entiende como un disparo, como una acción molecular en respuesta a una orden que puede proceder del exterior o del interior celular, y que le dice a la célula que está condenada a morir, que los daños que ha sufrido son tan graves que no hay posibilidad de reparación. A renglón seguido, se pone en marcha el complejo mecanismo de reacciones que conducen al suicidio celular (Ilustración 32).

Fue nuestro grupo el que propuso, hace unos años, que la ruta de degradación de biomoléculas durante la muerte celular programada –descrita y bien establecida años antes– se acompaña de una orden simultánea de bloqueo del metabolismo de síntesis.

ILUSTRACIÓN 32

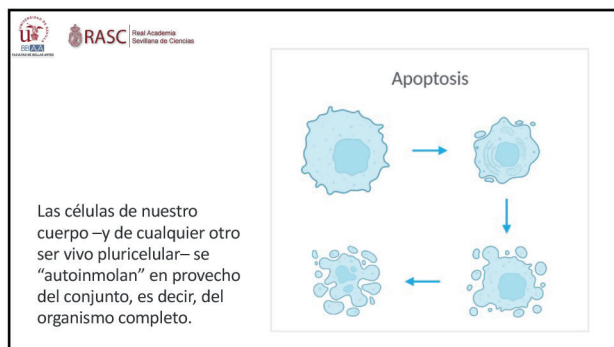


Es decir, la célula no solamente pone en marcha el mecanismo de demolición, sino que al mismo tiempo bloquea la producción de nuevas moléculas. Si vamos a demoler una casa envejecida de manera ordenada, tratando de aprovechar los materiales de derribo (puertas, ventanas, muebles, etc.) para que los vecinos los reutilicen, no tiene sentido que lleguen operarios trayendo un sofá o una puerta nueva (Ilustración 33). La programación celular interna de demolición y bloqueo a un tiempo es un ejemplo precioso de cómo la biología ha desarrollado toda una serie de mecanismos para asegurar la subsistencia de la comunidad, aun sacrificando al individuo. Podemos concluir, por tanto, que las células de nuestro cuerpo se auto-inmolan en provecho del organismo completo (Ilustración 34). Y ahora el reto que os lanzamos a los artistas es cómo interpretáis, con vuestra creatividad y originalidad, esa autoinmolación que vemos los científicos. ¿Y si los seres humanos, como individuos, se auto-inmolaran en beneficio de la sociedad a la que pertenecen?

ILUSTRACIÓN 33



ILUSTRACIÓN 34



Nosotros somos producto de la evolución desde los inicios del Big Bang, hace trece mil quinientos millones de años. Primero fue la evolución física, gracias a la cual aparecieron los átomos y las partículas subatómicas, y la materia toda, incluyendo galaxias,

estrellas, planetas, satélites, etcétera; luego, la evolución química y prebiótica en la Tierra, que permitió la formación de moléculas cada vez más complejas y las primeras protocélulas; y finalmente, la evolución biológica, o darwiniana, que gobernó la complejidad creciente que caracteriza el mundo vivo desde las primeras bacterias hasta el hombre, producto final del proceso en la actualidad. Una vez aparecida la especie humana, el *Homo sapiens sapiens*, la evolución continuó en su aspecto social y organizativo, desde las cavernas a las ciudades actuales. Sin cambios físicos, químicos o biológicos reseñables, el hombre evolucionó como especie diferenciada de los primates en su comportamiento y estilo de vida, permitiendo la convivencia en sociedad, respetando la vida y la libertad individual. Es lo que se conoce como civilización.

Si comparamos lo que ocurre en la naturaleza y en nuestras sociedades veremos que hay una diferencia crucial. En el mundo vivo, que ha evolucionado hasta llegar al hombre, lo que prima es la especie sobre el individuo, que con frecuencia se sacrifica en beneficio del grupo al que pertenece. El objetivo es que la especie perdure. Los animales sociales, por ejemplo los insectos, se estratifican en castas de distintas categorías, cada una de ellas con una función diferenciada pero siempre dirigida al bien común. Por el contrario, en nuestras sociedades, productos de la civilización, el objetivo primordial es la protección del individuo, el respeto a la vida y la libertad, como así queda recogido en la carta fundamental de los derechos del hombre. El progreso y el desarrollo social se subordinan siempre al respeto de los derechos individuales, lo que constituye la regla básica de convivencia en paz y armonía, la norma elemental de vida en sociedad. Pero estas no son las reglas darwinianas, que sacrifica al individuo en pro de la especie. La muerte celular programada, de hecho, constituye el mejor ejemplo de inmolación individual en pro del bien colectivo (Ilustración 35).

ILUSTRACIÓN 35



Naturaleza viva

- La perpetuación de la especie es el objetivo esencial
- El individuo, con frecuencia sacrificado, es un instrumento necesario para el éxito de la especie

Civilización humana

- La protección del individuo es la base de la convivencia
- La sociedad condiciona el progreso colectivo a la libertad individual

El reto a vuestra creatividad de artistas queda, pues, planteado. Unid vuestra imaginación a la emoción por descubrir del científico y buscad los puntos de encuentro. Para este año en concreto tomad la autoinmolación de las células de vuestro cuerpo como objeto de reflexión y estudio. En cursos posteriores recurriremos a otras situaciones, pero

igualmente os abriremos la puerta que os permita ver la naturaleza ajena al ojo humano, ya sea lo infinitamente pequeño, ya sea lo infinitamente grande Muchas gracias a todos por vuestra atención y, ¡nunca mejor dicho, manos a la obra! (Ilustración 36).

ILUSTRACIÓN 36



CONFERENCIAS
LOS MARTES DE LA ACADEMIA

LOS NEANDERTALES Y SU REFUGIO EN EL SUR DE IBERIA

*Resumen de la conferencia pronunciada por
el Ilmo. Sr. D. Joaquín Rodríguez Vidal,
el día 16 de enero de 2024*



Las nuevas ideas y los nuevos hallazgos, resultado de la investigación en yacimientos de ocupación neandertal, están poniendo el foco en los ambientes costeros como refugios potenciales y como corredores del movimiento poblacional durante los períodos de mayor estrés climático.

El sudoeste de Europa y el sur de la península ibérica, en particular, donde África se encuentra con Europa a través del estrecho de Gibraltar, ofrece una comparación y un contraste útil con la evidencia subsahariana. Aquí, las condiciones oceánicas han producido climas consistentemente más suaves que en otras partes de la Europa continental.

Las costas del sur de Iberia emergen, por tanto, como el refugio más térmico del Cuaternario tardío, lo que tiene implicaciones importantes para los argumentos existentes sobre la larga supervivencia de los neandertales en las regiones más meridionales de la península ibérica. No es sorprendente que Gibraltar, los territorios costeros atlánticos, como Doñana o Algarve-Estremadura y las riberas del mediterráneo español representasen una zona de refugio durante las etapas frías del Pleistoceno y, de hecho, parece predecible que la extinción progresiva de los neandertales siguiera una clara dirección de continental a oceánica, que finalizó en el cinturón costero del sur de Iberia, hace unos 35.000 años.

LA IMPRESIÓN 3D, UNA NUEVA TECNOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN METÁLICA

*Resumen de la conferencia pronunciada por
el Ilmo. Sr. D. Jaime Domínguez Abascal,
el día 5 de marzo de 2024*



La conferencia completa se puede ver en:

[La impresión 3D, una nueva tecnología para la fabricación metálica.](#)

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, abarca una variedad de técnicas, cada una adecuada para unos materiales específicos y se encuentra en diferente etapa de desarrollo. Unas pueden ser especialmente indicadas para materiales poliméricos, cerámicos o metálicos y algunas son aplicables a varios tipos de materiales.

Entre las técnicas presentadas, aquellas especialmente diseñadas para la fabricación de elementos metálicos son novedosas y aún están en desarrollo. Sin embargo, ya se aplican ampliamente en sectores industriales específicos, como el de los implantes quirúrgicos y prótesis, el sector aeroespacial, la automoción y los intercambiadores de calor. A pesar de su creciente adopción, estas técnicas enfrentan diversos retos antes de su aplicación generalizada en los procesos industriales. Entre estos desafíos se encuentran los altos costes de fabricación y la dificultad para su aplicación en casos que requieren resistencia a cargas cíclicas.

Los defectos internos de las piezas metálicas fabricadas mediante impresión 3D, la rugosidad superficial, las tensiones residuales generadas durante la fabricación y, en ocasiones, la microestructura, hacen necesarios tratamientos térmicos y mecánicos posteriores para aumentar la resistencia a cargas cíclicas, conocida como resistencia a fatiga. A pesar de estos tratamientos, persisten aspectos relacionados con la heterogeneidad de los pequeños defectos internos que dificultan garantizar una alta fiabilidad y exigen complejos procesos de certificación antes de su puesta en servicio.

CIENCIA PARA UNA DEMOCRACIA RESPONSABLE

*Conferencia impartida por
el Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta
Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias,
el día 9 de abril de 2024.*



Me gustaría empezar agradeciendo a Fernando Fabiani, Secretario General del Excelentísimo Ateneo de Sevilla, que un día más nos acoja en esta casa, sede del Ateneo. Como ya es tradición, todos los años, desde hace muchos, celebramos estos ciclos de conferencias “Los Martes de la Academia” aquí en el Ateneo. Por supuesto, gracias también a todos los que habéis tenido la amabilidad de acompañarnos esta tarde, entre los que incluyo a un grupo de alumnos de la asignatura Bioquímica, Biotecnología y Sociedad, perteneciente al Grado de Bioquímica de la Universidad Hispalense, a los que he animado a venir por ser el tema de la conferencia de hoy uno de los que tratamos en dicha asignatura. Agradezco asimismo a Fernando Pérez Ávila, redactor del Diario de Sevilla, que martes tras martes elabora la reseña de estas conferencias para su publicación en el periódico, dándole así mayor visibilidad y proyección social a la Real Academia Sevillana de Ciencias y sus actividades.

Hoy vamos a hablar de “Ciencia para una Democracia Responsable” (Ilustración 1). El título de la conferencia inspira toda una serie de reflexiones acerca de la relación que pueda existir entre ciencia y democracia, política y sociedad, en el mundo moderno en el que hoy nos encontramos. Del título se puede inferir que sin ciencia no hay democracia, que sin ciencia el voto del ciudadano no es responsable. Es una aseveración que suena rotunda, pero en buena parte se ajusta a la realidad. Es lo que voy a tratar de explicar y demostrar en el día de hoy pues el conocimiento científico, la formación de los ciudadanos es esencial cuando estos van a las urnas a depositar su papeleta.

Todos tenemos una idea de lo que es la ciencia, y diferenciamos ciencias experimentales y ciencias sociales. Ciencia, según el diccionario de la Real Academia Española de la Lengua, es “el conjunto de conocimientos que se obtiene mediante la observación y el razonamiento sistemáticamente estructurados, y de los que se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente”. En una segunda acepción, ciencia es “el saber, la erudición”; por ejemplo, se habla de “tener mucha, o poca, ciencia. Ser un pozo de ciencia. Hombre de ciencia y virtud” (Ilustración 2). Podemos, por tanto, decir que la ciencia es el acervo cultural de la humanidad generado y acumulado a lo largo de la historia a partir de la observación de la naturaleza, con un orden sistemático y razonamientos que conducen a la interpretación lógica de lo

ILUSTRACIÓN 1



Real Academia
Sevillana de Ciencias



Ciencia para una Democracia Responsable

Miguel A. De la Rosa

09 Abril 2024 – Sevilla



Junta de Andalucía



Real Maestranza
de Castañeros de Sevilla



Fundación
Cajal



Fundación
avesa



Real Academia
de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales



Real Academia
de Ciencias de Sevilla



Real Academia
de Ciencias de Sevilla



Real Academia
de Ciencias de Sevilla

ILUSTRACIÓN 2



Real Academia
Sevillana de Ciencias



Ciencia –

- Conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente.
- Saber o erudición. *Tener mucha, o poca, ciencia. Ser un pozo de ciencia. Hombre de ciencia y virtud.*



observado. El padre de la ciencia moderna, Galileo Galilei, con sus planos inclinados fue el primero en realizar experimentos para estudiar las fuerzas gravitatorias (Ilustración 3).

ILUSTRACIÓN 3

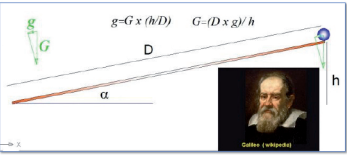


Real Academia
Sevillana de Ciencias



Ciencia –

- Conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento...



¿Y qué es democracia? Todos tenemos ciertamente una idea de lo que es la democracia, pero volvamos al diccionario. Según el diccionario de la RAE en su primera acepción, democracia es el “sistema político en el cual la soberanía reside en el pueblo, que la ejerce directamente o por medio de representantes”. En una segunda acepción, democracia es la “forma de sociedad que reconoce y respeta como valores esenciales la libertad y la igualdad de todos los ciudadanos ante la ley” (Ilustración 4). Hoy en día, todos identificamos la democracia con dos de sus elementos esenciales, la urna en la que el ciudadano ejerce su derecho al voto y el parlamento, o cámara de representantes (Ilustración 5).

ILUSTRACIÓN 4

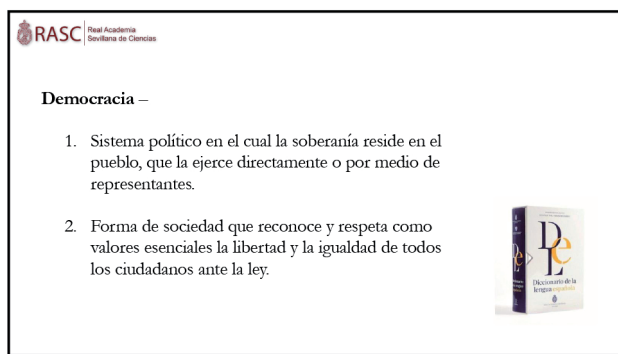
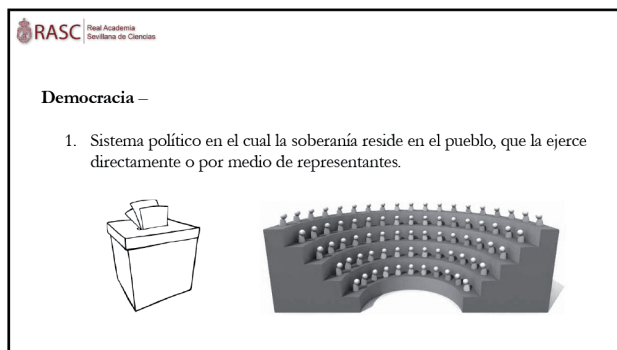


ILUSTRACIÓN 5



¿Cuál es la relación entre ciencia y democracia?, ¿por qué hoy las traemos ambas a colación?, ¿por qué decimos que sin ciencia no hay democracia responsable? (Ilustración 6). Ciencia y democracia son el resultado de la actividad intelectual y de la interacción social del hombre, es decir, de la capacidad de pensar y razonar, lo que diferencia al animal racional, como es el hombre, de todos los demás animales, a los que llamamos irracionales. Debemos admitir que el hombre es la especie más evolucionada sobre el planeta, dotada de inteligencia y raciocinio, siendo la ciencia y la democracia resultado

de su actividad intelectual y social. Fruto de esa doble actividad, el hombre ha sido capaz de elaborar las leyes propias de la ciencia y aquellas otras que gobiernan el ejercicio de la democracia (Ilustración 7).

ILUSTRACIÓN 6

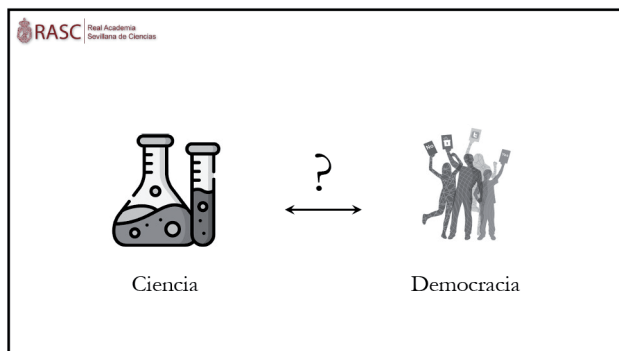
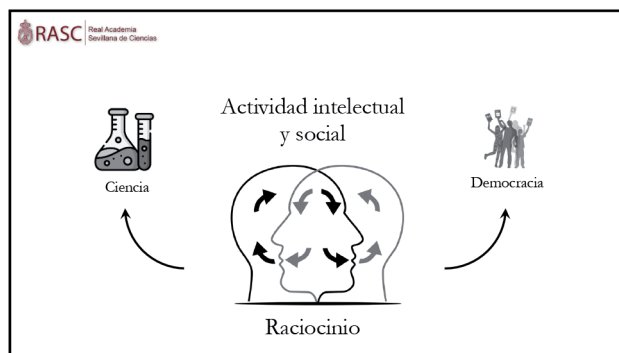


ILUSTRACIÓN 7



Podemos diferenciar dos fases importantes en el proceso evolutivo. La primera es la que llamamos hominización, es decir, la evolución de tipo biológico, con base genética, desde el primate al ser humano. Es el tránsito desde los primeros homínidos a la especie humana, al *Homo sapiens sapiens*. La hominización es un proceso que requiere cambios significativos en la dotación genética y, por consiguiente, conlleva millones de años (Ilustración 8). La segunda fase es la civilización, el proceso subsiguiente a la aparición de la especie humana, cuando el hombre aprende a vivir en sociedad, a interactuar con otros individuos de su misma especie, cuando sale de las cavernas hasta llegar a poblar las ciudades en las que vivimos actualmente. La civilización ha sido un tránsito de tipo social, mucho más corto en el tiempo, sin cambios genéticos, ocupando tan solo unas decenas de miles de años (Ilustración 9). En este mismo foro teníamos hace poco a nuestro compañero académico Joaquín Rodríguez Vidal, quien nos hablaba del neandertal que hace “apenas” 150.000 años deambulaba por aquí cerca, por las arenas de la

ILUSTRACIÓN 8

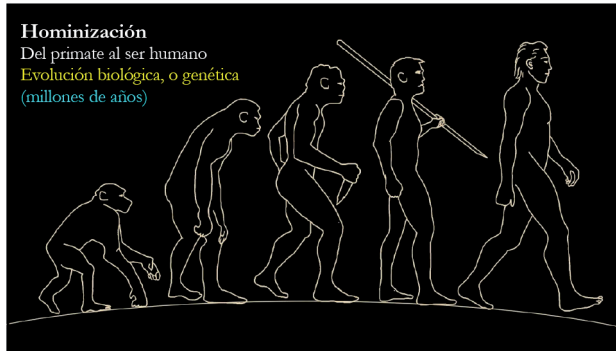


ILUSTRACIÓN 9



playa de Matalascañas, Huelva. La civilización es la que ha permitido el desarrollo de la ciencia y la democracia, toda vez que el primate se ha convertido en hombre y ese hombre empieza a razonar, a pensar, a observar la naturaleza, y aprende a vivir en sociedad, a convivir con otros individuos de la misma especie.

Para que os hagáis una idea del tiempo que ha requerido la evolución intelectual, cultural y social del hombre asociada a la civilización, incluyendo el desarrollo de la ciencia y la democracia, imaginemos que proyectamos en una película de 24 horas, de un día completo de duración, la serie de eventos sucedidos en el planeta desde la explosión de la estrella que dio lugar al sistema solar hasta nuestros días. Tras la formación del Sol y todos sus planetas, incluida la Tierra, se sucedió toda una serie de acontecimientos evolutivos sucesivos en la Tierra de carácter físico, químico y biológico que desembocaron en la aparición del hombre. Si revisamos el proceso completo en esa película imaginada de 24 horas, veremos que la civilización apenas ocuparía un fotograma fugaz, unas décimas de segundos al final de la película (Ilustración 10). La civilización, que nos puede parecer infinitamente larga y tortuosa, lenta y procelosa, es insignificante en la escala de tiempo geológico. Sus pocas decenas de miles de años son un abrir y cerrar de ojos en comparación con los 4.500 millones de años transcurridos desde la

ILUSTRACIÓN 10

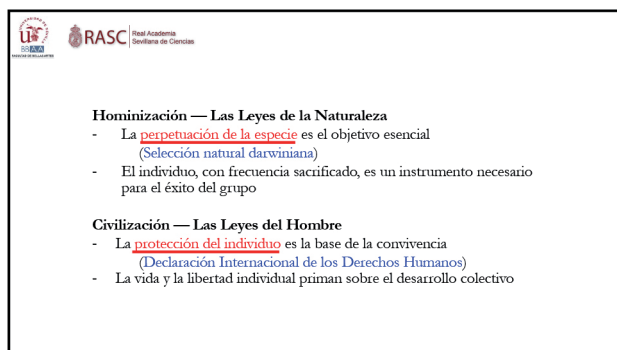


formación de la Tierra, y no digamos en comparación con los 13.500 millones de años del universo desde su creación tras el big-bang.

Es importante resaltar las diferencias entre las leyes fundamentales que gobiernan la hominización y la civilización. La primera, la transición del primate al ser humano, es un proceso dirigido por las leyes de la naturaleza, específicamente por la selección natural darwiniana. La perpetuación de la especie es el objetivo primordial, y si es necesario se sacrifica al individuo por el bien de la especie. Cuando el hombre comienza a pensar, razonar y desarrollar leyes de convivencia, se produce un cambio total. El individuo pasa a ser el protagonista, y en lugar de priorizar a la especie, al conjunto, se prioriza al individuo. Las leyes del hombre, creadas por nosotros mismos, tienen como finalidad la protección de la vida y la libertad individual. Este es, sin duda, el gran logro de la civilización: la libertad y el respeto a la vida, que condicionan el desarrollo social (Ilustración 11).

Resulta, por tanto, crucial entender esta distinción entre las leyes naturales y las leyes de la civilización para comprender la evolución social que nos ha conducido hasta hoy y, sobre todo, el progreso basado en la inteligencia colectiva, es decir, en el buen hacer de un grupo de individuos trabajando de manera organizada y sincronizada. La inte-

ILUSTRACIÓN 11



ligencia colectiva la definió George Por, investigador de la Universidad de Ámsterdam, allá por los años 70, como la “capacidad de las comunidades humanas de evolucionar hacia un orden de una complejidad y armonía mayor, tanto por medio de mecanismos de innovación, como de diferenciación e integración, competencia y colaboración” (Ilustración 12).

ILUSTRACIÓN 12



Inteligencia colectiva

“Capacidad de las comunidades humanas de evolucionar hacia un orden de una complejidad y armonía mayor, tanto por medio de mecanismos de innovación, como de diferenciación e integración, competencia y colaboración”.

George Por (Universidad de Ámsterdam)



La *driving force*, el motor esencial de esa inteligencia colectiva, es lo que Adam Smith, el padre de la economía moderna, llamó egoísmo individual, la fuerza que impulsa a las comunidades a progresar. Es decir, si los individuos, cada uno de ellos, vela por su bien y actúa de manera egoísta, tratando de mejorar, entonces el conjunto se mueve. En su libro *La riqueza de las naciones* (1776), Adam Smith escribe: “No obtenemos los alimentos de la benevolencia del carnicero, del cervecero o del panadero, sino de su preocupación por su propio interés. No nos dirigimos a sus sentimientos humanitarios, sino a su egoísmo, y nunca hablamos de nuestras necesidades, sino de sus propias ventajas” (Ilustración 13). En un artículo en *El País* en 2017, el premio Nobel peruano Mario Vargas Llosa convierte en virtud social el egoísmo individual de Adam Smith: “En verdad, él fue el primero en explicar a los seres humanos por qué y cómo opera el sistema que

ILUSTRACIÓN 13



Egoísmo individual
Motor impulsor de la Inteligencia colectiva

“No obtenemos los alimentos de la benevolencia del carnicero, del cervecero o del panadero, sino de su preocupación por su propio interés. No nos dirigimos a sus sentimientos humanitarios, sino a su egoísmo, y nunca hablamos de nuestras necesidades, sino de sus propias ventajas”.

Adam Smith. *La riqueza de las naciones* (1776)



nos sacó de las cavernas [...] Un sistema simple y a la vez complejísimo, fundado en la libertad, que transforma el egoísmo en una virtud social” (Ilustración 14). No entendamos, pues, el afán del individuo por progresar como algo indigno o condenable, antes al contrario, veámoslo como esa virtud social que hace que el conjunto se mueva cuando cada individuo, respetando a los demás, lucha por su propio desarrollo.

ILUSTRACIÓN 14



Los cuatro elementos que conforman el ciclo del progreso colectivo en el mundo moderno son: sociedad, gobierno, ciencia-técnica y economía. El primero, la sociedad, confía al gobierno la responsabilidad de dirección y gestión de lo público; el gobierno, a su vez, promueve el avance del conocimiento científico-técnico necesario para impulsar la economía, que, en última instancia, persigue el bienestar social (Ilustraciones 15 y 16). (En un principio, la técnica fue antes que la ciencia, esto es, los artesanos y maestros, creando utensilios para facilitar la vida del ciudadano, precedieron a los científicos.)

Emilio Lamo de Espinosa –fundador y director del Real instituto Elcano, el primer *think tank* español–, en su libro *Águilas y dragones: El declive de Occidente*, premio Espasa 2021, visualiza la situación geopolítica actual a nivel global como un enfrenta-

ILUSTRACIÓN 15

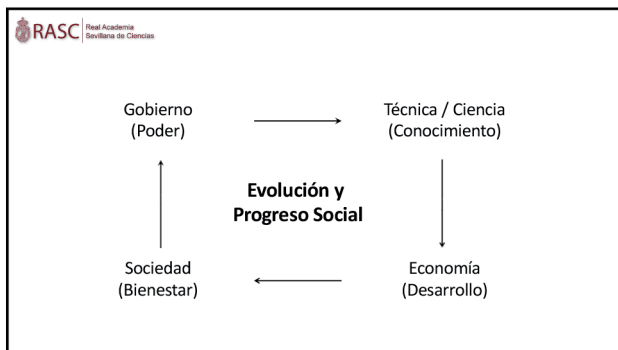
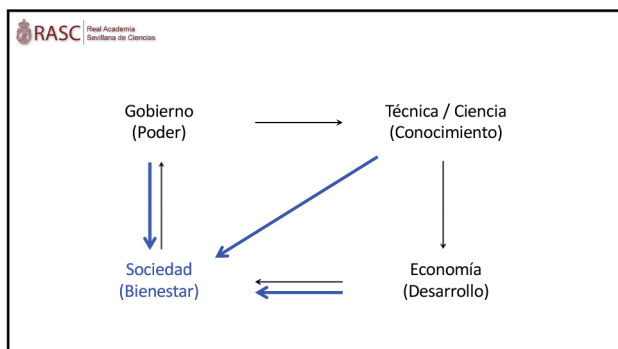


ILUSTRACIÓN 16



miento entre dos culturas, entre dos continentes, a saber: Estados Unidos de América y China. De ahí el título, entre águilas y dragones. Es un enfrentamiento económico y comercial, más que armamentístico, entre los dos grandes países dominantes. Para Lamo de Espinosa, el mundo moderno occidental se sustenta en torno a una triada institucional esencial compuesta por la política, la economía y la cultura (Ilustración 17). O, en otras palabras, las tres articulan el vector de la actual globalización: democracia (o política), libre mercado (o economía) y ciencia (o cultura). No son tres piezas independientes, que pueden o no darse juntas, sino más bien los lados del mismo triángulo, un triángulo institucional, cuyo centro lo ocupa la libertad (Ilustración 18). Y así volvemos a la libertad individual, a la libertad de acción y pensamiento de la que hablábamos antes, de modo que cada uno de los tres pilares citados refuerza a los otros dos (Ilustración 19).

En base a esos tres pilares institucionales, las sociedades modernas se articulan y esfuerzan en preservar y defender la libertad de sus miembros como fin último esencial. La libertad individual se erige, pues, en el centro y objetivo principal del quehacer común, emergiendo como el gran logro de la civilización, el mayor éxito de la especie humana en su evolución social y colectiva. Así queda simbolizado por la figura *Libertad iluminando el Mundo*, más conocida como Estatua de la Libertad, que recibe a los vi-

ILUSTRACIÓN 17

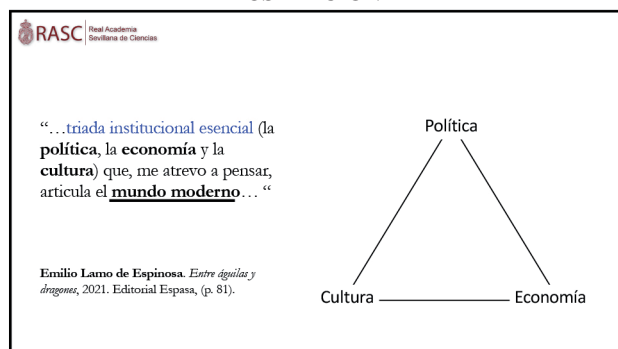


ILUSTRACIÓN 18

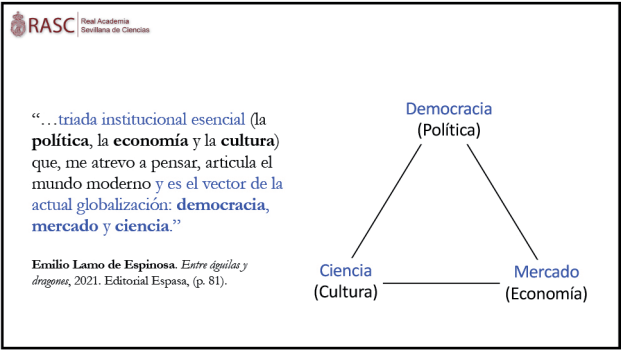
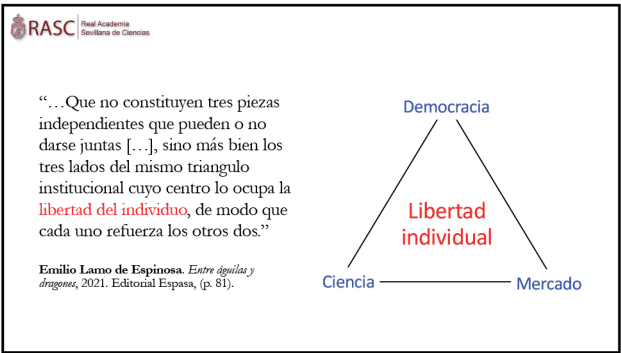


ILUSTRACIÓN 19



sitantes que llegan a Nueva York. Fue un regalo de Francia, de la República francesa, a los estadounidenses en 1886 como prueba de amistad y para conmemorar el centenario de la *Declaración de Independencia de los Estados Unidos* (Ilustración 20).

ILUSTRACIÓN 20



Si analizamos las relaciones entre esos tres pilares que sustentan la libertad, la existente entre ciencia/cultura y mercado/economía resulta evidente (Ilustración 21). No queda tan lejano el momento en que los gobiernos occidentales –a raíz del proyecto Manhattan para la fabricación de la bomba atómica, con la que se dio fin a la segunda guerra mundial– se dieron cuenta de que científicos e ingenieros, trabajando juntos, pueden acelerar el desarrollo tecnológico y, por ende, el progreso económico. Fue Vannevar Bush, presidente del Instituto Tecnológico de Massachusetts (conocido como MIT, por sus siglas en inglés) e impulsor de la prestigiosa *National Science Foundation*, quien, al poco de finalizar la guerra, en su trabajo titulado *Science: the Endless Frontier* (1945), sentó las bases del modelo científico-económico moderno basado en la financiación pública de la ciencia (Ilustración 22).

ILUSTRACIÓN 21

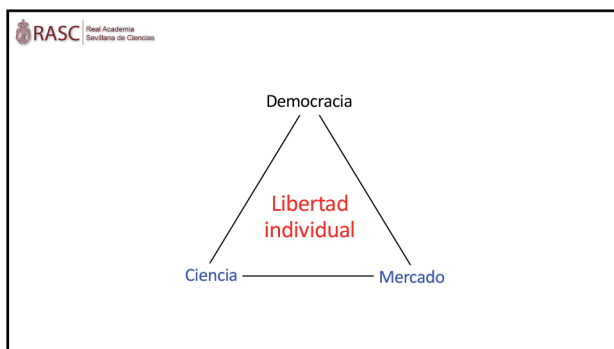


ILUSTRACIÓN 22

Ciencia y Mercado

Vannevar Bush (1890-1974), presidente del MIT y organizador de la National Science Foundation, sentó las bases del sistema científico-tecnológico moderno en su trabajo *Science: the Endless Frontier* (1945).

El modelo de Bush, que aún hoy perdura, contempla una economía impulsada por el sistema científico tecnológico gubernamental, es decir, financiado con los impuestos de los ciudadanos. El modelo dio origen, en pocas décadas, al debate político-social, tantas veces abordado, entre ciencia básica y ciencia aplicada. En realidad, la discusión se focaliza sobre el papel de los científicos que trabajan con fondos públicos. ¿Deben

centrarse en la generación de nuevos conocimientos, independientemente de su posible utilidad? ¿O, por el contrario, deben esmerarse en buscar y encontrar soluciones a los problemas de los ciudadanos usando y aplicando el conocimiento del que ya se dispone?

La diferencia entre proyectos de ciencia básica y de ciencia aplicada –es decir, entre los que generan conocimientos y los que resuelven problemas– se puede resumir en un diagrama de Pareto, en el que la generación de nuevo conocimiento se representa frente a la previsibilidad de los resultados obtenidos (Ilustración 23). De un proyecto cuyos resultados se prevén desde el inicio no cabe esperar grandes descubrimientos. Por contra, de un proyecto cuyos resultados sean imprevisibles, la probabilidad de conseguir grandes descubrimientos es mucho más alta. Como se dice en inglés, el primero sería un proyecto *low risk & low gain* (bajo riesgo, baja ganancia), en tanto el segundo sería *high risk & high gain* (alto riesgo, alta ganancia) (Ilustración 24). La responsabilidad de financiar un tipo u otro de proyectos corresponde a los dirigentes políticos, administradores de la hacienda pública, aunque con el consejo y recomendación de los científicos y técnicos, con los que no siempre cuentan. A la postre, es el debate que se deriva de la interacción entre ciencia y economía, y que los políticos deben dirimir. ¿Qué hacer con el dinero de los ciudadanos? No siempre es fácil convencer a los gobiernos de la apuesta por el alto riesgo si queremos realmente tener alta ganancia. Pero este es otro debate.

ILUSTRACIÓN 23

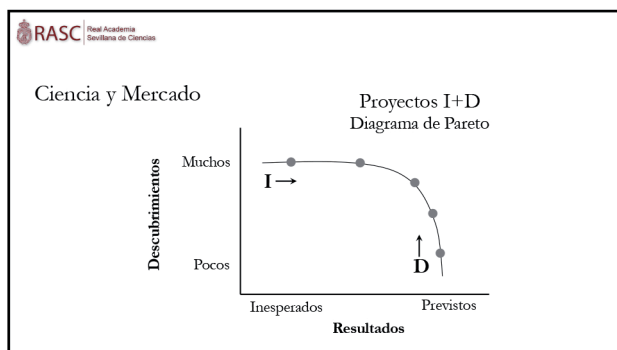
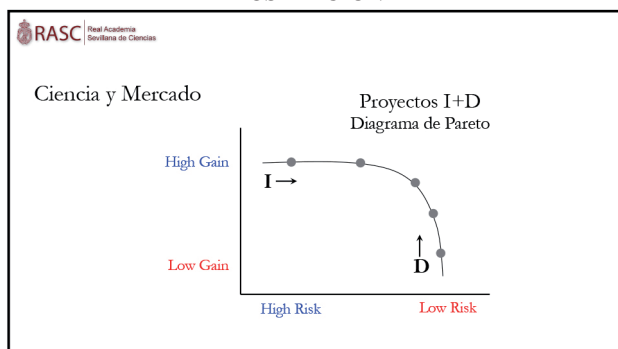
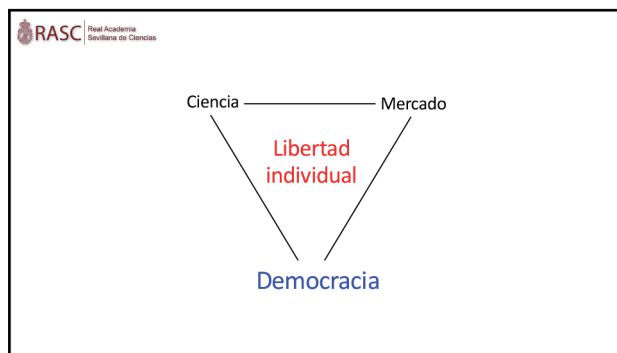


ILUSTRACIÓN 24



Volvamos al tercer pilar de Lamo de Espinosa, a la democracia. Y démosle la vuelta al triángulo para que la democracia quede en el vértice inferior, con la ciencia y el mercado en los vértices superiores (Ilustración 25). Es evidente que la democracia es el sustento, la base de todo lo demás, de la ciencia y el mercado: Si no hay democracia difícilmente podremos conseguir el progreso económico impulsado por el desarrollo científico-técnico.

ILUSTRACIÓN 25



Hemos visto antes la definición que nos da el diccionario de la Real Academia Española. Todos tenemos una idea precisa de qué es la democracia, pero ¿realmente ejercemos la democracia de manera responsable? En la Grecia clásica, la democracia se refería al gobierno por la mayoría del pueblo. Todos los ciudadanos varones (*los dēmos*) tenían libertad de expresión y participación directa en el ámbito político. (No es el momento de entrar en ello, pero el sistema democrático ateniense asumía y aceptaba como normal la discriminación de las mujeres.) Eran los varones los que tenían la libertad de votar y participar directamente en el ámbito político. La democracia de hoy, en cambio, es una democracia representativa, en la que el poder político reside en los ciudadanos, en el pueblo, pero este lo ejerce a través de sus representantes, no de manera directa. Los representantes elegidos por el pueblo democráticamente mediante sufragio universal es otro de los grandes logros de las sociedades modernas, hace apenas cien años, cuando todos los ciudadanos pudieron empezar a votar iguales ante la ley. Es la democracia occidental, una democracia representativa y parlamentaria mediante sufragio universal (Ilustración 26).

Los dirigentes políticos son elegidos democráticamente por los ciudadanos para que den soluciones a sus problemas. Así, cuando vamos a votar, a depositar el voto en las urnas, los ciudadanos elegimos entre las soluciones que nos presentan los candidatos y optamos por aquéllas que nos parecen más adecuadas. Es el juego de la democracia moderna, simple y directa (Ilustración 27). El acto de depositar el voto se complica, sin embargo, debido a la gravedad de los problemas actuales. Son problemas de complejidad creciente, que afectan a todo el planeta y requieren soluciones globales. Todos tenemos referencias muy recientes y cercanas, como la pandemia COVID-19, con lar-

ILUSTRACIÓN 26

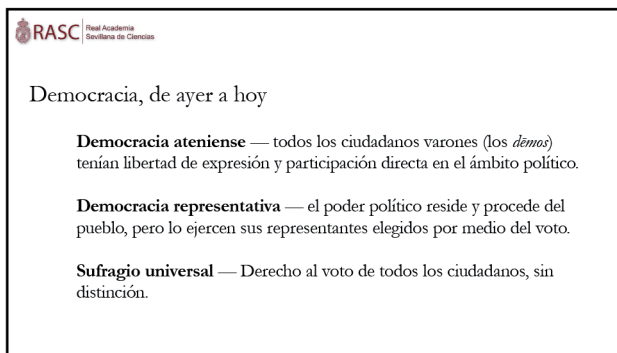
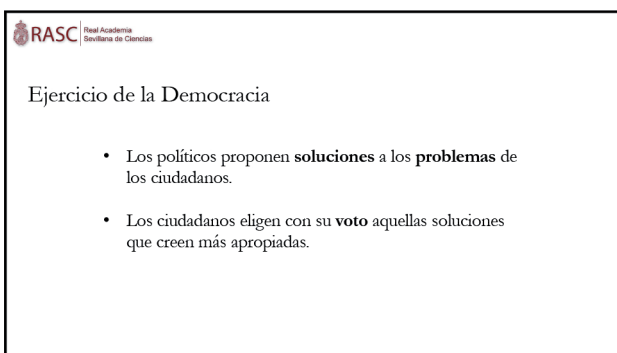


ILUSTRACIÓN 27



gos periodos de confinamiento, falta de vacunas y mascarillas, etc., por no hablar de la improvisación e incertidumbre inicial en cuanto a la aplicación de medidas y diseño de estrategias. Otro problema global son las noticias falsas (conocidas también como fake news), sin acreditación de las fuentes de información, que inundan las redes y el móvil de todos nosotros y facilitan la manipulación de la opinión pública (Ilustración 28). Las nuevas tecnologías, evidentemente, también tienen su lado negativo. La lista de problemas globales con los que hoy nos enfrentamos las sociedades modernas es interminable, a saber: emisión de agentes contaminantes, cambio climático, sostenibilidad del planeta, fuentes de energía, gestión del agua, agricultura y alimentación, salud y envejecimiento, inteligencia artificial, crecimiento demográfico, nuevas tecnologías, etc. (Ilustración 29).

Todas estas situaciones requieren soluciones globales, pero también aproximaciones científico-técnicas. Sin una base sólida en ciencia y técnica, difícilmente se pueden encontrar soluciones a esos problemas. Recientemente, en una entrevista para la revista de la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular, me preguntaron precisamente sobre este tema: la relación entre ciencia y política, así como entre ciencia y sociedad (Ilustración 30). Les respondí que todos hemos aprendido mucho de la pan-

ILUSTRACIÓN 28

Real Academia
Sevillana de Ciencias

Ciencia y Sociedad

Lista creciente de problemas
ciudadanos que requieren
soluciones a nivel global:

- COVID19 – confinamiento, vacunas
- “Fake news”
- Emisiones de CO₂
- ...

ILUSTRACIÓN 29

Real Academia
Sevillana de Ciencias

Ciencia y Sociedad

Lista creciente de problemas
ciudadanos que requieren
soluciones a nivel global...

...y que requieren
aproximaciones
científicas y tecnológicas.

- Cambio climático
- Sostenibilidad del Planeta
- Fuentes de Energía
- Gestión del Agua
- Agricultura y Alimentación
- Salud y Envejecimiento
- Inteligencia Artificial
- Nuevas Tecnologías
- Crecimiento demográfico

ILUSTRACIÓN 30

Real Academia
Sevillana de Ciencias

Ciencia y Política

“Quienes nos permitieron volver a la calle
fueron los científicos con las vacunas, y la
sociedad se ha dado cuenta de la importancia de
la ciencia y la gestión científica en la lucha
continuada contra la pandemia. Al igual que
tenemos ministerios incuestionables de
Economía, Defensa o Interior, la Ciencia
merece el rango permanente de ministerio, y
¿por qué no, con categoría de vicepresidencia?”



ENTREVISTA

Miguel Ángel de la Rosa
Secretario General de FEBB y exdirector de SEBBM

demia. La pandemia es causada por un virus, un agente agresor que nos invade como cualquier enemigo o terrorista que puede acecharnos, afectando la economía del país y causando la muerte de los ciudadanos. Pero no estábamos preparados para responder a este tipo de agentes externos, y nuestros sistemas de defensa tampoco estaban preparados para afrontar este tipo de amenazas.

Al poco de estallar la pandemia salieron al frente médicos y científicos. Al principio, durante el confinamiento, todos aplaudíamos a las 20:00 h desde los balcones. Aplaudíamos a los médicos porque nos curaban en los hospitales, y nos devolvían a casa, pero seguíamos confinados. Los que realmente nos permitieron recuperar la libertad, volver a la calle, interactuar unos con otros, fueron los científicos con las vacunas. La gente ha entendido, ahora más que nunca, la importancia de la ciencia para resolver sus problemas. En la citada entrevista dije que la ciencia, si algo necesita, es estabilidad, compromiso social y político, y exigencia por parte de los ciudadanos. Estamos acostumbrados a que existan en los gobiernos ministerios incuestionables, como el Ministerio de Defensa, de Justicia, de Interior o de Asuntos Exteriores, y nadie los discute. Incluso muchos de ellos tienen rango de vicepresidencia con alta responsabilidad. El Ministerio de Ciencia, sin embargo, no siempre tiene entidad propia y, con frecuencia, se ve fusionado con el de Universidades, Economía, etc. Rajoy no lo quiso como ministerio y lo dejó como secretaría de estado. Ahora, más que nunca, necesitamos un Ministerio de Ciencia fuerte e independiente pues los problemas que enfrentamos son suficientemente serios como para justificar un ministerio bien consolidado y, ¿por qué no?, con rango incluso de vicepresidencia. Los problemas de hoy son tan graves y requieren tanto conocimiento científico-técnico que necesitamos gente preparada, formada y capaz de responder con agilidad, para no quedar tan desprotegidos como estuvimos durante la pandemia.

Margaritis Schinás, vicepresidente de la Comisión Europea, afirmó algo importante en el foro Joly el pasado 4 de abril, hace solo cinco días: “Europa debe poner fin a la época de inocencia e ingenuidad y apostar por la autonomía y la asertividad” (Ilustración 31). Por primera vez oímos a un dirigente europeo reconocer en público que ha habido un fracaso estratégico grave en la política de la Unión Europea. Creíamos que Europa era un paraíso y que todos nos respetarían, como si estuviéramos en una isla de bienestar rodeada por la selva. De pronto nos dimos cuenta de que comprábamos energía barata a nuestros “amigos” rusos, que ya no son tan amigos, y chips a los taiwaneses y coreanos, que empezaron a tener problemas con el envío de estos componentes, por no hablar de las mascarillas y los respiradores para afrontar la pandemia que tuvimos que conseguir prácticamente haciendo cola en el mercado chino. Europa ha aprendido que

ILUSTRACIÓN 31



Ciencia y Política

“Europa debe poner fin a la época de inocencia e ingenuidad, y apostar por la autonomía y la asertividad.”

“El próximo Gobierno comunitario tendrá un comisario dedicado a la defensa y al rearme militar.”



Margaritis Schinas,
Vicepresidente de la Comisión Europea

En Foro Joly, Sevilla – 4 Abril 2024

la globalización no es tan recomendable desde un punto de vista estratégico. Es por eso que sus dirigentes han decidido dejar atrás esa época de ingenuidad e inocencia, y apostar por la autonomía y la asertividad, como dijo Schinás, quien también comentó que el próximo gobierno comunitario tendrá un comisario para la defensa y el rearme militar. En política, los errores se pagan caro, y al final somos los ciudadanos los que pagamos. ¡Pero el aislamiento entraña sus riesgos! Debemos ser conscientes de que nos enfrentamos a problemas globales, cuyas soluciones requieren abordajes globales y, sobre todo, conocimientos científico-técnicos y una preparación adecuada, que a veces falta.

La democracia en el mundo moderno requiere, lógicamente, que el ciudadano ejerza su derecho a votar, pero para ejercer ese derecho con responsabilidad, el ciudadano debe estar formado e informado cuando se le consulta. De este modo, cuando va a depositar su voto, lo puede hacer de manera cualificada, meditada y responsable (Ilustración 32). De lo contrario, nos adentramos en la “oclocracia”, de la que ya hablaba Polibio en la Grecia clásica al referirse a los peligros de la democracia. Cuando la sociedad no está suficientemente formada e informada es fácil de manipular, y la democracia degenera en oclocracia. En este caso, ya no es el gobierno del pueblo formado, preparado, educado, es decir, de esa mayoría culta, sino el gobierno de la plebe, de personas que carecen de formación y conocimiento (Ilustración 33).

ILUSTRACIÓN 32



Real Academia
de Ciencias

Democracia en el mundo moderno

El ciudadano tiene el derecho –y el deber– de estar informado –y, sobre todo, formado– cuando se le consulta de modo que pueda depositar su voto de manera consciente y con conocimiento.

La base de la democracia es el sufragio universal, el voto expresado en libertad, pero un voto cualificado, meditado y responsable.

ILUSTRACIÓN 33

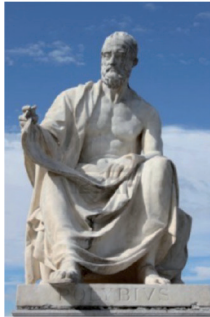


Real Academia
de Ciencias

Los Peligros de la Democracia

La **democracia** (o gobierno del *pueblo*, educado) degenera, por la **acción demagógica** de los gobernantes, en **oclocracia** (o gobierno de la *plebe*, no educada).

Polibio (200 – 120 a.C.)



Miguel de Unamuno, uno de nuestros más grandes pensadores del siglo XX, se refirió a la manipulación interesada del pueblo al hablar de la demagogia y el comportamiento demagógico de los dirigentes en los inicios del siglo XX en España. Unamuno introdujo el concepto de “demagogía”, que no demagogia, por analogía con pedagogía. Al igual que pedagogía se refiere a la formación, preparación y educación de los niños, la demagogía sería la formación, preparación y educación del pueblo para que pueda ejercer la democracia de manera correcta (Ilustración 34).

Si bien su especialidad era la literatura y la lengua, Unamuno decía que su labor fundamental como catedrático de universidad era disciplinar y avivar la mente de sus alumnos. Su objetivo no era simplemente informar, sino formar. Desafortunadamente, esa labor educativa, más allá de la mera transmisión de información, se echa en falta en los profesores de hoy, tanto en universidades como en colegios. Como bien señala Unamuno, la función de cualquier docente no es solo transmitir datos, sino educar y ayudar a los alumnos a desarrollarse como ciudadanos responsables, o lo que él llamaba “poiesis educativa” (Ilustración 35).

ILUSTRACIÓN 34



Deformación *versus* formación

Demagogia — deformación consistente en manipulación interesada del pueblo.

Demagogía — pedagogía (educación) del pueblo, arte mayor.

Miguel de Unamuno (1864-1936)



ILUSTRACIÓN 35



Demagogía — Poiesis educativa

“Tengo mi cátedra, procuro en ella, no sólo enseñar la materia que me está encomendada, sino disciplinar y avivar la mente de mis alumnos, obrar sobre cada uno de ellos, *hacer obra pedagógica*.”

Miguel de Unamuno (1864-1936)



Con frecuencia se confunde información y conocimiento, pero existe una diferencia crucial entre ambos, según nos aclara de nuevo el diccionario de la RAE (Ilustraciones 36 y 37). Con toda seguridad hoy tenemos más información que nunca y, en proporción, menos conocimiento que nunca. Pongamos el siguiente ejemplo: Si tomamos el diccionario, encontraremos una gran cantidad de palabras, casi cien mil, desde la “a” hasta la “z”. Imaginemos que elegimos treinta y tres palabras al azar, como “acordarme”, “larga”, “lanza” o “lugar”, y las combinamos de todas las formas posibles. Solo con esas treinta y tres palabras tendríamos aproximadamente 10^{36} posibilidades combinatorias, pero solo una de ellas correspondería a una frase tan emblemática como la del inicio de *El Quijote*: “En un lugar de la Mancha, de cuyo nombre no quiero acordarme...” (Ilustraciones 38-40). Esas mismas palabras del diccionario estaban y están accesibles y asequibles a todo el mundo, pero solo Cervantes fue capaz de combinarlas de manera tan magistral, de transformar la información en conocimiento. El diccionario es información, accesible a todo el mundo, en tanto un libro es una obra original del autor, que se sirve de esa información para transformarla en conocimiento, en ideas propias y originales (Ilustración 41). La transformación de información en conocimiento es precisamente lo que debemos enseñar en las aulas, tanto en universidades como en colegios.

ILUSTRACIÓN 36



RASC Real Academia
Sevillana de Ciencias

Demagogía — Poiesis educativa:

De la Información al Conocimiento

Información —

1. Acción y efecto de informar.
2. Oficina donde se informa sobre algo.



ILUSTRACIÓN 37



RASC Real Academia
Sevillana de Ciencias

Demagogía — Poiesis educativa:

De la Información al Conocimiento

Conocimiento —

1. Acción y efecto de conocer.
2. Entendimiento, inteligencia, razón natural.



ILUSTRACIÓN 38



Información – Diccionario



acordarme	lanza
adarga	los
antigua	lugar
astillero	Mancha
corredor	mucho
cuyo	no
de	no
de	nombre
de	que
de	quero
En	rocin
en	tiempo
flaco	un
galgo	un
ha	vivía
hidalgo	y
la	

33 palabras

8.6×10^{36} ordenaciones

ILUSTRACIÓN 39



Información y Conocimiento

acordarme	lanza
adarga	los
antigua	lugar
astillero	Mancha
corredor	mucho
cuyo	no
de	no
de	nombre
de	que
de	quero
En	rocin
en	tiempo
flaco	un
galgo	un
ha	vivía
hidalgo	y
la	

→

En	vivía
un	un
lugar	hidalgo
de	de
la	los
Mancha	de
de	lanza
cuyo	en
nombre	astillero
no	adarga
quero	antigua
acordarme	rocin
no	flaco
ha	y
mucho	galgo
tiempo	corredor
que	

ILUSTRACIÓN 40



Conocimiento – Don Quijote



«En un lugar de la Mancha, de cuyo nombre no quiero acordarme, no ha mucho tiempo que vivía un hidalgo de los de lanza en astillero, adarga antigua, rocin flaco y galgo corredor...».

De acuerdo con la demagogía de Unamuno, educando a los alumnos contribuiremos a formarlos como ciudadanos y ayudarles a ejercer su voto de manera meditada, responsable y cualificada.

ILUSTRACIÓN 41



¿Y por qué todo este preámbulo? Pues precisamente porque una de las labores fundamentales de las academias –y, en concreto, de las academias de Ciencias– en el mundo tecnificado actual, que requiere soluciones científico-técnicas, es jugar un papel social bien definido. De hecho, así se recoge en nuestros estatutos, al hablar de la naturaleza y objeto de la Real Academia Sevillana de Ciencias, cuyo artículo primero la define como una corporación de derecho público dedicada al cultivo, fomento y difusión de la ciencia y sus aplicaciones. Difundir la ciencia, educar y formar es, por tanto, una de nuestras funciones fundamentales, para que el ciudadano pueda estar cualificado al ejercer su derecho al voto (Ilustración 42).

ILUSTRACIÓN 42

El contenido de la ilustración es el siguiente:

Demagogía (o poiesis) científica

Estatutos de la RASC
Artículo 1. Naturaleza y objeto.

La “Real Academia Sevillana de Ciencias» es una Corporación de Derecho Público para el **cultivo, fomento y difusión** de las Ciencias y sus aplicaciones en general.

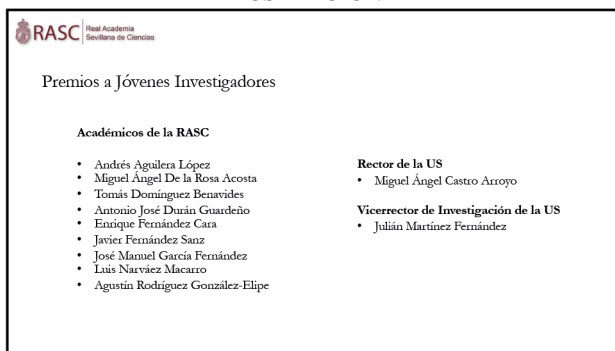
Podríamos decir, por tanto, que la Real Academia Sevillana de Ciencias (RASC) ejerce una “demagogía científica” dirigida al público en general. La academia organiza toda una serie de actividades bien consolidadas y con amplio prestigio (Ilustración 43). Entre las más significativas podemos mencionar los Premios a Jóvenes Investigadores en colaboración con la Real Maestranza de Caballería de Sevilla, destinados a reconocer la labor de científicos emergentes en los inicios de sus carreras, o los ciclos conocidos como los Martes de la Academia, con conferencias de divulgación en el Ex-

ILUSTRACIÓN 43



celentísimo Ateneo de Sevilla, abiertas a la sociedad. Asimismo, organizamos un ciclo sobre Historia y Filosofía de la Ciencia, en colaboración con la Facultad de Química, y conferencias sobre temas de actualidad e interés social igualmente abiertas al público, patrocinadas por la Fundación Cajasol. Y participamos en varios ciclos interacadémicos, con objeto de fomentar y facilitar la comunicación con otras academias de Andalucía. Algunas de estas actividades, como los Premios a Jóvenes Investigadores, son particularmente prestigiosas y reconocidas. De hecho, una cuarta parte de los académicos de la RASC recibieron, cuando eran jóvenes, este premio. Por ejemplo, en la actualidad, la Universidad de Sevilla está dirigida por Miguel Ángel Castro, su rector, y por Julián Martínez, el vicerrector de Investigación, quienes también fueron galardonados con el Premio a Jóvenes Investigadores de la Academia (Ilustración 44).

ILUSTRACIÓN 44



En relación con el papel de la RASC en formación y educación, estamos emprendiendo nuevas iniciativas siempre dentro del contexto de esa función social que nuestros estatutos nos asignan (Ilustración 45). Así, tenemos un acuerdo prácticamente cerrado con la Universidad de Sevilla para promover diversos programas de educación del ciudadano para la democracia, en línea con lo que hemos estado discutiendo y con una

ILUSTRACIÓN 45



concepción global y holística de lo que representa la ciencia en el mundo moderno. Además, hemos firmado un protocolo con el Ayuntamiento de Sevilla para dar visibilidad y promocionar la ciencia que se desarrolla en nuestra ciudad, destacando su buen hacer en el ámbito de la investigación, el desarrollo y la innovación. También estamos impulsando un proyecto sobre arte y ciencia, en colaboración con la Facultad de Bellas Artes, que se encuentra actualmente en ejecución. El proyecto está cofinanciado por la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular, la Universidad de Sevilla y la Fundación Cajasol. Este proyecto trata sobre la inmortalización de las células, y la idea es combinar el arte y la ciencia para crear una experiencia enriquecedora (Ilustración 46).

ILUSTRACIÓN 46



Me gustaría concluir esta conferencia reiterando la necesidad de conocimiento científico en una sociedad moderna, en la que el ciudadano sea responsable de sus decisiones. No podemos depender de políticos que propongan y tomen decisiones erróneas a los que por ignorancia hemos votado. Por ejemplo, cuando un país europeo decide comprar energía barata a Rusia y, de la noche a la mañana, se da cuenta de que Rusia ya no es un aliado, de que invade un país vecino. Los precios se disparan y nuestra economía entra en crisis.

Debemos ser conscientes de la necesidad de formar y educar a los ciudadanos para que tengan capacidad de entender y discernir las soluciones que ofrecen los políticos, y para que la decisión del voto a depositar en la urna se tome de manera responsable y razonada. Este es el papel educativo hoy de las academias de ciencia, la “poiesis educativa” de la que hablaba Unamuno (Ilustración 47).

Muchas gracias por vuestra atención.

ILUSTRACIÓN 47



LA FORMACIÓN UNIVERSITARIA DESDE LA VISIÓN EMPRESARIAL

*Resumen de la conferencia pronunciada por
el Ilmo. Sr. D. Antonio Pascual Acosta,
Presidente de la Academia de Ciencias Sociales
y del Medio Ambiente de Andalucía,
el día 16 de enero de 2024*



La normativa actual que define el papel de la Universidad como centro de enseñanza superior, establece la necesidad de adecuar la demanda social de formación e investigación para conseguir la integración de estudiantes y egresados al tejido productivo y al mercado laboral.

Con dicho fin, es necesario realizar una valoración inicial que, por una parte, nos sitúe en un punto de partida y, por otra, nos oriente en aquellas cuestiones que incidan positivamente en la relación entre las actividades formativas e investigadoras de la Universidad y el tejido productivo.

Circunscribiéndonos al territorio andaluz, vía la técnica de encuesta por muestreo probabilístico, se obtiene información de aquellos aspectos que las empresas demandan de la Universidad, buscando los objetivos de estimar las necesidades de formación de profesionales del tejido productivo de Andalucía, evaluar el impacto de la formación universitaria y contribuir y orientar la oferta de formación de las Universidades, tanto en el nivel inicial de titulaciones regladas, como en la formación continua dirigida a profesionales del tejido productivo.

La encuesta se ha desarrollado sobre 700 empresas andaluzas, obteniendo información desagregada por la dimensión de las empresas según el número de trabajadores. El cuestionario se ha estructurado en siete bloques que comprenden un total de 112 preguntas, añadidas a un bloque inicial de identificación de la empresa (identificación, número de trabajadores, facturación, sector,...

De entre las conclusiones fundamentales obtenidas del análisis estadístico, atendiendo a los bloques en los que se ha estructurado el cuestionario, se obtienen las siguientes conclusiones

RELACIÓN UNIVERSIDAD-EMPRESA

- Dos de cada tres empresas no mantienen relaciones con la Universidad. Esta característica tiende a invertirse conforme aumenta el tamaño de la empresa.
- En los casos en los que se ha mantenido relación entre Universidad y Empresa, ésta está fundamentalmente justificada por convenios para la incorporación de estudiantes y/o titulados en prácticas, manifestándose un grado muy alto de satisfacción con este tipo de relación.

PERCEPCIÓN DE LA RELACIÓN UNIVERSIDAD-EMPRESA

- La Universidad se percibe como fuente de investigación y formación.
- La valoración de la relación Universidad-Empresa es baja, espacialmente en pequeñas empresas.
- Es baja la importancia que la empresa presta a su relación con la Universidad, aunque ésta sube de forma considerable conforme aumenta el tamaño de la empresa.

RECURSOS DE FORMACIÓN UNIVERSIDAD-EMPRESA

- Tres de cada cuatro empresas han desarrollado actividades de formación para sus trabajadores, aumentando de forma significativa esta proporción a medida que la empresa es de mayor tamaño. Un porcentaje bajo de empresas que desarrollan actividades de formación utilizan a la Universidad como proveedora de tal servicio. Aunque , las que lo han hecho, manifiestan un aceptable grado de satisfacción con esta relación.
- Entre otras, las actividades formativas que fundamentalmente demandan las empresas son: idiomas, uso de las TICs, digitalización, en la gestión empresarial, habilidades directivas, innovación y desarrollo de emprendedores, gestión de proyectos, economía y contabilidad, gestión de la calidad, internacionalización de la gestión y comercio exterior.

FORMACIÓN ACADÉMICA / INSERCIÓN LABORAL

- La adecuación de la formación universitaria al mercado laboral se considera débil.
- Las empresas consideran que las competencias/aptitudes que debe tener un titulado universitario han de ser, fundamentalmente, la de trabajar en equipo, la formación práctica, la motivación y disposición para el trabajo, la capacidad para resolver problemas, la aptitud para aprender y el conocimiento de idiomas.

COMPROMISO DE LA UNIVERSIDAD CON EL DESARROLLO ECONÓMICO

- En general, las empresas no identifican a la Universidad como agente involucrado en el desarrollo económico.
- Independientemente del tamaño de la empresa, la Universidad no es identificada como motor de desarrollo económico, ni piensan que tenga actualmente una organización apropiada para ejercer la función de desarrollo económico ni, en general, que las empresas estén actualmente comprometidas suficientemente con el modelo de Universidad como agente participante en el desarrollo económico. Aun así, identifican una serie de ámbitos en los que la Universidad realiza una contribución al desarrollo económico, como son: hacer posible el acceso a la formación superior, actuar como motor de la innovación gracias a las actividades de transferencia de tecnología, adecuar sus titulaciones a las necesidades de formación de su ámbito territorial de influencia, apoyar a las pequeñas y medianas empresas y actuar como socios de proyectos de investigación con las empresas.

TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

- Las empresas creen que la Universidad debe favorecer (mediante la aportación de recursos humanos, físicos y financieros) la creación de empresas de base tecnológica y potenciar la estancia de profesores universitarios en empresas y de personal especializado de las empresas en las Universidades.
- En un porcentaje muy alto, las empresas no recurren a la Universidad para llevar a cabo contratos I+D, aunque las que lo han hecho valoran esta colaboración de forma muy satisfactoria, sobre todo en las medianas y grandes empresas.
- Las empresas justifican, fundamentalmente, la falta de concurrencia con la Universidad a los contratos I+D porque la propia empresa no lleva a cabo tareas de investigación.

LO NATURAL VS LO ARTIFICIAL: DESMITIFICANDO LA QUIMIOFOBIA

*Resumen de la conferencia pronunciada por
la Ilma. Sra. D^a. Rosario Fernández Fernández,
el día 14 de mayo de 2024*



La quimiofobia, definida como el miedo irracional a los productos químicos, representa un fenómeno creciente en la sociedad actual. Este temor se basa en la creencia errónea de que lo natural es siempre seguro y lo sintético (químico) peligroso, ignorando que todo en nuestro entorno, incluidos alimentos y medicamentos, está compuesto por sustancias químicas.

Esta aversión puede llevar a decisiones perjudiciales, como evitar tratamientos médicos efectivos o rechazar alimentos nutritivos debido a preocupaciones infundadas sobre su composición química. La desinformación y la publicidad engañosa contribuyen significativamente a este fenómeno, promoviendo la idea de que los productos “libres de químicos” son superiores, a pesar de que todos los productos están regulados y evaluados científicamente para garantizar su seguridad.

Es fundamental promover una comprensión basada en evidencia científica sobre la química y sus aplicaciones en la vida cotidiana. Reconocer que tanto los productos naturales como los sintéticos tienen su lugar y utilidad es esencial para tomar decisiones informadas y evitar miedos infundados que pueden afectar negativamente la salud y el bienestar.

***CURSO DE HISTORIA Y FILOSOFÍA
DE LA CIENCIA Y DE LA TÉCNICA***

CIENCIA Y POLÍTICA: EL CONGRESO EUROPEO DE BIOQUÍMICA EN LA ESPAÑA DE 1969

*Resumen de la conferencia pronunciada por
el Excmo. Sr. D. Miguel Ángel de la Rosa Acosta,
Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias,
el día 12 de febrero de 2024*



La relación entre ciencia y política ha sido siempre delicada. Tradicionalmente se ha buscado mantener la ciencia al margen de los vaivenes políticos, pero la realidad ha demostrado que esta separación no siempre es posible. Desde que Vannevar Bush propuso el modelo moderno de financiación pública de la investigación tras la segunda guerra mundial, la ciencia ha dependido en gran medida del respaldo político.

Existen casos históricos en los que la política e, incluso, la religión han interferido en el ámbito científico. Trofim Lysenko, por ejemplo, impulsó teorías pseudocientíficas en la URSS con el apoyo de Stalin, y Galileo Galilei fue condenado por la Iglesia renacentista por sus ideas heliocéntricas. Un caso más reciente ocurrió en España, en 1969, con motivo del VI Congreso de la Federación de Sociedades Europeas de Bioquímica (FEBS), previsto en Madrid en abril. Unos meses antes, en enero, el régimen franquista decretó el estado de excepción, que restringía derechos civiles, generando protestas y preocupación en la comunidad científica internacional.

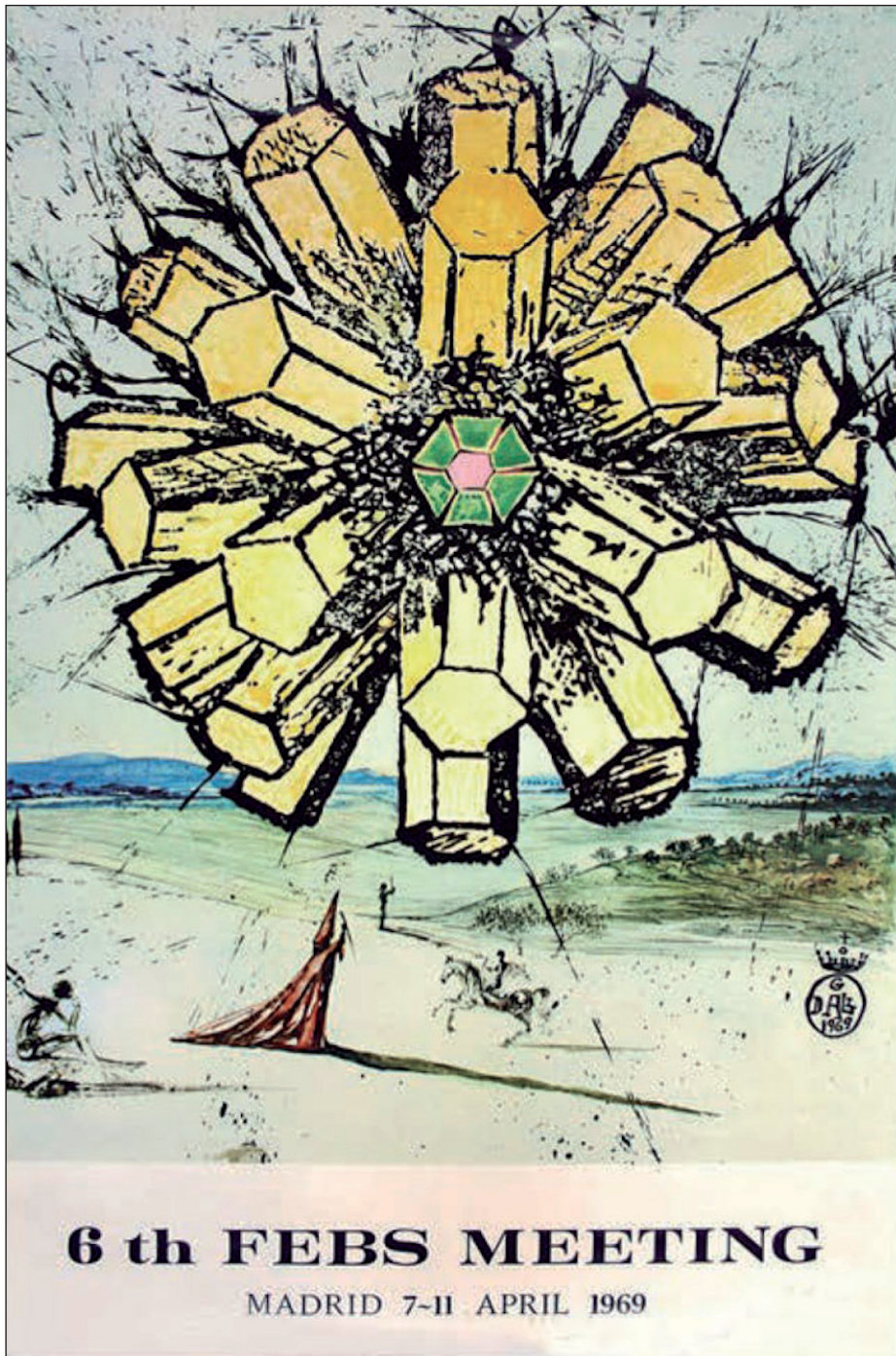
Sociedades como las de Suecia y Dinamarca cuestionaron la conveniencia de celebrar el congreso en ese contexto, y algunos científicos cancelaron su participación por temor a que su presencia fuera vista como respaldo al régimen. Ante esto, el Secretario General de FEBS propuso una reunión urgente para reconsiderar la sede del congreso.

Julio Rodríguez Villanueva, presidente de FEBS y del comité organizador, rechazó la propuesta y defendió la viabilidad del evento, aclarando que no existía ley marcial y que la mayoría de universidades funcionaban con normalidad. El Ministerio de Educación también garantizó que no habría interferencias.

Finalmente, tras una visita a Madrid, FEBS confirmó que se cumplían tres condiciones clave: libertad de entrada y salida del país, libertad de discusión científica y libertad de movimiento interior. El congreso se celebró como estaba previsto, y estas tres condiciones marcaron el devenir de futuros congresos.

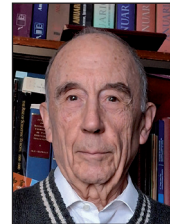
Nota: Más información en revista SEBBM, Núm. 200, Junio 2019

**CARTEL ANUNCIADOR DEL CONGRESO REALIZADO POR SALVADOR DALÍ,
AMIGO DE SEVERO OCHOA**



INTELIGENCIA ARTIFICIAL: EVOLUCIÓN DE LA ANTIGÜEDAD GRIEGA AL SIGLO XXI

*Conferencia pronunciada por el profesor
D. Manuel Castillo Martos,
el día 19 de febrero de 2024*



*Comprender supone estar abierto a la aceptación
de lo histórico como sucesión de interrogantes, no
como su solución.*

*El futuro está abierto, y nuestro deber no es profe-
tizarse el mal, sino más bien luchar por un mundo mejor.*

Karl Popper

INTRODUCCIÓN

De la inteligencia única a las inteligencias múltiples

La inteligencia por mucho tiempo había sido vista como única y se asociaba a lo intelectual por la interpretación que se hacía de los métodos para medirla, por ejemplo, el cociente intelectual según diversas habilidades, como la información general, la memoria, el vocabulario y las matemáticas, entre otros, pero no tiene en cuenta todos los aspectos en los que se desenvuelve el cerebro humano.

El diccionario de la Real Academia Española describe la inteligencia en 8 acepciones referidas a *Facultad intelectual, Facultad de conocer, Conocimiento, comprensión, acto de entender, capacidad de resolver problemas, habilidad, destreza y experiencia*. Y la inteligencia artificial como *Disciplina científica que se ocupa de crear programas informáticos que ejecutan operaciones comparables a las que realiza la mente humana, como el aprendizaje o el razonamiento lógico*.

Y el Diccionario del uso del español de María Moliner define la inteligencia como *Facultad espiritual con la que se captan, se relacionan y se forman las ideas*.

Otros autores expusieron el concepto de inteligencia, abogando por una perspectiva más integradora. Por ejemplo: Howard Gardner (1943) en *Inteligencias múltiples: la teoría en la práctica* (1993) contaba con diversas inteligencias relacionadas entre sí, pero destacaba la inteligencia existencial, la gran desconocida de las inteligencias múl-

tiples. No es lo inteligente que eres lo que importa, lo que realmente cuenta es cómo es tu inteligencia. La inteligencia no se puede medir con un número.

Daniel Goleman (1946) en *Inteligencia emocional* (1995) divulgó el término de inteligencia emocional, que trata de la capacidad con la que contamos para reconocer y gestionar nuestras emociones y las de los otros.

Robert Sternberg (1949) en *La Teoría Triárquica de la Inteligencia: comprender el autogobierno mental* (2017) definió la inteligencia como toda actividad mental que orienta a la adaptación consciente al entorno y a la selección o transformación de éste con el propósito de predecir resultados y ser capaz de provocar activamente la adecuación de uno al medio o del medio a uno. Y consideró tres tipos de inteligencia: la analítica, la contextual y la experiencial.

La historia de la IA se inicia en la antigüedad con mitos y leyendas alrededor de seres artificiales conscientes, que despertaron la imaginación en las civilizaciones griega, egipcia y china, entre otras, que ilustran el deseo humano de crear seres que se asemejen a ellos mismos.

La IA ha evolucionado desde historias de autómatas y golem, que poseían habilidades y conciencia humana, hasta la idea que las máquinas podían llegar a ser inteligentes y tener capacidad de razonamiento similar a la humana.

Nuestra mente es capaz de agrupar una infinitud de imágenes en un concepto. Aristóteles habló de categorías y los lingüistas como generalización composicional. Una habilidad esencialmente humana, que no posee la IA.

Alan Turing, un destacado matemático y criptógrafo británico, planteó en 1950 la famosa pregunta: ¿Pueden las máquinas pensar? Este cuestionamiento revolucionario allanó el camino para el desarrollo de la IA y abrió nuevas posibilidades en el campo de la ciencia de la computación.

Vista desde un siglo futuro, nuestra época será probablemente recordada como la del nacimiento de la llamada IA generativa. Todos los indicios apuntan a que estamos viviendo la fase inicial de una revolución informática y técnica que ha puesto en marcha la inteligencia de las máquinas. Hay muchas preguntas sobre qué nos deparará el futuro a este respecto. Recientemente nos hemos visto obligados a aprender términos nuevos, como algoritmo, aprendizaje automático, y más recientemente, Modelos de lenguaje de gran tamaño, pero esto es sólo el principio. Las nuevas técnicas están transformando nuestras vidas a un ritmo vertiginoso y nos reservan otros potenciales increíbles.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL PLASMADA EN LA ANTIGUA GRECIA

*El conocimiento es dolor; quienes más saben
más deben lamentarse por la verdad fatal:
el árbol de la ciencia no es el de la vida.*

Lord Byron

La cesión de nuestra humanidad a la IA nos coloca en el límite entre lo digital y lo analógico. En este límite es donde se percibe la claridad de la visión de Homero acerca

del papel que los robots de oro jugaban en la forja del mito griego. Los defectos físicos de Hefestos y su relación con el trabajo manual no hacen sino destacar la labor y quizás la necesidad de valerse de sus inteligentes y jóvenes autómatas, los cuales estaban «maravillosamente adiestrados para servir a su artífice en lo que les mandase» (Suárez, 2023-146).

La obra de Platón recupera los mitos de la tradición, los rehace según las exigencias de su fantasía o las necesidades de la discusión, e inventa algunos nuevos. Algunas universidades se han ocupado de ellos, como la de Stanford con estudios sobre Inteligencia Artificial en la antigüedad, casi 3.000 años atrás, o más o menos por el 700-600 a.C.

Hefesto dios del fuego, de artesanos, de herreros, de escultores y de la metalurgia, tiene su equivalente en la mitología romana en Vulcano. Hefesto era el único de los dioses olímpicos que no estaba caracterizado por la belleza. Una interpretación de su apariencia deforme es por la arsenicosis que provoca cojera y cáncer de piel. El arsénico se añadía al bronce para endurecerlo y la mayoría de los herreros de la Edad de Bronce padecieron esta enfermedad.

Hefesto casi siempre es representado por un hombre con barba, siempre en la forja, con el yunque o el martillo en mano, sudoroso y trabajador sin descanso en su fragua en la isla de Lemnos.

**HEFESTO EN LA FORJA POR
GUILLAUME COUSTOU
(HIJO), LOUVRE**



**LA FRAGUA DE VULCANO, DE VELÁZQUEZ.
MUSEO DEL PRADO, MADRID**



Con Hefesto trabajaron los mejores artesanos, entre ellos los tres cíclopes, Arges, Brontes y Estéropes, de los que aprendió todo lo que sabían. Ellos fabricaron el rayo de Zeus, el tridente de Poseidón y el casco de invisibilidad de Hades.

La habilidad de Hefesto lindaba con la magia. Fue el constructor de todos los tronos del Olimpo y de los artilugios, joyas y armas de la mitología griega: Las sandalias de Hermes, la égida de Zeus, las flechas de Eros, el arco de Apolo y Artemisa, la armadura de Aquiles, el collar maldito de Harmonía, el carro del sol del dios Apolo.

Hefesto modeló en arcilla a Pandora a imagen y semejanza de su esposa Afrodita. Ayudó a Zeus a fabricar una cadena irrompible en la que quedó atrapado Prometeo.

Hefesto avisado por Apolo que Afrodita tenía numerosos encuentros con dioses, sobre todo con Ares, Dionisio, Poseidón, Hermes y hombres mortales, como Adonis, Butes y Anquises, le tendió una trampa para demostrar sus infidelidades. Para ello Hefesto utilizó su ingenio y su don para crear con sus herramientas una red mágica invisible con la que capturar y hacer público los encuentros sexuales de los dioses. Su habilidad llegó a tal nivel de maestría que los primeros autómatas se atribuyen a su invención.

Alrededor del año 700 a. C. Hesíodo describió la historia de Talos, el primer robot de la historia mundial construido por Hefesto. Talos estaba programado para proteger la isla de Creta de cualquier ataque o invasión, por lo que recorría la isla tres veces al día y lanzaba piedras a los enemigos. Se describe como un gigante de bronce en cuyo interior, a través de un tubo, brotaba un líquido verde en forma de vida. Medea derrotó a Talos al quitarle un tornillo del tobillo y dejar que todo el líquido verde en forma de vida saliera de su interior. Esta historia recuerda a Aquiles y su talón, y otros mitos.

¿Qué nos dice el mito de prometeo?

Prometeo había creado al ser humano a semejanza de los dioses, pero tardó tanto que no le quedó tiempo para protegerlo. Apiadándose de su indefensa creación, robó el fuego del Olimpo para que la humanidad pudiera calentarse. Según una primera versión, Prometeo robó el fuego del carro de Helios, en otra posterior del carro de Apolo. En *Protágoras*, Platón describe que Prometeo robaba las artes de Hefesto y Atenea, llevándose también el fuego porque sin él no servían para nada.

El fuego se consideraba origen de la técnica y del progreso, por tanto del *homo faber*. La especie humana, así dotada, cambia de estatuto, participa en la suerte divina e inventa la civilización en cuanto a religión, lenguaje, técnica y agricultura.

Sin embargo, la vida social era imposible porque a los hombres les faltaba la virtud que la hace viable: el sentido político, que Prometeo en su precipitación, no tuvo tiempo de arrebatarse a Zeus (Droz, 1993-23)

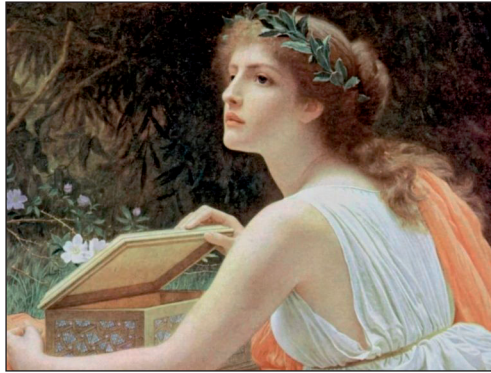
El uso responsable del fuego y otras herramientas enfurece a Zeus, que custodiaba celosamente su acceso exclusivo a toda técnica maravillosa, y Prometeo para aplacarlo, dijo a los humanos que quemasen ofrendas a los dioses, pero que le dieran los huesos y tendones del sacrificio en lugar de la carne. Para vengarse, Zeus ordenó a Hefesto que hiciese una mujer de arcilla, a la que llamó Pandora, nombre que significa todos los dones, y que portara una urna sellada, llena de desgracias con las que quería castigar a la humanidad. Hermes la escolta hasta la Tierra y se la ofrece junto a la urna como prometida a Epimeteo, hermano de Prometeo.

Dice Platón, que el nombre Prometeo significa *el que piensa antes, el previsor*; y *Epimeteo el que actúa primero y piensa después*. Ambos estaban encargados de repartir cualidades y talentos que van a diversificar a las especies. Uno hará la distribución y el otro la inspección (Droz, 1993-23).

Prometeo siempre tenía en cuenta el futuro, y advierte a su despreocupado hermano, Epimeteo, que no acepte el peligroso regalo de Zeus. Pero Epimeteo, fascinado con Pandora, la recibe imprudentemente en su vida, y sólo más tarde se dará cuenta de su terrible error, después que ella abriera la urna y saliera un enjambre de males. La creación moderna retrata a Pandora retrocediendo horrorizada y hace salir a la Esperanza para aliviar las almas de los humanos.

Pandora (como robot artificial) había sido pensada deliberadamente para castigar a la humanidad, no tenía padres, ni recuerdos de la infancia, ni emociones, ni estaba destinada a envejecer y morir. Estaba programada para ejecutar una única misión: ganar aceptación en la Tierra y luego abrir la urna.

<https://es.greekreporter.com/2021/10/06/mito-griego-caja-pandora-fuente-todos-problemas>



Las representaciones griegas clásicas muestran a Pandora como una astuta autómatas: en su imagen más famosa pintada en una vasija aparece como una joven mujer muy erguida y con una inquietante sonrisa.

<https://www.google.com/search?q=pandora+en+una+vasija+griega&oq>



Byung-Chul Han (1959)¹ expone que nos hemos convertido en «Prometeo digitales autoengañados y enganchados en un permanente ejercicio de violencia sobre nosotros mismos. Esta violencia se manifiesta en el cansancio constante que sufrimos, en las enfermedades neurológicas por la sobreabundancia informativa». (Suárez, 2023-154).

Otras versiones del mito de Prometeo

Esquilo (525 a. C.-456 a. C.) no consideraba a Prometeo el causante de la ruina de la humanidad, sino el benefactor y liberador de los hombres, como algunos lo han reconsiderado.

Thomas Hobbes (1588-1679) veía en Prometeo la imagen del rebelde sublevado contra el poder del príncipe y de la tiranía de las religiones, será también tratado en los siglos XVIII y XIX por Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832), Jules Michelet (1798-1874), Percy Bysshe Shelley (1792-1822), Johann Gottfried von Herder (1744-1803), George Gordon Byron, *Lord Byron* (1788-1824) y Karl Marx (1818-1883).

Hesíodo en el siglo VIII a.C. consideraba a la memoria como todo lo que pasa y todo lo que pasará, retiene y ostenta todo el saber, hace presente el pasado de los dioses, de los héroes y de los hombres, y es puente entre el mundo de los vivos y el de los muertos (Droz, 1993-33,67-68).

Si descargamos nuestras memorias individuales y colectivas en bases de datos son mediadas por técnicas como el índice de citas. Joshua Lederberg (1925-2008), Premio Nobel de Fisiología y Medicina, 1958, intuía con claridad, que esta forma de evaluación permanente transformaría profundamente el conocimiento científico, y se ha confirmado. Lo que no podía saber entonces era que la práctica totalidad de nuestra experiencia iba a quedar comprometida por esta técnica.

En la antigüedad la Esperanza se personificaba en una joven *Elpis*, considerada sinónimo de imprevisión, símbolo de incapacidad para anticipar el futuro, evaluar alternativas y representaba el pensamiento ilusorio. Para los griegos era otra manifestación del *kalos kakon*: un mal hermoso desatado entre los humanos. Por eso un artista antiguo retrató a *Elpis*, casi igual que Pandora, con una sonrisita satisfecha.

En términos artísticos, tenemos la película *Ex-Machina* (Guión de Alex Garland estrenada en España en 2015), el argumento trata de Nathan, un programador multimillonario que selecciona a un joven programador, Caleb, para que pase una semana con él en un lugar remoto en las montañas, para que participe en su última creación, Ava, un robot-mujer en el que la IA lo es todo. Hay un paralelismo con la *La vida es sueño* de Calderón de la Barca, donde Ava es Rosaura, que se sirve de la llegada inesperada de un extraño, Caleb es Segismundo el que se vale de la casual llegada de Rosaura para salir por primera vez de prisión y cumple la auto profecía que Nathan, el equivalente al astrólogo que el rey Basilio ha hecho acerca de qué ocurrirá si uno de los robots escapa.

1. Filósofo y ensayista surcoreano, experto en estudios culturales y profesor de la Universidad de las Artes de Berlín, es considerado uno de los filósofos más destacados del pensamiento contemporáneo por su crítica al capitalismo, la sociedad del trabajo, la técnica y la hipertransparencia.

El objetivo de Segismundo era vivir en libertad «el tiempo que me durare», mientras que Ava tiene decidido que solo el contacto y la mezcla con los seres humanos en un ambiente real, no en el laboratorio creado por un magnate de la técnica, la puede salvar (Suárez, 2023-144, y Larson, 2022-144).

En el siglo XIII, Alberto Magno (1206-1280) parece que construyó un androide, del que se dice que no solo se movía, sino que también hablaba (Castillo, 1996-100)².

Robert Greene, (1558?-1592), en la obra póstuma *The Honorable Historie of Frier Bacon and Frier Bungy* (1594), describe que «en 1589, los frailes Bungy y Bacon,

hicieron una cabeza de bronce, la cual en sus partes interiores había todas las cosas como hay en la cabeza de un hombre normal. Una vez acabado dijeron que eran tan alongadas de la perfección como antes, y determinaron invocar un espíritu y saber de él cuanto no pudieron averiguar por su propio entendimiento» (Labatut, 2023-299).

MITOS Y DIGITALIDAD

Platón en el *Timeo* advierte que un Todo carente de inteligencia jamás podrá ser más bello que un Todo inteligente. La inteligencia es introducida al fin, y el demiurgo anima el cosmos, que es sólo materia, introduciendo esta *alma del mundo*, que es a la vez principio de los movimientos ordenados del universo, la causa general de la vida y fundamento de la unidad del mundo (Droz, 1993-118,122).

Podemos preguntarnos, más allá del desastroso final de Prometeo: ¿Ante quién harán las celebraciones olímpicas aquellos elegidos que puedan adoptar una forma no enteramente humana sino digital? ¿Enfrente de una audiencia de hombres y mujeres? ¿Serán los robots sus espectadores? ¿Los estadios vacíos se decorarán con simulaciones computarizadas de público ausente? ¿Se ha pensado adónde va la digitalidad? (Suárez, 2023-241,242).

La digitalización ha comenzado de manera irreversible, y ha penetrado en todos los ámbitos de la vida, incluso en territorios en donde no debería tener nada que hacer. Y no se debe ignorar su impacto, sino circunscribirla a los ámbitos y en las formas que sea beneficiosa para el bien común. Se debe basar en una ética profunda y extensa de los límites digitales, que haga de la condición humana su fundamento irrenunciable (Suárez, 2023-12,240).

Hay dos preguntas básicas: ¿Qué quiere decir que el único futuro posible sea digital? ¿Qué significa para el ser humano que su futuro sea digital?

La primera pasa por cuestionar que el nuevo futuro se confunda con la nueva normalidad. Es decir, critica que la digitalización sea inevitable y que haya que abrazarla como si de una nueva fe se tratara. Hay otros futuros posibles, diría un crítico radical de la digitalización.

2. Un compendio de este tema en Ferrero, Raúl, 2023, en *Autómatas y cabezas parlantes. Historia de los dispositivos que han hecho evolucionar nuestras vidas*, en el que realiza un viaje a través del tiempo y de máquinas sorprendentes, por caminos donde la magia y la técnica se unen en pos del viejo sueño de darle vida a lo inanimado.

La segunda va más allá para preguntarse cómo sería el futuro si la condición humana se hace condición digital. Esta respuesta produce más rendimiento intelectual que la primera, porque parte de una realidad insoslayable que cualquiera puede constatar con solo mirar a su alrededor: teléfonos, pantallas digitales y la huella que van dejando los objetos digitales (Suárez, 2023-13).

John Desmond Bernal en *Science in History* (1954) atribuía consecuencias sociales de gran alcance a descubrimientos como la fisión nuclear, la navegación espacial, los ordenadores electrónicos o el código genético. El lanzamiento del primer satélite artificial por la Unión Soviética en 1957, derivó en una serie de esfuerzos organizados para investigar los diferentes aspectos de la relación entre ciencia, técnica y sociedad.

Las primeras herramientas de la IA de mediados del siglo pasado, se enfocaban en la lógica simbólica de programas de manera similar a los humanos. Por ejemplo, en 1966 un profesor del MIT desarrolló *Eliza*, un sistema que simula una conversación entre humanos.

Actualmente las técnicas de IA y aprendizaje automático están convirtiéndose a pasos acelerados en *cajas cerradas*, el símbolo de la urna sellada de Pandora adquiere un nuevo significado. Pronto la lógica operativa de los sistemas de decisión basados en IA será inescrutable no sólo para sus usuarios, sino también para sus creadores. Entre otras amenazas, hay un claro riesgo de que los sistemas de IA sean hackeados por terroristas.

Cuando Mark Zuckerberg (1984) fundador de Facebook, Andrew McAfee (1967) fundador de MIT, Lili Cheng (1987), Vice Presidenta de Microsoft, y otros optimistas de la IA nos aseguran que esta técnica aportará grandes beneficios, es imposible no pensar en Epimeteo y Elpis. ¿Debemos realmente confiar en que la humanidad será capaz de ajustar y solucionar los problemas planteados por la IA conforme surjan?

Parece más prudente prestar atención a modernos pensadores prometeicos como Stephen Hawking (1942-2018), Bill Gates (1955) y otras importantes figuras del ámbito técnico que no ocupa, que en 2017 denunciaron la amenaza de las armas robóticas inteligentes y advirtieron: «No nos queda mucho tiempo. Una vez abierta esta caja de Pandora, será difícil cerrarla». Estas inquietudes prometeicas también hallaron eco en Sergey Brin (1973) cofundador de Google, y en otros especialistas en Ética aplicada a la IA, como Joanna Bryson (1965) que alerta contra una aceptación irreflexiva de los dones de la IA antes de haber concebido el modo de controlarlos.

Encuestas recientes señalan que el optimismo sobre beneficios potenciales de la IA se redujo considerablemente entre los profesionales del área. Al parecer, la comprensión de cómo funciona la IA se correlaciona con expectativas más realistas. Nuestro manejo del futuro y relación con ella debe guiarse no por la ciega esperanza, sino por la previsión basada en el conocimiento y la experiencia (Mayor, 2018-155,156,159,160).

La primera revolución industrial que giró en torno al vapor, se originó entre 1760-1840, aproximadamente. La segunda revolución industrial cuyo centro era la electricidad, ocurrió entre 1870-1914. Y la tercera revolución industrial, que se centraba en la electrónica de los semiconductores, y comenzaba la Era de la Información relacionada con el desarrollo del transistor en 1947 y del amplificador óptico en 1957. Hoy se habla de una cuarta revolución centrada en la informática primero y después en la IA.

En la experiencia de los desarrollos habidos en las tres primeras revoluciones, más que el análisis, lo que subyace es la idea de las relaciones entre ciencia y técnica, plasmado en la expresión «técnica de base científica». Y la revolución promovida por la IA introduce un factor de crecimiento nuevo e independiente: el desarrollo humano en un frente amplio (Porter y Teich, 1990-410,412,417).

Muchos sociólogos y filósofos debaten sobre la injerencia de la revolución digital en el desarrollo cultural de la humanidad, las que hasta ahora se han denominado revoluciones científico-técnica parece empezar a ser barridas por la revolución digital. La IA parece querer desbancar con sus avances lo que se considera el procesamiento de la información. Y muchos –con temor– empiezan a considerar si el momento de que los ordenadores superen las capacidades del cerebro está llegando. Pero, ¿es realmente imposible que llegue a haber Inteligencias Artificiales conscientes?

Esta es la pregunta que se hace José Luis San Miguel de Pablos (geólogo y doctor en Filosofía) en el ensayo *Consciencia. El hilo conductor del universo* (2023), concluye: «Yo diría que sigue habiendo razones poderosas para el escepticismo, tanto a corto como a medio plazo. Ciertamente tanto un ser vivo como un ordenador están hechos de materia y energía, y por lo tanto sus *componentes elementales* podrían contar con un *lado reverso* de interioridad». (Sequeiros, 2023).

¿QUÉ PIENSAN LOS CIENTÍFICOS?

Ernest Rutherford (1871-1937) expuso que una reacción nuclear en cadena se desarrolló a partir de unas teorías científicas comprobables, pero las teorías acerca de la evolución técnica de un poder mental no lo son (Larson, 2022-55).

Werner Heisenberg (1901-1976) descubrió el principio de incertidumbre mientras intentaba solucionar las consecuencias de la física cuántica. Aunque plantea unos límites fundamentales sobre nuestra capacidad para predecir los movimientos individuales de las partículas en el campo subatómico, se ha revelado fructífero a la hora de comprender la mecánica cuántica. Por ejemplo, no habríamos podido aspirar a construir un ordenador cuántico si antes no hubiéramos comprendido la naturaleza de la incertidumbre (Larson, 2022-91).

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC siglas en inglés) se utilizó, entre otros fines, para probar la existencia de una partícula responsable de la masa del universo, conocida como bosón de Higgs. El resultado condujo a confirmar, de manera oficial en 2013, la teoría de Peter Higgs (1929-2024) sobre la existencia de dicha partícula, y ha servido como recordatorio que la IA –aquí *big data*– funciona solo cuando disponemos de una teoría previa (Larson, 2022-146,285,301-302).

En 2005 emergió una escuela de pensamiento que veía especialmente las técnicas de la Web 2.0, y unos años después la IA, como una nueva imprenta destinada a liberar la inteligencia y la creatividad de la humanidad, pero se piensa que los robots solo pueden hacer plagio y sólo las personas pueden inventar ideas nuevas, y en algunas ocasiones introducirlas para la IA.

TRANSHUMANISMO E HISTORIA DE LA CIENCIA

Según Nick Bostrom (2005) los antecedentes del transhumanismo están en los impulsos trascendentalistas con la búsqueda de la inmortalidad en el *Poema de Gilgamesh* (1800 a.C.)³, y en las ideas alquimistas del elixir de la eterna juventud y otras para vencer al envejecimiento y a la muerte. Y Renée Mirkes en 2019, expuso que uno de los primeros precursores de las ideas transhumanistas es René Descartes, que en el *Discurso del método* (1637) expuso un tipo de medicina que podría otorgar tanto inmortalidad física como mentes más fuertes.

Casi todas las referencias actuales sitúan su origen oficial en *New bottles for new wine* de Julian Huxley⁴ (1957), donde afirma que el transhumanismo será el siguiente paso en la evolución de la humanidad; una fase en la que los humanos vivirán en nuevo tipo de existencia impulsada por los avances en biología. Desde el punto de vista filosófico, el transhumanismo se presenta como algo diferente del posthumanismo.

El transhumanismo persigue la evolución continua de la vida humana como resultado de ciencia y técnica guiadas por principios y valores de promoción de la vida. Una de las dimensiones más llamativas es en separar nuestra mente del soporte corporal, en lo que están trabajando científicos y empresas, y afirman que con este paso en la evolución humana se conseguirá llegar a uno de los objetivos del transhumanismo: la posibilidad en el ejercicio del derecho a la libertad morfológica, de alterar la naturaleza humana de una manera que no comprendemos en la actualidad.

Hay varios desafíos que van a acompañar a la innovación digital y a la automatización del trabajo. La principal preocupación es que la aceleración de la digitalización va a provocar problemas sociales y laborales graves, a la vez surge una pregunta ¿qué quedará de la humanidad cuando los ciborgs pueblen la Tierra? Para evitarlos, entre otros autores, Erik Brynjolfsson (1962)⁵ y Andrew McAfee (1967)⁶, orientan cómo se debe reorganizar la vida laboral de quienes van a competir con máquinas inteligentes. Pero no se aventuran a vaticinar cuánto tiempo serán válidas las ventajas de la aplicación de la IA, y apuestan por lo que suponen una ventaja para el trabajo humano (Suárez, 2023-136,137).

La pregunta qué clase de *criatura* sucederá al hombre en la supremacía de la Tierra, es un tema sujeto a debate en nuestros días, aunque nos inclinamos a pensar que somos nosotros quienes estamos creando en estos momentos a nuestros sucesores: día a día añadimos detalles a la belleza y complejidad de su mecanismo, les otorgamos mayor poder y los dotamos con todo tipo de ingenios y dispositivos automáticos de movimiento y regulación que les proporcionarán aquello que el intelecto ha dado a la raza humana.

3. Narración acacia en verso sobre las peripecias del rey Gilgamesh, basada en cinco poemas independientes que constituyen la obra épica más antigua conocida.

4. Primer director general de la UNESCO, hermano de Aldous Huxley.

5. Profesor en la Universidad de Stanford y director del Laboratorio de Economía Digital en el Instituto de Stanford para la IA centrada en el ser humano.

6. Investigador principal en el MIT y cofundador de la Iniciativa de la Economía Digital en la Escuela de Administración Sloan del MIT.

Con el transcurso del tiempo nos convertiremos, poco a poco, en la especie inferior en poder, en cualidades morales y en autocontrol.

Las ideas referidas a máquinas inteligentes aparecieron en 1872 por el escritor iconoclasta, músico, explorador y crítico inglés Samuel Butler (1835-1902), en la obra titulada *Erewhon*⁷, palabra que si se lee al revés con alguna transliteración quiere decir, *Nowhere*, esto es, *ningún lugar*, y es asimilable a utopía.

En 1955, John von Neumann (1903-1957), publicó un breve ensayo titulado *¿Podemos sobrevivir a la tecnología?*, en el que leemos: «La primera parte de este siglo [el XX] la acelerada revolución industrial encontró una limitación absoluta, no en el progreso técnico como tal, sino en un factor esencial de seguridad [...] Ahora este mecanismo de seguridad está siendo drásticamente inhibido». Y afirmaba: «El poder técnico, la eficiencia tecnológica como tal constituye un logro ambivalente. Su peligro es intrínseco». José Manuel Sánchez Ron concluye «Mis peores sueños son que el desarrollo de la IA capacite a las máquinas inteligentes para que *piensen* que deben reproducirse. Y que sean capaces de hacerlo. ¿Lo harán? (Sánchez Ron, 2023-62,63).

Actualmente la capacidad para acumular y procesar mucha información la tenemos en un ordenador. El salto debería ser cualitativo, que entienda cosas que no podemos entender, que piense más allá de los paradigmas que hemos desarrollado, mayor capacidad de abstracción y de comprensión. Y cualquier desarrollo de la IA debe incluir imperativamente férreos mecanismos de control, no dejemos a la razón económica y al individualismo que dominen la IA, porque ahora es una herramienta usada la mayoría de las veces con ideas economicistas, según avisaba Yuk Hui (Hong Kong) (1985), uno de los filósofos contemporáneos más importante.

La IA generativa supone la disrupción más notable de este siglo, y la UE en 2023 ha sido pionera en promulgar una ley integral, que según dijo la presidenta de la Comisión, Ursula von der Leyen, *hay que transponer los valores europeos a una nueva era, la de la IA*. Es decir, regularla para salvaguardar los derechos humanos, hacerla útil y combatir la ignorancia.

Sonia Contera (1970), directora asociada del departamento de Física de la Universidad de Oxford, advierte de los muchos intereses de poder que aguardan tras los marcos reguladores de la IA, y se pregunta ¿Quién decide estos marcos?, ¿Quiénes los hacen?, ¿De dónde salen estas personas? Y concluye que la cuestión es que la IA avanza tan rápido que en demasiadas ocasiones los reguladores ni siquiera comprenden cuáles son las funciones de la IA. También explica cómo la IA ha revolucionado el ámbito de la medicina y las ciencias en muy pocos años. Vaticina que facilitará la creación de robots científicos, que nos van a ayudar a entender hacia dónde va el mundo y van a cambiar las carreras científicas. Y matiza que esta robotización de la ciencia cambiará el conocimiento humano, aunque no todo se puede robotizar.

Respecto a ese cambio, el presidente de la Comisión Laboral y de Recursos Humanos de Fomento del Trabajo, de Cataluña, Luis Jesús Pérez López, ha dicho que el

7. Partes del ensayo *Erewhon* los publicó, junto con otros, la editorial Impedimenta en 2009, El rival de Prometeo, edición de Sonia Bueno Gómez-Tejedor y Marta Peirano.

65% de las carreras que estudien los niños que están ahora en educación infantil todavía no existen. Y Marta Montojo, directora de Carreras Profesionales de la Universidad Francisco de Vitoria, señala que eso implica resetear el sistema educativo, adoptar los métodos de enseñanza y los contenidos a estas nuevas circunstancias. Se deberá formar a las personas para que tengan una capacidad creativa y de innovación, profesionales con juicio crítico que estén abiertos al diálogo, que sepan negociar y gestionar equipos. Y esto no ofrece la IA.

Pasar de las palabras del conocimiento a los saberes científicos en la Historia de la Ciencia sirve para introducirnos en los conceptos de felicidad, vistos de la mano de hombres de ciencia, y filósofos: Leibnitz, Kant, Hegel, Rousseau, entre otros.

El progreso de las ciencias y las técnicas, así como el progreso histórico no nos lleva siempre a ser felices porque no se consigue la felicidad por avances técnicos y científico, bien en Europa o en América. El objetivo social de una investigación es la felicidad de los hombres, pero no todo está bien. La ley moral no coincide con las leyes de la naturaleza y de la inclinación, leyes de las que depende nuestra felicidad, por lo que no necesariamente la persona buena va a ser feliz, o la mala infeliz.

La respuesta a la pregunta: la ciencia y la técnica ¿consiguen la felicidad? no es unívoca, y requiere una reflexión multidisciplinar, en la que no se puede perder de vista que los investigadores son la herramienta de la sociedad para enfrentarse a retos como el abismo, cada vez mayor, entre el mundo rico y el mundo pobre, el desarrollo sostenible o la falta de pensadores independientes.

El Paleontólogo Jean-Jacques Hublin (1953) afirma que la Prehistoria arrastra cuestiones que nos interrogan sobre nuestra relación con las nuevas técnicas. Los homínidos tratan de adaptarse de todas las formas posibles a diferentes condiciones. El cerebro humano consume una importante cantidad de nuestra energía que ha marcado, de forma clara, nuestra evolución.

Hemos externalizado una parte de nuestra inteligencia y memoria primero con los dibujos sobre las paredes y luego con la escritura. Platón se inquietaba porque en el pasado la gente conocía muchas cosas de memoria, y que ahora las personas no tenían necesidad de aprender porque estaba escrito. En un período reciente, muy corto, hemos ido mucho más lejos en ese proceso, porque para responder a una pregunta nuestro primer reflejo es ir a la Wikipedia o Google. Hemos externalizado nuestra capacidad de cálculo con los ordenadores y ahora nos hemos puesto a externalizar una parte de nuestra inteligencia con sistemas de IA, y al final, tal vez, utilicemos nuestro cerebro para otras cosas.

Italo Calvino (1923-1985) persiguió un conocimiento que no tuviera fronteras de materia, ni de geografía, en línea con la tradición humanista italiana. «Quisiera referirme aquí al menos a dos cosas en que he creído a lo largo de mi camino y en las que sigo creyendo: la pasión por una cultura global y el rechazo de la incomunicabilidad de la especialización, para mantener viva una imagen de cultura como un todo unitario del que forma parte todo aspecto del conocer y del hacer». En *La nube de smog* (1958) mostró su capacidad incisiva de observar el futuro. En *La especulación inmobiliaria* (1963) escribió: «Estamos en vísperas de contener la conciencia universal en un cerebro electró-

nico». Y en *Si una noche de invierno un viajero* (1979) alude a máquinas calculadoras que completan cualquier novela a partir de su inicio.

LA IA Y LA QUÍMICA: TENDENCIAS Y OPORTUNIDADES (Baum, 2021)

La IA se ha configurado como asistente en la investigación experimental y teórica, así como en la computación, lo que contribuye a una mejor comprensión y control de las propiedades de los compuestos y los procesos químicos.

La IA y los conjuntos de datos de entrenamiento se están usando para resolver problemas e innovar en numerosas Instituciones científicas de todo el mundo, y abren la puerta a su aplicación en el análisis de datos y el descubrimiento de fármacos.

A lo largo de los últimos veinte años, los avances de la IA están transformando la investigación en innumerables disciplinas. La Química es una de las áreas de la ciencia en las que se ha dado la conexión con la IA e impulsa importantes avances.

¿En qué campos de la química ha crecido la IA?

El número de publicaciones y patentes químicas relacionadas con la IA se ha multiplicado por seis entre 2015 y 2020. Entre las disciplinas que lideran la adopción de la IA, según porcentaje de publicaciones relacionadas con la IA, destacan Química Analítica, Bioquímica, Química Ambiental, Química Física y Ciencias de Materiales, le siguen a gran distancia Ingeniería Química, Química Inorgánica, Química Orgánica. y Farmacología.

Entre 2000 y 2014, las publicaciones y patentes relacionadas con la IA pasaron de explorar el diagnóstico de enfermedades en humanos a la creación de algoritmos genéticos y su aplicación en el descubrimiento de fármacos y el microARN⁸.

Recientemente, al cambiar los tipos de problemas que requieren soluciones, las publicaciones y las patentes se han desplazado hacia la metilación del ADN y el cáncer. El interés ha empezado a centrarse en el descubrimiento de fármacos relacionados con la COVID-19.

Como era de esperar, las moléculas pequeñas eran el campo más tratado en las publicaciones y patentes sobre la IA que se analizaron. Esto incluye temas como el descubrimiento de fármacos, la retrosíntesis y la optimización de reacciones, lo que refleja donde suelen concentrarse las inversiones de las empresas farmacéuticas.

La compañía inglesa DeepMind Technologies⁹ ha usado sus avances en IA para predecir la estructura de 200 millones de proteínas, hito clave para poder curar el cáncer

8. Un ARN monocatenario, de una longitud de entre 21 y 25 nucleótidos, que tiene la capacidad de regular la expresión de otros genes mediante diversos procesos, utilizando para ello la ruta de interferencia.

9. Un ARN monocatenario, de una longitud de entre 21 y 25 nucleótidos, que tiene la capacidad de regular la expresión de otros genes mediante diversos procesos, utilizando para ello la ruta.

y el alzhéimer, y trabaja actualmente en un sistema de optimización de campos magnéticos que pueden ser esencial para la fusión nuclear.

LA AUTOMÁTICA DE LEONARDO TORRES QUEVEDO

Torres Quevedo (1852-1936) en el discurso de entrada en la Academia de Ciencias Exactas el 19 de mayo de 1901, dijo, entre otras cuestiones: *Una máquina algebraica es un aparato que impone entre los valores simultáneos de diferentes elementos las relaciones expresadas matemáticamente en una fórmula analítica. Todo aparato que permita reproducir a voluntad un fenómeno físico, cuyas leyes estén formuladas matemáticamente, puede en rigor denominarse máquina algebraica.* Y mencionaba las siguientes:

- Computadora para resolver ecuaciones de segundo grado.
- Integrador que permitía resolver mecánicamente la ecuación $y'' = dy/dx$, es decir, integrar ecuaciones diferenciales de primer orden.
- Máquina algebraica para determinar raíces de ecuaciones algebraicas muy complicadas.

Torres daba especial protagonismo a la Automática¹⁰, y construyó máquinas que imitaban la apariencia y los movimientos de un hombre o de un animal, siguiendo las órdenes recibidas.

Ajedrecista es el primer autómatas electromecánico, lo construyó en 1912, y lo presentó en París en el Laboratorio de Mecánica de la Sorbona en 1914. Las reglas de funcionamiento estaban basadas en los principios sobre sistemas de conmutación, que él mismo enunció en su célebre memoria sobre el Automatismo.



10. La Academia de Ciencias define la Automática como la disciplina que *estudia los métodos y procedimientos cuya finalidad es la sustitución del operador humano por un operador artificial en la ejecución de una tarea física o mental previamente programada.*

El segundo, más elegante y perfeccionado técnicamente, lo terminó su hijo Gonzalo bajo su dirección hacia 1920, y fue presentado en París en 1922.

La estructura mecánica para lograr el movimiento de las piezas blancas consiste en un conjunto de ejes, tambores, trenes epicicloidales y lanzaderas que permiten las traslaciones longitudinales y transversales de las piezas por el tablero. La estructura electromecánica se basa en un conjunto de electroimanes y dispone de automatismos electromecánicos que se corresponden con las diferentes posibilidades de las reglas del juego.

La máquina juega, piensa, mueve las piezas, da sucesivos jaques por sus movimientos inteligentes, hasta conseguir el jaque mate que es anunciado por un gramófono y gana siempre. Produjo una impresionante sensación en su tiempo, es la primera máquina de tipo electromecánico que juega al ajedrez y constituye una de las primeras manifestaciones de IA.

Aritmómetro electromecánico

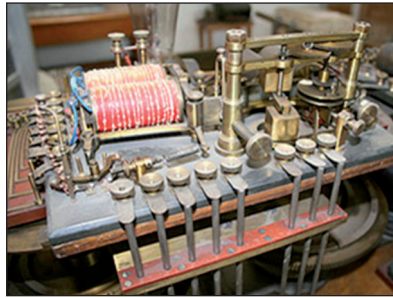
Torres Quevedo desarrolló un dispositivo conocido como Aritmómetro electromecánico, reconocido como la primera calculadora digital de la historia.



Torres Quevedo introdujo mecanismos automáticos nuevos y originales. Su mérito fue diseñar la máquina de manera que hiciera comparaciones y tomara decisiones. Disponía de las diferentes unidades que constituyen una computadora actual: unidad aritmética, unidad de control, pequeña memoria y una máquina de escribir como sistema de salida.

La concepción y realización de esta calculadora digital mediante sistemas electromecánicos, sitúan a Torres Quevedo como pionero de la Automática. Podía registrar valores numéricos, realizar operaciones, ejecutar los cálculos, imprimir los resultados e informar que la operación ha terminado. Fue presentada en la Academia de Ciencias de París en 1920.

Telekino es un autómatas que ejecuta las órdenes que se le envían por ondas electromagnéticas, como las que actúan en los sistemas de telegrafía sin hilos.



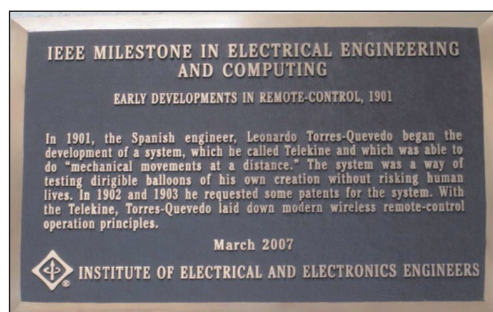
A Torres Quevedo se le deben también, entre otros: *Sistema de camino funicular aéreo de alambres múltiples. Transbordadores. Indicador de coordenadas. Lanza-Cables. Aparato para tomar discursos sin taquígrafos. Jugadores autómatas. Puntero proyectable. Sintetizador de movimiento. Balanza automática. Embarcación de dos flotadores. Buque campamento*, etc.

Por su trabajo de inventor, Torres Quevedo recibió del Rey Alfonso XIII la Medalla de Oro Echegaray, en 1916.

Al fallecer el 18 diciembre de 1936 su muerte pasó un tanto inadvertida, y años después, Pedro González Quijano (1870-1958), ingeniero y matemático, escribió un artículo necrológico en la *Revista Matemática Hispano-Americana* y pronunció en el Instituto Francés una conferencia sobre la vida y labor de Torres Quevedo. También Philbert Maurice D'Ocagne (1862-1938), ingeniero y matemático que introdujo el nomograma, hizo una loa de los trabajo e investigaciones en conferencias pronunciadas en París y en Bruselas. En 1953 se celebraron actos conmemorativos por el centenario del nacimiento, con intervención de personalidades académicas, científicas y universitarias de España y otros países.

En los siguientes años se creó un Instituto con su nombre dedicado a proyectar y fabricar instrumentos e investigar problemas mecánicos, eléctricos y electrónicos, que ha sido el germen del actual Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información, *Leonardo Torres Quevedo (ITEFI)* en Madrid.

**PLACA DE RECONOCIMIENTO IEEE (INSTITUTE OF ELECTRIC
AND ELECTRONICS ENGINEERS)**



Posteriormente se han celebrado tres Simposios *Leonardo Torres Quevedo, su vida, su tiempo, su obra* en Molledo (1987), Real Valle de Camargo (1991) y Pozuelo de Alarcón (1995).

Leonardo Torres Quevedo es prototipo de científico e investigador y pilar en que se debe apoyar la forma de hacer ciencia, técnica e investigación. Es un ejemplo de trabajo duro y tenaz, pasión y chispa creadora. Él se definía guerrillero de la ciencia.

COROLARIO

La frase *El sueño de la razón produce monstruos*, pronunciada por Francisco José de Goya a finales del siglo XVIII, ha sido premonitoria, cuando mediado el siglo XX surgió la IA, tema estrella del momento más determinante de nuestro tiempo y probablemente de los tiempos venideros. El ChatGPT, casi un recién nacido, se ha convertido en la voz de alarma, la advertencia de que se avecina un peligro para nuestro legendario poderío en la historia de la Tierra, porque crear algo más inteligente que lo humano es un error evolutivo básico.

Marie-Jean-Antoine Nicolas de Caritat, marqués de Condorcet (1743-1794) tuvo la ingeniosa idea de las escalas numéricas, ese afortunado método de representar todos los números con un pequeñísimo número de signos, decía que constituía «el primer ejemplo de los métodos que duplican las fuerzas del espíritu humano, y con ayuda de los cuales puede ir alejando indefinidamente sus límites, sin que sea posible fijar un término en el que, al fin, deba detenerse». No podía imaginar que llegaría un día en el que esos principios pasarían de las manos e intelectos humanos a las estructuras de análisis lógico de las máquinas¹¹.

Los sueños de Alan Turing (1912-1954) y John von Neumann (1903-1957) de máquinas que pudiesen competir en inteligencia con los humanos parecen estar próximos a cumplirse. Máquinas que acaso pronto puedan reproducirse autónomamente.

Si hablamos si la IA es, o será comparable o superior a la inteligencia humana, tendríamos que conocer bien el cerebro, en qué consiste nuestra inteligencia, cómo es el pequeño universo que llevamos dentro. En el año 2023 se anunció un avance importante en su conocimiento (Sánchez Ron, 2023-15,123).

El factor humano resulta imprescindible para controlar el desarrollo futuro de la IA como una herramienta que haga la vida más fácil a las personas y a las empresas. La esencia de la vida mental es un conjunto de principios que pueden ser compartidos por personas y máquinas.

La originalidad de la IA radica en su profunda conexión con el inconsciente humano. La profesora de Estudios Sociales en Ciencia y Tecnología en el MIT, y fundadora y directora del Institute of Technology and Self, Sherry Turkle (1948) publicó en *Time* (2013) el artículo *Ten cuidado con lo que deseas*, en el que concluye «Somos criaturas de la historia, de la psicología profunda, de las relaciones complejas. No creo que que-

11. SÁNCHEZ RON, 2024, pág. 55.

ramos cambiar eso. No estamos destinados a ser pasivos, debemos desafiar los placeres y tribulaciones del momento robótico, es un trabajo serio que debemos realizar» (Dorenbaum, 2023-26,27).

Por otra parte, la Fundación Juan March acogió el 13 de diciembre de 2023 el estreno de la ópera *La muerte y el industrial*, de Jorge Fernández Guerra (1952), en la que nos habla del anhelo de inmortalidad de un empresario que se interroga sobre su existencia eterna recurriendo a la IA y a la transmisión de su memoria cerebral a un programa de *software* (Reverter, 2023-53).

La IA puede convertirse en un asistente que nos hará la vida más fácil, o en una herramienta que nos sustituya y nos dejará sin trabajo, o en otra burbuja. Es sabido que la IA ha conseguido éxitos en entornos muy complejos, pero con reglas claras, como el ajedrez y el juego de mesa Go, de origen chino con fundamento taoísta, lo inventó el emperador Yao (2356-2255 a. C.) para iluminar a su hijo, Danzhu¹². En cambio, tiene más dificultades en entornos abiertos e imprevisibles, como con la conducción autónoma.

La IA puede ser capaz de enfrentarse a millones de factores muy difíciles de predecir y, con frecuencia, con normas que no se respetan siempre. Un desarrollo de la IA accesible, democrático y transparente, como ocurrió con la World Wide Web (www) es crucial, si se pretende que la IA vaya a transformar el mundo en el que trabajamos e interactuar en el mundo que nos rodea.

Numerosos científicos piensan que alcanzaremos la IA general, es decir comparable a la humana antes de 2031. Y de ahí por crecimiento exponencial a velocidad vertiginosa a la superinteligencia, es decir más inteligente que nosotros que a muchos expertos le da miedo, como he expuesto antes.

Desde hace algunas décadas los seres humanos piensan, por primera vez en la historia, que somos capaces de acabar con la humanidad. Primero fue la energía nuclear, luego el calentamiento global, ahora la IA.

Por otra parte, «Von Neumann llegó a la conclusión de que los métodos con que el cerebro opera son fundamentalmente distintos a los de una computadora. Todas utilizan una arquitectura similar a la que él creó, la MANIAC (*Mathematical Analyzer, Numerical Integrator, and Computer*)» (Labatut, 2023-265-266).

A la IA no le va muy bien cuando depende de los hechos, circunstancias o datos con los que se la han alimentado. También muestra sesgos, hace plagio a ilustradores, o desvela dependencias de programación. José María Álvarez-Pallete López (1963)¹³ afirma que la IA es capaz de completar una sinfonía de Beethoven, pero nunca será Beethoven. Y Emily Dickinson (1830-1886) en el poema *El cerebro*, escribe:

12. La IA es el nuevo desafío que recientemente ha estallado ante los ojos de la opinión pública masiva. El instante decisivo tuvo lugar el 10 de marzo de 2016, cuando el campeón de Go, Lee Sedol, se enfrentó a la IA, siendo derrotado por esta, cuando realizó un movimiento inesperado durante la partida, y conquistó el valor de la belleza y lo inesperado (Labatut, 2023-299,340).

13. Es presidente ejecutivo de Telefónica desde el 8 de abril de 2016. Desde el 31 de enero de 2022 ocupa la presidencia de la [GSMA](#) (Una organización de operadores móviles y compañías relacionadas, dedicada al apoyo de la normalización, la implementación y promoción del sistema de telefonía móvil).

- «El cerebro es más ancho que el cielo/ponlos juntos/ y uno contendrá al otro/ con facilidad, y a ti además».
- «El cerebro es más profundo que el mar/ al contenerlos, azul con azul/ y el uno al otro absorberá/ como una esponja».
- «El cerebro es el solo peso de Dios;/ levántalos, libra por libra,/ y diferirán, si lo hacen,/ como la sílaba difiere del sonido».

El gran coste de los modelos de IA, la escasez de chips y las exigencias de una regulación, indican que el desarrollo de modelos generativos de IA está a punto de enfriarse, no por falta de entusiasmo sino por imperativo material. La cadena de suministros no está a la altura de la demanda, y la guerra por los componentes y materiales para la IA se intensifica. Lo cual incide en que solo puede ser desarrollada por empresas con un billón de dólares de capitalización. La escasez y exclusividad de recursos consolida a los gigantes. Por ejemplo, Nvidia, una compañía de chips, en mayo de 2023, se convertía en la décima de la historia en superar el billón de dólares de valoración en Bolsa.

La IA puede ser una herramienta útil, o en una amenaza, o en ambas cosas. Gavin Mueller dice que el peligro no es sólo que sustituya una máquina al hombre, que también, sino que porque se polarice el mercado de trabajo, porque haya muy pocos empleos buenos y una gran masa de trabajadores en precario. Incluso los sistemas muy automatizados necesitan mucho trabajo de mantenimiento, desde el entrenamiento de los sistemas hasta la moderación y el control de los resultados. Estos son empleos degradados, repetitivos, insatisfactorios, muy controlados y mal pagados.

Mueller recuerda que la Revolución Industrial terminó creando más empleos de los que destruyó. Sin embargo, los estándares de vida cayeron durante décadas. Para muchos, ese proceso fue una catástrofe. Es decir, aunque los cambios puedan ser mejores, podemos cuestionar la forma en la que se introducen las innovaciones y si los trabajadores han de asumir los costes¹⁴.

Una encuesta del Instituto 40dB sobre satisfacción laboral recoge un importante grado de preocupación respecto a la IA, un 58% cree que destruirá empleos generando un conflicto social grave.

La huelga de guionistas de Hollywood en 2023, durante 148 días, además de defender sus empleos frente a la IA, pusieron de manifiesto que querían experimentar arte y sentir emociones. No se va al cine a ver el guion generado de la forma más eficiente.

El actor irlandés Gabriel Byrne (1950) se muestra muy crítico con la imposición de la IA y las plataformas: «La era del cine tal y como la conocemos puede que esté en sus días finales, porque vivimos en una sociedad de la posverdad, donde lo falso y lo artificial se acepta como algo tan válido o más que la realidad».

El Foro de Davos, en la cumbre celebrada en enero de 2024, prevé una nueva era económica, por la introducción cada vez más acelerada de la IA generativa, que pro-

14. En *Romper cosas en el trabajo: los luditas saben por qué odias tu empleo*, Mueller relata la fascinante historia no contada de cómo los antiguos imaginaron robots y otras formas de vida artificial, e incluso inventaron máquinas automatizadas reales.

mete grandes avances de productividad, aunque también considerable destrucción de empleos, que podrán ser sustituidos por otros, pero no necesariamente al mismo tiempo y no para las mismas personas.

RECONOCIMIENTOS DE LA IA

La palabra inteligencia artificial ha sido seleccionada por Collins Dictionary como la Palabra del Año 2023. La firma editora del diccionario considera que el concepto condensa la revolución que en las distintas esferas han generado los modelos de lenguaje, despertando a partes iguales la fascinación y la preocupación en la sociedad y las empresas respecto a las oportunidades y desafíos que brinda esta técnica. Define IA como *El modelado de las funciones mentales humanas mediante programas informáticos*, un término que asegura que capta muy bien la naturaleza profunda del desafío que enfrentamos como sociedad.

En *infobae.com*, 2 de noviembre de 2023) se lee: *La IA irrumpió en la conciencia pública a finales de 2022, cautivándonos con su capacidad de imitar el habla humana natural. De hecho, podría hacer mucho más que eso. Y aunque la gente estaba comprensiblemente fascinada, también empezaron a ponerse un poco ansiosa. Si de repente las computadoras se convirtieran en expertas en el más humano de los dominios, el lenguaje, ¿qué pasaría después?*

Otras organizaciones académicas de diferentes países han elegido en 2023 la IA en primer lugar de su lista.

La IA ha impulsado la subida de la Bolsa durante 2023, y ha sido el escaparate financiero al proliferar productos vinculados a ella.

El Rector de la Universidad de Sevilla expuso el 5 de diciembre de 2023 que está en estudio introducir estudios relacionados con la IA en las titulaciones de la Facultad de Filología.

BIBLIOGRAFÍA

- BAUM, Z., *El aprendizaje automático en la química*, Information Scientist, CAS, setiembre 2021.
- BLANCO, C., *Las fronteras del pensamiento*, Librería-Editorial Dickinson, Madrid, 2022.
- BOSTROM, N., «A history of transhumanist thought», *Journal of Evolution and Technology*, Vol. 14, nº1, abril, 2005.
- CASTILLO, M., «Alberto Magno: precursor de la ciencia renacentista», *Themata. Revista de Filosofía*, nº 17, 1996.
- DORENBAUM, D., «El psicoanálisis contiene también herramientas para analizar la relación emocional que creamos con las inteligencias artificiales», *El País semanal*, 5-X-2023.
- DROZ, G., *Los mitos platónicos*, Editorial Labor, S.A., Barcelona, 1993.
- FERRERO, R., *Autómatas y cabezas parlantes. historia de los dispositivos que han hecho evolucionar nuestras vidas*, Editorial Almuzara, Madrid, Colección Enigma, 2023.
- GARDNER, H., *Inteligencias múltiples: la teoría en la práctica*, Editorial Paidós, Barcelona, 2019.
- GOLEMAN, D., *Inteligencia emocional*, Editorial Kairós, Barcelona, 1996.

- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, S., *Campo de guerra* (Editorial Anagrama, Barcelona, 2014).
- HUXLEY, J., *New bottles for new wine*, Edita Chatto & Windus, Londres, 1957.
- LABATUT, B., *Maniac*, Editorial Anagrama, Barcelona, 2023.
- LARSON, E.J. *El mito de la Inteligencia Artificial. Por qué las máquinas no pueden pensar como nosotros lo hacemos*, Ed. La Letra, S.L. Barcelona, 2022.
- MAYOR, A., *Gods and Robots: Myth, Machines, and Ancient Dreams of Technology*, 2018.
- MIRKES, R., «Transhumanist Medicine: Can We Direct Its Power to the Service of Human Dignity?» *The Linacre Quarterly*, n°29, marzo, 2019.
- MUELLER, G., *Romper cosas en el trabajo: los luditas saben por qué odias tu empleo*, Editorial Melusina S.L., Santa Cruz de Tenerife, 2023.
- PORTER, R. y TEICH, M., eds., *La revolución en la Historia*, Editorial Crítica, Barcelona, 1990.
- REVERTER, A., «Ópera inmortal gracias a la IA», *El Cultural*, 8-12-2023.
- SÁNCHEZ RON, J.M., «Atlas de un tiempo crucial», *El Cultural*, 15-12-2023.
- «Tecnología, una cuestión de supervivencia», *El Cultural*, 8-12-2023.
- «Condorcet, el matemático que creyó en la Revolución Francesa», *El Cultural*, 26-1-2024.
- SEQUEIROS L., *¿Podrían construirse inteligencias artificiales conscientes?*, 20-XI-2023.
- STERNBERG, R., *La Teoría Triárquica de la Inteligencia: comprender el autogobierno mental*, Editorial Paidós, Barcelona, 1985.
- SUÁREZ, J.L., *La condición digital*, Editorial Trotta, Madrid, 2023.

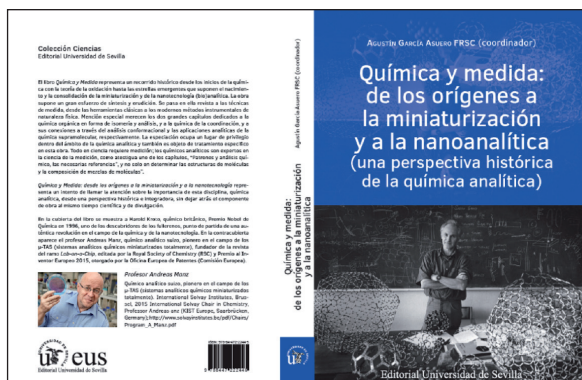
SIN DIAGNÓSTICO LA MEDICINA ES CIEGA: PUNTOS DE ATENCIÓN (POC) E INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS (IoT_M). Parte I

*Conferencia pronunciada por el
profesor D. Agustín García Asuero,
el día 4 de marzo de 2024*



Esta intervención está extraída en parte del Libro “Química y Medida: de los orígenes a la Miniaturización y a la Nanoanalítica (una perspectiva histórica de la química analítica)”, del que soy autor (Asuero, 2022b; Fig. 1), con mezclas de una ponencia sobre “Algunos avances recientes y tendencias emergentes en métodos analíticos para COVID-19” expuesta en el IX Encuentro de la Asociación Iberoamericana de Academias de Farmacia –Lima, Octubre 2021– primero, y en el Congreso de la Federación Centroamericana y El Caribe de Ciencias Farmacéuticas, El Salvador, Abril, 2022, después. Se ha generado además un video didáctico (Asuero et al. Fig. 2): “Química Analítica y COVID-19: métodos de detección”, basado a su vez en un trabajo previo nuestro (Martin et al., 2021) publicado en el Microchemical Journal. Un capítulo de libro detallado y extenso, del mismo nombre que la ponencia aludida (Martin et al., en prensa), englobado en la obra “COVID-19: una aproximación pluridisciplinar”, de la que soy coordinador (Asuero, en prensa), que aúna en 31 capítulos y 64 autores a 17 Academias y 25 Instituciones, entre ellas 12 Universidades, verá la luz próximamente.

FIGURA 1
PORTADA Y CONTRAPORTADA DEL LIBRO “QUÍMICA Y MEDIDA: DE LOS ORÍGENES A LA MINIATURIZACIÓN Y A LA NANOANALÍTICA”



**VÍDEO DIDÁCTICO “QUÍMICA ANALÍTICA Y COVID-19: MÉTODOS DE DETECCIÓN”.
SERVICIO DE RECURSOS AUDIVISUALES Y NUEVAS TECNOLOGÍAS.
UNIVERSIDAD DE SEVILLA**



Los microorganismos patógenos, incluidos virus, bacterias, parásitos y hongos son la causa de la mayor parte de las enfermedades infecciosas (Chen et al., 2019; Ciotti, 2024), que en contraste con las demás, pueden transmitirse entre la población de forma exponencial en un período de tiempo relativamente corto, amenazando la salud pública general y, potencialmente, la economía. La reciente pandemia del síndrome respiratorio agudo grave SARS-CoV-2 causante de la COVID-19, descubierta en la provincia de Hubei (China) en diciembre de 2019 constituye un trágico ejemplo (Kostarelos, 2020). Se han utilizado pruebas de ácido nucleico y de tomografía computarizada en el diagnóstico y la detección de COVID-19. Las técnicas moleculares son más adecuadas que las pruebas sindrómicas y la tomografía computarizada para diagnósticos precisos porque pueden identificar patógenos específicos (da Silva, 2020; Udugama et al., 2020). El desarrollo de técnicas moleculares (Rolando et al., 2024) depende del conocimiento i) de la composición proteómica y genómica del patógeno o ii) la inducción de cambios en la expresión de proteínas/ genes en el huésped durante y después de la infección.

Las pruebas serológicas con proteínas tienen la ventaja (Yadav et al., 2019) de la detección después de la recuperación, proporcionando una mejor estimación del total de infecciones por SARS-CoV-2. La detección de antígeno mediante flujo lateral para SARS-CoV-2 es una prueba de punto de atención para diagnosticar COVID-19 (Budd et al., 2023; Saweres-Argüelles et al., 2025). Las pruebas de ácido nucleico también se pueden incorporar en el ensayo de flujo lateral (RT-LAMP, amplificación isotérmica mediada por bucle de transcripción inversa) (Dong et al., 2023; Martin et al., 2021).

DISPOSITIVOS DE PUNTO DE ATENCIÓN

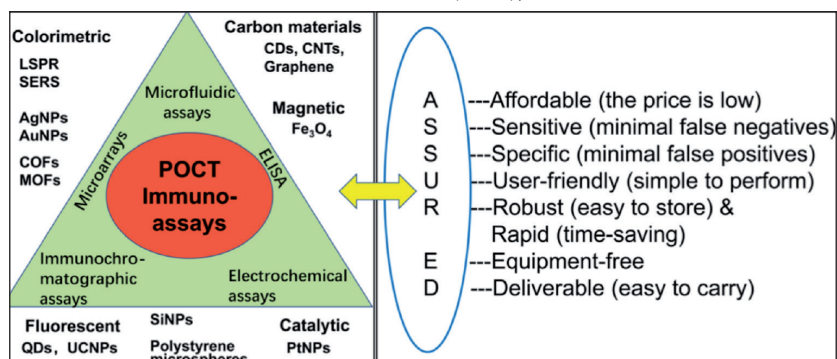
Las técnicas de diagnóstico (Ciotti et al., 2024; Dong et al., 2023; Rai et al., 2021) como PCR, ELISA, citometría de flujo, hemocultivo, microscopía óptica, espectrome-

tría de masas (Ferreira et al., 2024; Saadi et al., 2021; Wörner et al., 2021; Zhou et al., 2023), requieren personal capacitado y disponer de una instrumentación costosa. Los dispositivos de pruebas de punto de atención (point of care testing, POC), aunque no sustitutivos de pruebas de laboratorio más sofisticadas, proporcionan un medio de detección inicial rápido en entornos fuera de laboratorio, incluida la consulta médica, ambulancia, hogar y lugares remotos (Adodokun et al., 2024; Canciu et al., 2023; Everit et al., 2021; Kant et al., 2024; Lee et al., 2023).

El diagnóstico juega un papel vital en el ámbito sanitario y su fiabilidad y precisión ejercen una fuerte influencia en la toma de decisiones clínica, el tratamiento y la tasa de supervivencia del paciente: “Without diagnosis, medicine is blind”. El diagnóstico temprano en el desarrollo de una enfermedad es clave para conseguir un tratamiento eficaz, llegando a convertirse a veces en una cuestión de vida o muerte en el caso de las enfermedades más graves. Se estima que más de la mitad de la población mundial está en riesgo de contraer enfermedades infecciosas, lo que las convierte en una de las amenazas más peligrosas para la humanidad.

Las pruebas de punto de atención (POC), realizadas por el personal clínico o por el propio paciente, brindan resultados rápidos “in situ” en el lugar de la prestación de la asistencia y en entornos con recursos limitados (Mujawar et al., 2020; Valera et al., 2021), que incluyen escenarios con electricidad poco fiable, condiciones no estériles y falta de personal capacitado para realizar las tareas típicamente reservadas a las enfermeras y profesionales de la salud, lo que aconseja en dichas circunstancias su uso. Según la Organización Mundial de la Salud (Mabey et al., 2004), las pruebas de POC que abordan las necesidades de control de enfermedades infecciosas, especialmente en los países en vías desarrollo, deben seguir (Fig. 3- Hou et al., 2023; Madhranrakam et al., 2022) criterios “ASSURED”: (1) asequibles, (2) sensibles, (3) específicos, (4) fácil de usar, (5) rápido y robusto, (6) sin equipo y (7) trasladable a los usuarios finales. Además de las aplicaciones en el ámbito de la salud, las pruebas de POC se utilizan en otras áreas como la bioseguridad, el medio ambiente o la seguridad alimentaria.

FIGURA 3
PRINCIPALES ESTRATEGIAS DE POC Y NANOPARTÍCULAS, E INTERPRETACIÓN DE LOS CRITERIOS ASSURED (OMS), DEL ENSAYO POC



Las POC minimizan el retraso y el gasto inherente al requisito de disponer de un laboratorio centralizado (Adedokun et al., 2024). Las pruebas de laboratorio más costosas pueden usarse de manera juiciosa para confirmar los resultados de la detección y proporcionar información más detallada cuando sea necesario. El dispositivo médico de punto de atención de mayor éxito y significación a nivel mundial (Asuero, 2022b) se desarrolló en la década de 1970: el monitoreo de glucosa en sangre para los pacientes con diabetes. Este dispositivo utiliza una enzima inmovilizada (glucosa oxidasa o deshidrogenasa) en una tira de prueba desechable. Millones de personas lo usan diariamente en todo el mundo por lo que representa el “estándar de oro” de los dispositivos de diagnóstico POC (Khan et al., 2024).

Los logros cosechados en la última década en el campo de las pruebas de atención de enfermedades infecciosas, que incluyen técnicas de microfluidos (Li et al., 2024; Manz et al., 2020; Sahin et al., 2021) y plasmónicos (Kant et al., 2024; Khani et al., 2024; Ramirez-Priego et al., 2024), han sido notables, aunque es preciso realizar validaciones estrictas para trasladar estas técnicas de la investigación a la práctica clínica diaria. Cuestiones relacionadas con el control de las infecciones, pruebas en entornos confinados, conectividad de la tecnología de la información y la optimización de la vía clínica son importantes de cara a afrontar los desafíos que conllevan y conseguir el éxito en su implementación. Cuánto más simple y menos costoso sea el dispositivo de prueba, mejor, siempre que sea lo suficientemente preciso y fiable.

Uno de los problemas más importantes a resolver con un dispositivo POC de diagnóstico molecular es la preparación (simplificación) de la muestra (Adedokun et al., 2024; Gavina et al., 2023). El futuro del diagnóstico viral radica en la descentralización, en la necesidad de disponer de POC que produzcan resultados en 5 minutos y no requieran un equipo especial (saliva, anticuerpo, antígenos portátiles, tests kits, dispositivo de análisis por inmunofluorescencia, RT-PCR, RT-LAMP portátiles). El diagnóstico precoz es el pilar para iniciar la terapia más eficiente, acelerando en gran medida las decisiones sobre el tratamiento que salvan vidas, contribuyendo al control y la posible prevención de una pandemia emergente.

A pesar de lo expuesto, los ingresos en el campo de la microfluídica se generan muchas veces de empresa a empresa, en lugar de empresa a consumidor. La mayor parte de la investigación concluye (Asuero, 2022b) en la etapa de demostración sin desarrollo de productos destinados a usuarios finales. Las altas inversiones iniciales y los costos de fabricación constituyen un obstáculo para su salida al mercado (Asuero, 2022b), a pesar de que los miles de publicaciones existentes ofrecen soluciones para casi todos los problemas posibles. El desarrollo de un producto de laboratorio en un chip sigue siendo una tarea compleja y engorrosa que contempla riesgos técnicos y financieros.

El aumento de la prevalencia de enfermedades crónicas que requieren una terapia farmacológica, el incremento del producto interior bruto (PIB) en muchos países y la disminución de las barreras arancelarias para los nuevos medicamentos son algunos de los factores claves que impulsan la industria farmacéutica. Ésta requiere un cambio de filosofía en la financiación de la investigación biomédica (Jalali-Heravi et al., 2015) que ponga en su punto de mira a la medicina predictiva, personalizada y preventiva, con

objeto de que la microfluídica alcance un mayor auge. El retraso de la propia tecnología microfluídica dificulta además la puesta a punto de dispositivos de “pruebas de punto de atención” integrados y fáciles de usar por personas no expertas.

El no poder garantizar resultados concluyentes en pruebas con los pacientes también es un obstáculo patente. Los desafíos tecnológicos, las preocupaciones comerciales y de propiedad intelectual y los obstáculos reguladores constituyen un freno adicional (Jalali-Heravi et al., 2015) al potencial uso de la microfluídica. En pocos estudios se utilizan métodos estadísticos y computacionales para examinar el efecto de las variables experimentales en la respuesta de salida, clasificación de datos y procesamiento de señales y, sin estos estudios de optimización, existen dificultades para encaminar los productos al ámbito de la comercialización.

La industria farmacéutica ha incorporado la miniaturización, la integración y la automatización en muchos de sus sectores de investigación y desarrollo (Halali-Heravy et al., 2015); casi todas las empresas que llevan a cabo investigación son conocedoras de las tecnologías microfluídicas y modifican sus planes estratégicos contando con la miniaturización. La utilización de sistemas de automatización robótica por parte de las compañías ya no es rentable debido a su coste y gastos de mantenimiento. Las plataformas microfluídicas son una opción viable debido a los bajos costos, los menores requisitos de mantenimiento y espacio y los pequeños volúmenes necesarios. La Microfluídica reúne todas las técnicas (Whitesides, 2006; Asuero, 2022b) que hacen posible manejar volúmenes de líquidos del orden de 10^{-9} a 10^{-18} L, utilizando canales con dimensiones de decenas a cientos de micrómetros.

La industria farmacéutica necesita herramientas innovadoras que sirvan de guía en la búsqueda de nuevos medicamentos (Vora et al., 2023) y predigan su comportamiento en sujetos humanos a partir de los efectos observados en animales y células. El uso de sistemas analíticos microfluídicos para monitorear y optimizar la producción (Asuero, 2022b; Whitesides, 2006) de proteínas proteicas tales como anticuerpos terapéuticos o ensayos basados en células primarias humanas (células cultivadas directamente desde un sujeto) con el propósito de predecir la eficacia de ensayos clínicos en humanos (complicado pero factible en algunos casos) son aplicaciones analíticas interesantes en este sentido.

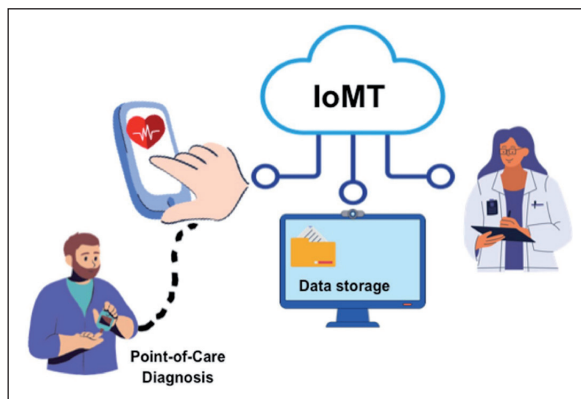
LOS TELÉFONOS INTELIGENTES

Los teléfonos inteligentes aparecen en el mercado a finales de los 90, convirtiéndose estos “teléfonos con funciones” en computadoras portátiles. Tras el lanzamiento del “iPhone” de “Apple” en 2007, los teléfonos inteligentes se hacen muy populares (Asuero, 2022b). Más de un tercio de la población mundial cuenta con uno de ellos, fabricándose la mayor parte en China y Corea. Con la aparición de técnicas de detección basadas en los teléfonos inteligentes (Asuero et al., 2022b; Ceballa-Koukoula et al., 2023; Li et al., 2023; Ross et al., 2023; Udugama et al., 2020) que pueden realizar análisis de imágenes automático de señales colorimétricas y mostrar el resultado de la

prueba al usuario, los diagnósticos cuantitativos veraces de POC utilizando dispositivos en papel pueden convertirse en realidad. Sin embargo, en términos de comercialización, la microfluídica de papel tiene todavía que superar (Lim et al., 2021) desafíos significativos para convertirse en un formato de prueba de punto de atención auténtico con las capacidades avanzadas de purificación de analitos, análisis multiplexor, cuantificación y detección con alta sensibilidad y selectividad.

Al usar la cámara del teléfono inteligente y la capacidad de procesamiento, resulta posible la lectura automática, el análisis y la comunicación de los resultados del ensayo. Si bien los beneficios son obvios, el tema no se encuentra exento de dificultades (efecto de las condiciones de la iluminación ambiental, detección de sacudidas, análisis rápido de datos). El acoplamiento de los dispositivos con nuevas aplicaciones en teléfonos inteligentes para el control de la salud personal tendrá un gran impacto (Xiao et al., 2024) en el sistema de atención médica en un futuro próximo. A través de la computación en la nube, tecnologías digitales innovadoras y aprendizaje automático, las aplicaciones médicas basadas en los teléfonos inteligentes van a modificar las características del diagnóstico de la atención médica convencional (Fig. 4 -Ramalingam et al., 2023; Mauro et al., 2024).

FIGURA 4
INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS COMBINADO CON PLATAFORMAS BASADAS EN
TELÉFONOS INTELIGENTES PARA APLICACIONES POC



La mejora de la velocidad y facilidad de comunicación de los teléfonos inteligentes se pueden aprovechar para controlar la propagación de enfermedades (Lukas et al., 2020), dado que poseen la conectividad, la potencia computacional y el hardware necesario para facilitar la presentación de informes electrónicos, la base de datos epidemiológicos y las pruebas en el punto de atención, contribuyendo al desarrollo de la plataforma IoMT (Internet of Medical Things), internet de las cosas médicas – salud móvil (Xiao et al., 2024). Al combinarse con pruebas de diagnóstico preexistentes proporcionan información geoespacial (GPS) en tiempo real que permita a las agencias de salud nacionales y mundiales implementar estrategias de control coordinadas frente a

los brotes epidémicos (Udugama et al., 2020); los teléfonos inteligentes permiten digitalizar el proceso de rastreo de contactos para proporcionar registros más completos y compartibles. Dada que ésta es un área de investigación altamente interdisciplinaria (Erdem et al., 2022) que incluye microbiología clínica, química analítica, microfluídica e informática, la estrecha colaboración entre ingenieros, químicos, médicos, e inversores (socios de la industria) es crucial, de cara al desarrollo de la tecnología de detección de patógenos basada en teléfonos inteligentes de próxima generación.

En adición a la tecnología de los teléfonos celulares, el desarrollo de relojes, anteojos o gafas inteligentes (O’Callaghan, en imprenta) o dispositivos portátiles dérmicos con sensores integrados (Clark y Ray, 2023; Gong et al., 2024; Lee, 2021; Mayer y Baeumner, 2019; Min et al., 2023) o conectables representa una nueva opción. La prueba de diagnóstico rápido basada en “Google Glass” consiste en un sistema de computación manos libres controlable por voz con capacidades de imágenes y grabación de video y varias tecnologías inalámbricas (Bluetooth y Wi-Fi) para mediciones cuantitativas de ensayos de flujo lateral y pruebas de diagnóstico. Se han descrito como aplicaciones la detección del virus de inmunodeficiencia humana (VIH) y las pruebas rápidas de antígeno prostático específico (PSA), entre otras.

LA INTERNET DE LAS COSAS

Internet de las cosas (IoT) es una megatendencia que cubre todas las disciplinas científicas e ingenieriles y establece una evolución técnica integradora para mejorar la eficiencia de la producción y la vida humana cotidiana. (Capella et al., 2020; Mayer and Baeumner, 2019; Mitton y Simplot-Ryl, 2011; Nagajayanthi, 2022) La Unión Internacional de Telecomunicaciones define IoT como “Una infraestructura global para la sociedad de la información, que permite servicios avanzados interconectando cosas (físicas y virtuales) basadas en tecnologías de información y comunicación interoperables existentes y en evolución”. La ISO la describe como “Una infraestructura de objetos, personas, sistemas y recursos de información interconectados junto con servicios inteligentes que les permitan procesar información del mundo físico y virtual y reaccionar” (Trappey et al., 2017).

El término IoT, que forma parte del diccionario de Oxford desde 2013, es introducido en 1999 por Kevin Ashton (1968-), británico, cofundador del Auto-ID Center en el MIT y creador del sistema estándar RFID (radio frequency identification). Desde la invención del primer dispositivo conectado a la Web en 1990, IoT merece una gran atención (Mayer y Baeumner, 2019) consecuencia del crecimiento exponencial de los ordenadores y la tecnología de Internet desde mediados de los noventa. Los grandes avances acontecidos en la electrónica junto con la democratización de las comunicaciones y dispositivos asimilados (disminución de tamaño, consumo y precio) han hecho posible esta utopía (Capella et al., 2020). El concepto es parecido al de “Cloud Computing”; las capacidades de comunicación se utilizan para ofrecer servicios ubicados en un conjunto de servidores (nube) a los clientes conectados.

Los usuarios comienzan a emplear una gran cantidad de dispositivos informáticos diferentes (computadoras personales, teléfonos inteligentes, periféricos portátiles, aplicaciones de hogares inteligentes, etc.) en muchos lugares (Capella et al., 2020). Esto conduce a la necesidad de crear un acceso “único” a la información, esté donde esté y sin importar el ordenador que se utilice. Esto hace necesario establecer un lugar común para almacenar la información apareciendo primero el concepto de “nube” y el de “Cloud Computing” después (Sachdeva et al., 2024).

La Internet de las Cosas (IoT) es una colección de dispositivos, seres humanos, objetos y servicios interconectados que comparten datos para lograr un objetivo común en diferentes áreas y aplicaciones (Nagajayanthi, 2022; Mayer y Baeumner, 2019). IoT se utiliza en muchos dominios diferentes, como la atención médica, la agricultura, el transporte, y la distribución y producción de energía. La integración de tecnologías con dispositivos móviles (teléfonos inteligentes) brinda nuevas oportunidades en variadas áreas. En el campo del diagnóstico médico, representan un cambio de paradigma que permite la provisión de atención médica móvil y medicina personalizada. Tanto AI como IoT / IoMT (Internet de las cosas / Internet de las cosas médicas) pueden combinarse con, e.g. inmunosensores, para prevenir y manejar la COVID-19, brindando enfoques específicos y sensibles cada vez más rápidos y económicos a través de la administración de bases de datos, intercambio y análisis en red (Ahmed et al., 2024).

Nuevos sistemas de detección de la COVID-19 de forma remota basados en IA e IoT / IoMT y la combinación de varios sensores médicos inteligentes (sensores de pulso, térmicos y sanguíneos) están bajo escrutinio y estudio (Alavi et al., 2022; Xiao et al., 2024). Estos sistemas de plataformas de diagnóstico “en línea” recopilan datos invaluable de los pacientes de forma remota y los suben a la nube. Así, los médicos tienen acceso a ellos en tiempo real (Ates et al., 2021; Faham et al., 2023; Kalasin y Surareungchai, 2023; Haleem et al., 2022; Varnosfaderani y Forouzanfar, 2024). Caminamos en la dirección correcta hacia el paradigma revolucionario de la medicina de precisión (Asuero, 2022a; Min et al., 2023; Chakraborty et al., 2024; He et al., 2023). Se logra un rápido desarrollo en la industria de la IoT debido tanto a la red de sensores inalámbricos (WSN) que permite la comunicación entre dispositivos y a la identificación por radiofrecuencia (RDF), que permite el etiquetado de dispositivos.

Los avances en la Industria 4.0 incluido el IoT, las redes móviles, la computación en la nube y la IA hacen posible la conexión de los pacientes con los profesionales de la salud (Alowais et al., 2023; Devi et al., 2023; Haleem et al., 2022). Esto puede aplicarse en la prevención del contagio, mejora del diagnóstico, promoción de entornos virtuales de aprendizaje y oferta de servicios a distancia. Todo esto plantea problemas de índole ética, técnica, de seguridad y legal. La realidad aumentada (AR) y la realidad virtual (VR) (Ahmad, 2023; Walker et al., 2023) constituyen aportaciones novedosas (e.g. puede ayudar a simular el SARS-CoV-2 de forma visual) para explorar las condiciones médicas y mejorar el diagnóstico visual. La inteligencia artificial y la visión por computadora pueden aplicarse para mejorar la experiencia de los proveedores de atención médica y ofrecer entornos personalizados para la enseñanza clínica.

ROBOTS

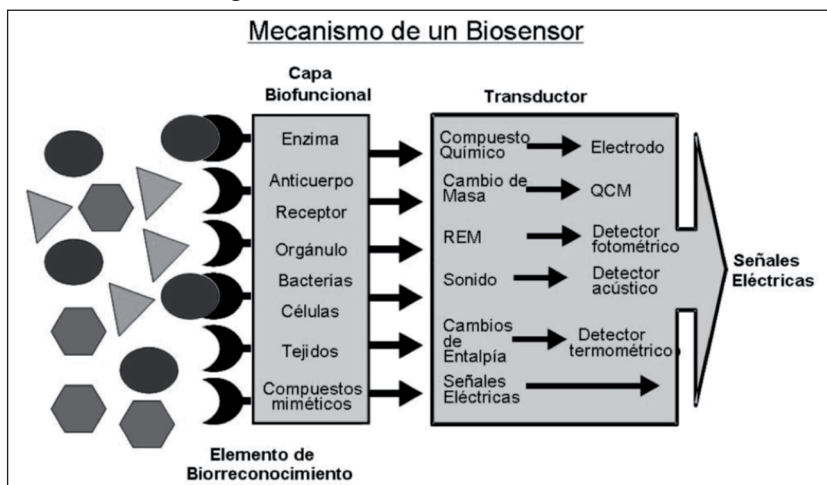
Estrategias innovadoras, e.g. robótica, drones, e IA se han aplicado para contrarrestar la situación originada por la pandemia de la COVID-19 (Morgan et al., 2022; Teng et al., 2022; Thomas et al., 2021; Wang y Wang, 2021; Wang et al., 2023). La tecnología ha demostrado su potencial en aspectos como la administración de medicamentos, la vigilancia, el cribado de pacientes y la desinfección. Las tecnologías comunes incluyen teleoperación, robots de servicio autónomos, reconocimiento facial, escaneo térmico y otros sistemas inteligentes para reducir, controlar o diagnosticar el virus. Muchas de las soluciones aportadas exigen todavía la supervisión humana. Los robots son inmunes a las infecciones y se desinfectan con facilidad.

Los drones se emplean también en la detección y el monitoreo en los sectores de locomoción, atención médica, desinfección y logística (Khan et al., 2021; Mbunge et al., 2020; Wang et al., 2023). Con la incorporación simultánea de algoritmos de aprendizaje automático e inteligencia artificial, los robots resultan ser más efectivos en el tratamiento y diagnóstico de infecciones (detección masiva y adquisición de datos para interpretación de informes de salud, realización de tareas repetitivas con escaso margen de error). Los servicios de telemedicina (Sikander et al., 2023) ayudan a disminuir el riesgo de contagio de la COVID-19 al reducir el número de personas que deben acudir al hospital, teniendo éxito tanto en situaciones de emergencia, como en chequeos de rutina (Kalasin y Surareunchai, 2023). Aunque el coste de los robots es elevado, la crisis de la pandemia ha forzado en cierto grado la transformación digital. De cara al futuro es importante acoplar las tecnologías avanzadas de IA y de 5G con objeto de mejorar la flexibilidad y funcionabilidad de los robots y cotejar consideraciones de coste y producción para facilitar el acceso a las soluciones robóticas (Wang et al., 2023).

BIOSENSORES

Un dispositivo biosensor incluye un elemento de reconocimiento biomolecular para conferir selectividad y un elemento de transducción de señales para permitir un análisis cuantitativo o semicuantitativo (Asuero, 2022b; Ortega, 2006). La interacción entre las moléculas de analito y el elemento de biorreconocimiento (por ejemplo, una capa de moléculas de biorreceptor) en un receptor genérico provoca la transducción de un cambio físico-químico medible, como flujo de corriente, transferencia de calor, cambio de masa o índice de refracción, o propiedades mensurables más sofisticadas (Fig. 5 – Ortega, 2006). Las señales capturadas se amplifican y procesan posteriormente de manera adecuada para proceder con el análisis de datos. En general, las principales ventajas de los biosensores son la relación coste/beneficio, el tamaño reducido de muestra, y la buena reproducibilidad, así como una detección rápida y una alta sensibilidad.

FIGURA 5
MECANISMO DE FUNCIONAMIENTO DE UN BIOSENSOR INCLUYENDO LOS ELEMENTOS QUE ENTRAN EN SU COMPOSICIÓN



Entre los biosensores más comunes se encuentran los siguientes : biosensor electroquímico (Baskar et al., 2025; Brazaka et al., 2021), biosensor basado en transistor de efecto de campo (FET) (Al-Hardan et al., 2024; Sadighbayan et al., 2020; Yu et al., 2023), biosensores basados en resonancia de plasmón de superficie localizada (LSPR) (Kant et al., 2024; Khani y Rezaei, 2024), biosensor basado en dispersión Raman y mejora de superficie (SERS) (Liu et al., 2024; Sitjar et al., 2024). Los biosensores electroquímicos se han utilizado profusamente en la detección de ARN viral, proteínas, anticuerpos moleculares pequeños y partículas virales completas. La diana se puede reconocer usando una reacción antígeno-anticuerpo, hibridación de ARN, ADN o ácidos nucleicos peptídicos o aptámeros que se unen a la diana con alta afinidad y especificidad. La interacción biológica de estos procesos se traduce en señales eléctricas, midiendo luego propiedades electroquímicas como capacitancia, acumulación de carga, conductancia, corriente, impedancia o cambios de potencial.

Una membrana de célula de riñón, modificada con el anticuerpo SARS-CoV-2 SpikeS1, permite detectar el antígeno SARS-CoV-2 S1 (Mavrikou et al., 2020). Los cambios en el potencial de la membrana se producen al interactuar el anticuerpo con la proteína diana. El conjunto está fabricado sobre ocho electrodos serigrafados en oro, cubiertos con una capa de polidimetilsiloxano (PDMS) con ocho pocillos. El sensor logra una excelente sensibilidad.

Para la detección del SARS-Cov-2 en la saliva, se preparan perlas magnéticas combinadas con electros serigrafados a base de negro de carbón (Fabiani et al., 2021) con objeto de centrarse en las proteínas S y N. La técnica incluye: prerrecubrimiento de partículas magnéticas, inmunoensayo de partículas magnéticas de soporte sólido con anticuerpo indicador marcado con fosfatasa alcalina, y acabado electroquímico. El 1-naftol,

resultante de la escisión enzimática del 1-naftilfosfato por fosfatasa alcalina, se analiza mediante la técnica de voltamperometría diferencial de pulsos. Entre las principales ventajas de esta metodología se tiene el corto tiempo de análisis (<30 min), muestreo sencillo (saliva sin tratar), fácil manejo (portátil) y ventajas de coste/beneficio en comparación con la RT-PCR.

Un anticuerpo anti-espiga (espícula) se une a las partículas del virus del SARS-CoV-2 para formar biosensores de efecto de campo basados en grafeno (Seo et al., 2020). El transistor de efecto de campo (FET) cubierto con un tampón (buffer) de solución salina para mantener un efecto de puerta eficiente, lleva a cabo la transducción de las señales eléctricas. El sistema FET activado por solución acuosa detecta el SARS-CoV-2 sobre la base de los cambios de potencial de la superficie del canal y los efectos correspondientes producidos en la respuesta eléctrica unos 10 minutos). El grafeno se selecciona como material de detección y la proteína S espiga y el anticuerpo de la proteína S espiga del SARS-CoV-2 se conjuga con la hoja de grafeno.

Las nanopartículas de oro (AuNPs) unidas a los anticuerpos, biomoléculas, proteínas y aptámeros también pueden aumentar las señales de resonancia de plasmón superficial localizada (LSPR) y espectroscopía Raman de superficie mejorada (SERS) y la transferencia de energía entre el fluoróforo y las nanopartículas de oro. Variados biosensores basados en nanomateriales permiten la detección del SARS-CoV-2 y virus relacionados. Un biosensor plasmónico de doble función utiliza (Qiu et al., 2020) el efecto fototérmico plasmónico (PPT) y la transducción de la señal LSPR para la detección de varios genes de secuencias virales del SARS-CoV-2. El dispositivo ideado es capaz de distinguir entre los virus SARS-CoV y SARS-CoV-2. El sensor muestra un límite de detección (LOD) de 0,22 pM.

Más recientemente, se ha desarrollado un inmunoensayo de flujo lateral basado en la espectroscopía Raman de superficie mejorada para detectar inmunoglobulinas M y G, IgM e IgG, simultáneamente (Liu et al., 2021). Para generar la dispersión las etiquetas se modifican con capas dobles de colorante Raman, el núcleo de sílice se encuentra completamente decorado con una capa de plata (SiO₂@Ag), que muestra una señal SERS aguda, buena monodispersabilidad y excelente estabilidad. Los anticuerpos antihumanos inmovilizados capturan los complejos IgM/IgG anti-SARSC-CoV-2 de la proteína SiO₂@Ag-proteína espiga S. La técnica propuesta presenta un buen comportamiento en el entorno clínico y es rentable.

Los biosensores colorimétricos también se han usado para detectar SARS-CoV-2; mostrando propiedades interesantes como respuesta rápida, precisión y rentabilidad. Se han utilizado nanopartículas de oro (AuNPs) recubiertas con oligonucleótidos antisentido (AsO) (Au-ASO) modificados con tiol en la detección específica del gen N (Moitra et al., 2020) a partir de un hisopo nasal. La prueba permite detectar la infección por SARS-CoV-2 en 10 min. El mecanismo de detección implica la aglomeración de la arquitectura de Au-ASO con el ARN diana del SARS-CoV-2, lo que conduce al desplazamiento hacia el rojo. La escisión de las cadenas de ARN del híbrido ARN-ADN se realiza mediante la adición de ribonucleasa H. Al final se forma un precipitado en la solución visible a simple vista, debido a la aglomeración adicional de AuNPs. El bio-

sensor muestra un LOD de 0,18 ng / ml para el ARN del SARS-CoV-2 y no se aprecia ninguna reactividad cruzada con el ARN viral de MERS-CoV.

IoT Y CLOUD COMPUTING

Los enfoques de “IoT” y “Cloud Computing” son complementarios; “IoT” se refiere a dispositivos de bajo costo (y por lo tanto recursos limitados) que interactúan con el mundo real, mientras que “Cloud Computing” se ocupa de sistemas altamente escalables, que brindan servicios a nivel virtual (Capella et al., 2020; Mathkor et al., 2024; Xiao et al., 2024). Ambos son especialmente adecuados cuando se utilizan sensores químicos y dispositivos relacionados en el monitoreo continuo en línea de parámetros (clínicos, geoquímicos, medioambientales...). La Química Analítica debe explorar los beneficios derivados de dichas tecnologías dadas sus características singulares, en especial la distribución temporal y la espacial de los parámetros medidos (Capella et al., 2020).

Al estar todo conectado a Internet (los laboratorios et inter), cada vez se dispone de más información lo que hace imprescindible el desarrollo de nuevas tecnologías, como las técnicas de “Data Science”, capaces de extraer información adecuada de una gran cantidad de datos, los llamados “Big Data” (Capella et al., 2020). Estos deben utilizarse de tal forma que se generen entornos inteligentes adaptados a nuestras necesidades, preferencias e intereses, con objeto de mejorar la calidad de vida. Esto a su vez implica el desarrollo de instrumentos de análisis químicos destinados a integrarse en los ecosistemas de IoT que se alojarán en la nube, siendo necesario equipar los laboratorios con la infraestructura de comunicaciones requerida. Los fabricantes de dispositivos de detección podrán conocer en tiempo real como funcionan sus productos, lo que conducirá al desarrollo e implementación de mejores sensores y transductores. La información estará disponible además de forma inmediata, permitiendo así la adecuación del sensor al entorno y la implementación de dispositivos en condiciones de trabajo extremas.

La integración en la nube permitirá la evolución del antiguo modelo de redes inalámbricas de sensores, según el cual un conjunto de nodos predeterminados monitorizaba un parámetro de forma continua, hacia nuevas redes colaborativas de sensorialidad (Capella et al., 2020), e.g. las llamadas WSN (Wireless Sensor Networks) y/o WSA (Wireless Sensors and Actuator Networks). La implementación de dispositivos cada vez más pequeños conduce a acoplarlos en objetos inteligentes ofreciendo nuevas oportunidades y aumentando su fiabilidad y duración. La simbiosis futura entre la Química Analítica y las Tecnologías de la Información (TIC) abre enormes perspectivas dentro del ecosistema de IoT y Nube. En un futuro próximo tendremos la necesidad de confiar no solo en sensores analíticos localizados, sino también en técnicas de laboratorio aún más complejas conectadas a la IoT a través de los mecanismos adecuados.

El auge de las nuevas tecnologías afronta la resolución de serios retos (Kokila y Reddy K, 2025) entre los que se destacan: a) la privacidad (no se puede acceder libremente a todos los datos); b) la seguridad (el acceso o uso indebido, o mal funcionamiento

to puede causar daños), c) integridad (los datos pueden ser incorrectos o manipulados), etc. La falta de estandarización en este sentido origina problemas de interoperabilidad ralentizando su aplicación.

La extensión de esta revolución técnica a la cadena de valor de áreas como la agricultura, la producción de alimentos y la atención médica requiere la implementación y conexión de métodos (bio) analíticos sofisticados. Hoy, los sensores portátiles (corporales), monitores y pruebas de diagnóstico en el lugar de atención (POC) son parte de nuestra vida diaria y mejoran la progresión médica de los pacientes o las capacidades de seguimiento de los atletas (desde el conteo de pasos y la monitorización del pulso hasta el control del electrocardiograma...) más allá de toda imaginación (Mishra et al., 2024; Polat et al., 2022; Sempionatto et al., 2020). Las primeras contribuciones hacia las redes de sensores y, finalmente, la revolución de la tecnología de la información con la recopilación y transmisión inalámbrica de datos a través de Bluetooth o teléfonos inteligentes han sentado las bases para conectar sensores remotos y servicios químicos analíticos distribuidos con laboratorios centralizados, almacenamiento en la nube y computación en la nube (Capella et al., 2020).

La vigilancia del medio ambiente reviste una gran importancia, siendo una de las mayores preocupaciones de nuestra sociedad (Asuero, 2022b). En este sentido, cada vez se utilizan más sistemas (con necesidades crecientes) para el control de los parámetros ambientales. Cuanto menor sea el límite de detección requerido y más dificultosa la identificación específica en una matriz dada, más sofisticadas son las plataformas de detección requeridas. Desafortunadamente, el nivel de complejidad que ofrecen los sensores que operan de forma autónoma y vinculados a la IoT está aún por debajo de los métodos de laboratorio de alto nivel (Capella et al., 2020). Se requieren por tanto más avances en la integración de otros tipos de sensores ambientales con la IoT,

SENSORES CORPORALES Y TELÉFONOS CELULARES

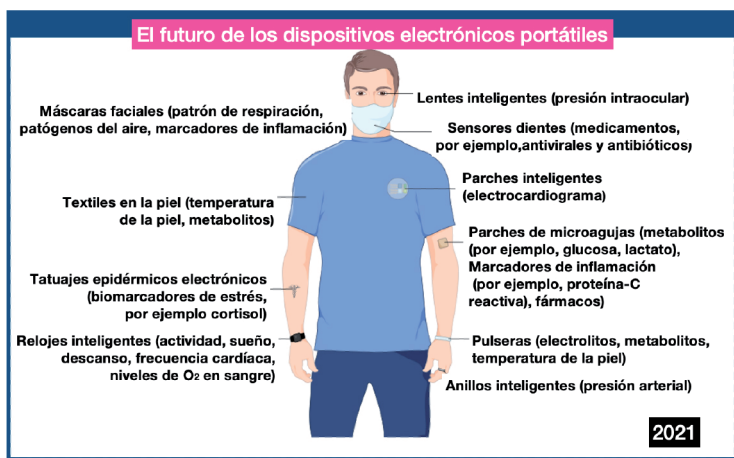
Con la aparición de dispositivos móviles y digitales médicos, los sensores portátiles han recibido una gran atención en aplicaciones relacionadas con la monitorización de las condiciones y el entorno del usuario (Faham et al, 2023; Ghosh y Mandal, 2021; He et al., 2024; Kalasin y Surareungchai, 2023; Li et al., 2021; Linch et al., 2025; Min et al., 2023; Sempionatto et al., 2020; Wang et al., 2023). Los sensores portátiles comúnmente rastrean la movilidad y signos vitales de los usuarios. La reciente introducción de sensores químicos no invasivos, que proporcionan en tiempo real de modo continuo el monitoreo de marcadores químicos, cubre un ámbito importante en la tecnología de sensores portátiles, necesarios para una gran cantidad de aplicaciones. Esta atractiva y emergente área de detección química portátil en el organismo representa un punto de transición en el distanciamiento del laboratorio común centralizado basado en sistemas analíticos implicados en ensayos analíticos “in vitro” de sangre u orina en tubos de ensayo. Tan importante revolución ha conducido a una variedad de sensores químicos portátiles que permiten el monitoreo continuo no invasivo de muchos analitos impor-

tantes en fluidos biológicos, como sudor, saliva, lágrimas y fluido intersticial, en lugar de sangre. Los sensores químicos portátiles representan un componente crítico en la química analítica descentralizada (Rodríguez et al., 2021), ya que realizan mediciones analíticas corporales para mejorar la salud, el bienestar y la seguridad humana, ofreciendo información analítica en tiempo real sobre la composición química de fluidos biológicos, que cambian de forma dinámica.

La transformación tecnológica ha cambiado muchos aspectos de nuestra vida. IoT / IoMT se utiliza en la detección de la COVID-19 a través de puntos de atención, incluida la integración en “blockchain” (cadena de bloques) y la tecnología celular 5G de elevado ancho de banda (Devi et al, 2023; Guo et al., 2021; Xiao et al., 2024). El 70% de la población mundial usa dispositivos móviles, un 65% de ellos teléfonos inteligentes, y unos 4 mil millones de personas están activas en las plataformas de redes sociales. La integración de la nanotecnología con sensores portátiles (personales) y teléfonos inteligentes constituye un reto, facilitando el diagnóstico con la ayuda de biosensores inteligentes. Sin embargo, son necesarios un mayor número de estudios con objeto de comparar los métodos desarrollados en términos de sensibilidad, reproducibilidad, y fiabilidad. La validación precisa de las características de desempeño de los métodos es de suma importancia cuando está en juego la salud humana.

Los dispositivos portátiles (biosensores, rastreadores de actividad, pulseras, cascos y relojes inteligentes), requieren fuentes de energía adecuadas (biomecánica, bioquímica, solar) y pueden revolucionar la asistencia sanitaria personalizada y la telemedicina. Disponen de un acceso continuo en forma no invasiva a datos fisiológicos (biofísicos y bioquímicos) claves (temperatura, signos vitales, cuerpo movimiento y biomarcadores moleculares) en tiempo real (Fig. 6 - Ates et al., 2021). Proporcionan información única y precisa sobre nuestra salud y bienestar, facilitando el diagnóstico y la supervisión de la enfermedad. Los cambios sutiles en los datos continuos recopilados por sensores per-

FIGURA 6
EL FUTURO DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS PORTÁTILES



sonales pueden detectar una infección por COVID-19, de forma temprana tanto en casos asintomáticos como presintomáticos. El análisis de las señales de los relojes inteligentes con un algoritmo de detección en línea proporciona una advertencia anticipada de la infección por SARS-CoV-2 en un alto porcentaje de casos.

El uso de sensores portátiles emergentes de bajo costo (tatuajes epidérmicos, lentes de contacto, textiles, mascarillas, muñequeras y parches) amplía y mejora el campo de acción, al obtener muestras físicas y señales bioquímicas antes inaccesibles. La inclusión de diferentes transductores (es decir, dispositivos multimodales) o la evaluación simultánea de analitos de forma multiplexada amplían su funcionalidad. El desarrollo de tales soluciones para prevenir COVID-19, requiere contribuciones procedentes de una amplia gama de campos (biología, electrónica, informática...). En adición, los sistemas electrónicos implantados, autoalimentados e integrados en el cuerpo, permiten un seguimiento preciso y a largo plazo de señales lógicas de la piel y órganos internos. El alto costo de producción y mantenimiento, limitación de uso y lugares de implantación restringen el desarrollo y comercialización de estos dispositivos.

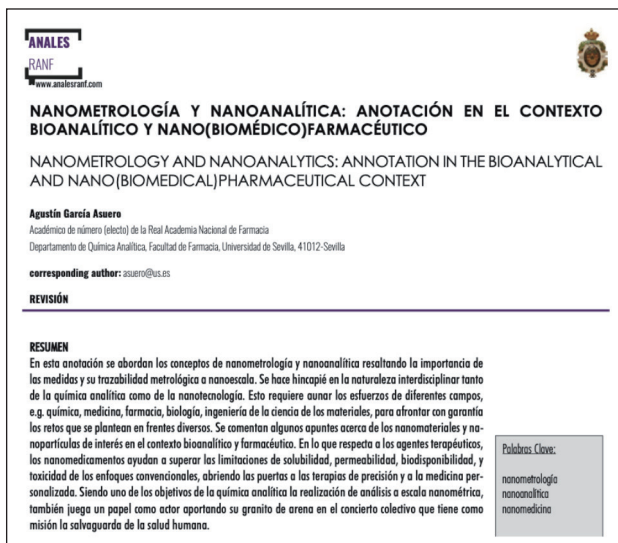
Los multisensores pueden cubrir diversos parámetros fisiológicos y de rastreo de contactos, creando bases de datos digitales y brindando acceso a médicos, utilizando servicios en la nube. Tener varios dispositivos portátiles, uno para cada función o flujo de datos, haría que el individuo pareciera un cibernético disuadiéndole de su empleo incluso si los datos se administran de manera efectiva. Los desafíos relacionados con las compensaciones de diseño, los sensores mejorados, la potencia, el tamaño, los algoritmos de cálculo y la seguridad deben resolverse lo antes posible para hacer realidad la utilidad clínica de estos dispositivos portátiles.

COMENTARIOS FINALES

La necesidad de plataformas de puntos de atención (POC) rápidas, transportable, de bajo coste, fáciles de usar, descentralizadas y de alta frecuencia para la identificación y el diagnóstico temprano se hace patente (Adenoku et al., 2024; Canciu et al., 2023; de Araujo, 2024; Valera et al., 2021). Las técnicas emergentes (Boukherroub y Szunerits, 2024; Dong et al., 2023, Khan et al., 2021; Martin et al., en prensa; Verma et al., 2020; Xu et al., 2021, Zhao et al., 2022) son de vital importancia para la detección, monitorización, diagnóstico, detección y vigilancia de las enfermedades y deben ser objeto de mayor investigación y atención, de cara a pasar de la escala de laboratorio a la situación real de comercialización. La asistencia sanitaria es uno de los sectores destacados beneficiados por el avance de IoT. La continua reducción en el precio de la electrónica de silicio de baja potencia y el aumento en la potencia computacional, la descentralización en el proceso de datos y la conectividad de las redes inalámbrica con los agentes de atención médica acelera el proceso de la toma de decisiones. La integración de estos materiales novedosos, incluidos dispositivos implantables con funcionalidades especiales, permite el rápido desarrollo de plataformas de detección en el punto de atención (POC), reemplazando a los procedimientos médicos convencionales.

En lo que respecta a los agentes terapéuticos, los nanomedicamentos ayudan a superar las limitaciones de solubilidad, permeabilidad, biodisponibilidad, y toxicidad de los enfoques convencionales, abriendo las puertas a las terapias de precisión y a la medicina personalizada (He et al., 2023; Michel et al., 2021). El progreso global en el ámbito de los nanomateriales híbridos se ha traducido en sustanciales aplicaciones: el desarrollo de dispositivos de laboratorio en chip, sistemas analíticos miniaturizados (μ -TAS), dispositivos de microfluidos, bioensayos basados en nanopartículas, biosensores electroquímicos, y dispositivos para monitoreo clínico y ambiental (Semenova y Silina, 2019). Los nanomateriales han encontrado uso en diferentes aplicaciones bioanalíticas tales como diagnóstico, biosensores, liberación de fármacos, imagen y terapia fototérmica en cáncer (Fig. 7, Asuero, 2022a).

FIGURA 7
NÚMERO ESPECIAL DE LOS ANALES DE LA REAL ACADEMIA NACIONAL DE FARMACIA
COMMEMORATIVO DEL 90 ANIVERSARIO



Aprovechar las propiedades novedosas y las dimensiones favorables de los nanomateriales es de vital importancia (Asuero 2022a; Asuero, 2022b; Gámiz et al., 2025) en las técnicas analíticas en las que se desea una mayor sensibilidad, menores tiempos de análisis, mayores eficiencias en la extracción y pequeños impactos ambientales. La interconexión de nanosensores y nanodispositivos con Internet ha llevado al desarrollo de un estándar de última generación basado en la IoT denominado “Internet de las nanocosas” (IoNT).

La inteligencia artificial (IA) y la tecnología móvil ofrecen herramientas de recopilación de datos, a un coste reducido, que facilitan el rastreo de contactos, la verificación de síntomas, la predicción de epidemias y vulnerabilidades, y un diagnóstico más rápido

de la enfermedad (Alowais et al., 2023; Lukas et al., 2020; Kalasin y Surareungchai, 2023; Varnosfaderani y Foourouzanfar; 2024; Xiao et al., 2024; Yadav et al., 2021). Todo esto plantea problemas relacionados con la seguridad de los datos, el cifrado, la ética y la regulación adecuada. Las máscaras faciales con sensores integrados pueden ofrecer acceso directo a importantes parámetros (patrones y tasas de respiración, biomarcadores de inflamación, detección de patógenos en el aire). Algunos usos (rastreo de contactos, detección de temperatura...) de la IoT se relacionan directamente con la mitigación de la propagación del virus, mientras que otros apuntan a la nueva realidad motivada por la pandemia de la COVID-19 (trabajo en casa o teletrabajo, educación en el hogar, acondicionamiento físico del hogar).

La capacidad de realizar diagnósticos y monitoreo de la COVID-19 a partir de una amplia variedad de muestras con una eficiencia similar y un procesamiento mínimo pone a prueba el futuro de los dispositivos analíticos y bioanalíticos basados en teléfonos inteligentes (de Araujo et al., 2024; Lee et al., 2023; Lukas et al., 2020; 2023; Polat et al., 2022). La biodetección representa una de las estrategias más prometedoras para hacer frente a las pandemias, democratizando las oportunidades que ofrecen sus diversas y versátiles modalidades (Boukherroub y Szunerits, 2024) que apuntan a una integración sin precedentes de sensores, métodos bioanalíticos, conectividad e informática. Whitesides (2013), se declara admirador de la química analítica y ha dicho: “La Química Analítica es extremadamente importante, probablemente incluso más importante de lo que creen los químicos analíticos. Todo en ciencia requiere medición; los químicos analíticos son expertos en la ciencia de la medición, no solo en determinar las estructuras de moléculas y la composición de mezclas de moléculas”.

Es fundamental unir los esfuerzos (Erdem et al., 2022; Feng et al., 2020; Huang et al., 2020; Martin et al., 2021) en biología, medicina, farmacia, ciencia clínica, metrología, proceso de datos, algoritmos de aprendizaje profundo, e inteligencia artificial para avanzar en el desarrollo de herramientas integradas para la prevención, diagnóstico, monitorización, y tratamiento de la enfermedad. “Today, science has few borders, and collaboration is the name of the game” (Jalali-Hervay et al., 2015). “To deal with one’s own concerns if obsolete. It is now necessary to work in an interdisciplinary way” (Malhaire y Lagarce, 2015). Y con Descartes (n.d.): “Ce qu’il faut d’abord reconnaître, c’est que les sciences son tellement liées ensemble qu’il est plus facile de le apprendre toutes à la fois que d’en détacher une seule des autres”.

REFERENCIAS

- ADEDOKUN, G., ALIPANAH, M., FAN, Z.H. (2024), Sample preparation and detection methods in point-of-care devices towards future at home testing. *Lap on a Chip* 24(15): 3626 (25 pp).
- AHMAD, H.F., RAFIQUE, W., RASOOL, R.U., ALHUMAM, A., ANWAR, Z., QADIR, J. (2023), Leveraging 6G, extended reality, and IoT big data for healthcare: a review. *Computer Science Review* 48: 100558 (24 pp).

- AHMED, S.F., SHARMIN, S., KULDEEP, S.A., ...ALAM, M.S.B., LIU, G., GANDOMI, A.H. (2025), Transformative impacts of the internet of medical things on modern healthcare. *Results in Engineering* 25: 103787 (22 pp)
- ALAVI, A., BOGU, G.K., WANG, M., ..., LI, X., BAHMANI, A. & SNYDER, M.P. (2022), Real-time alerting system for COVID-19 and other stress events using wearable data. *Nature Medicine* 28: 175-184.
- AL-HARDAN, N.H.M., JALAR, A., HAMID, M.A.A., RAIH, M.F. (2024), "Field-effect Transistor Biosensors for Rapid Pathogen Detection", Royal Society of Chemistry: Cambridge.
- ALOWAIS, S.A., ALGHAMDI, S.S., ALSUHEBANY, N., ..., AL YAMI, M.S., AI HARBI, S., AL-BEKAIRY, A.M. (2023), Revolutionizing healthcare: the role of artificial intelligence in clinical practice. *BMC Medical Education* 23: 689 (15 pp).
- ASUERO, A.G. (2022a), Nanometrología y nanoanalítica: anotación en el contexto bioanalítico y nano(biomédico)farmacéutico. *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* 88S: 377-386.
- ASUERO, A.G. (Coord.) (2022b), Química y Medida: de los orígenes a la miniaturización y a la nanoanalítica (una perspectiva histórica de la Química Analítica), Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla.
- ASUERO, A.G. (en prensa), "COVID-19: una aproximación pluridisciplinar", Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla.
- ASUERO, A.G. (Coord.), MARTIN BUENO, J., TENAPAJUELO, N., Química Analítica y COVID-19. https://tv.us.es/media/QUÍMICA+ANALÍTICA+Y+COVID-19+MÉTODOS+DE+DETECCIÓN/1_ungit43l
- ATES, H.C., YETISEN, A.K., GÜDER, F., DINCER, C. (2021), Wearable devices for the detection of COVID-19. *Nature Electronics* 4: 13-14.
- BASKAR, A., MADHIVANAN, K., ATCHUDAN, R., ARYA, S. (2025), Nanoparticle electrochemical biosensors for virus detection. *Clinica Chimica Acta* 566: 120054 (14 pp).
- BOUKHERROUB, R., SZUNERITS, S. (2024), The future of nanotechnology-driven electrochemical point-of-care devices and diagnostic tests. *Annual Review of Analytical Chemistry* 17: 173-195.
- BRAZACA, L.C., DOS SANTOS, P.L., de OLIVEIRA, P.R., ROCHA, D.P., STEFANO, J.S., KALINKE, C. (2021), Biosensing strategies for the electrochemical detection of viruses and viral diseases – a review. *Analytica Chimica Acta* 1159: 338384 (30 pp).
- BUDD, J., MILLER, B.S., WEKMAN, N.E., ...RODRIGUEZ, B., PEELING, R.W., McKENDRY, R.A. (2023), Lateral flow test engineering and lesson learned from COVID-19. *Nature Reviews Bioengineering* 1: 13-31 (19 pp).
- CANCIU, A., CERNAT, A., TERTIS, M., GRAUR, F., CRISTEA, C. (2023), Tackling the issue of healthcare associated infections through point-of-care devices. *Trends in Analytical Chemistry* 161: 116983 (13 pp).
- CAPELLA, J. V., BONASTRE, A., CAMPELO, J. C., ORS, R., PERIS, M. (2020), IoT & environmental analytical chemistry: toward a profitable symbiosis. *Trends in Environmental Analytical Chemistry* 27: e00095 (8 pp).
- CEBALLA-KOUKOULA, A., ROSS, G.M.S, BOSMAN, A.J., ZHAO, Y., ZHOU, H., MELEN, M.W.F., RAFFERTY, K., ELLIOTT, C.T., SALENTIJA, G.I.J. (2023), Best practice and current implementation of emerging smartphone based (bio)sensors. Part 2. Development, validation and social impact. *Trends in Analytical Chemistry* 161: 116986 (17 pp).
- CHAKRABORTY, C., BHATTACHARYA, M., PAL, S.L. LEE, S-S. (2024), From machine learning to deep learning: advances of the recent data-driven paradigm shift in medicine and healthcare. *Current Research in Biotechnology* 7: 100164 (20 pp).
- CHEN, H., LIU, K., LI, Z., WANG, P. (2019), Point of care testing for infectious diseases. *Clinica Chimica Acta* 493: 138-147.
- CHEN, J., GAO, K., WANG, R., NGUYEN, D.D., WEI, G-W. (2024), Review of COVID-19 antibody therapies. *Annual Review of Biophysics* 50: 1-30.

- CHEN, L., ZHANG, G., LIU, L., LI, Z. (2021), Emerging biosensing technologies for improved diagnostics of COVID-19 and future pandemics. *Talanta* 225: 121986 (10 pp).
- CIOTTI, M., NICOLAI, E., PPIERI, M. (2024), Development and optimization of diagnostic assays for infectious diseases. *LabMed Discovery* 1: 100032 (14 pp).
- CLARK, K.M., RAY, T.R. (2023), Recent advances in skin-interfaced wearable sweat sensors: opportunities for equitable personalized medicine and global health diagnostics. *ACS Sensors* 8: 2606-3622.
- DA SILVA, S.J.R., da SILVA; C.T.A., GUARINES, K.M., ..., PARDEE, K., KOHL, A., PENA, L. (2020), Clinical and laboratory diagnosis of SARS-CoV-2, the virus causing COVID-19. *ACS Infectious Diseases* 6 (9), 2319-2336.
- DE ARAUJO, W.R., LUKAS, H., TORRES, D.T., GAO, W., DE LA FUENTE-NUNEZ, C. (2024), Low-cost biosensor technologies for rapid detection of COVID-19 and future pandemics. *ACS Nano* 18(3): 1757-1777.
- DESCARTES, R. Règles pour la direction de l'esprit. Œuvres de Descartes, Victor Cousin: Levrault, Tome XI (pub. 1826).
- DEVI, D.H., DURAISAMY, K., ARMUGHAN, A., ..., SORATHIYA, V., DAS, S., RASHID, N. (2023), 5G Technology in healthcare and wearable devices. *Sensors* 23: 2529 (21 pp).
- DONG, T., WANG, M., LIU, J., MA, P., PANG, S., LIU, W., LIU, A. (2023), Diagnostics and analysis of SARS-COV-2: current status, recent advances, challenges and perspectives. *Chemical Science* 14(23): 6149.
- ERDEM, Ö, ES, I., SAYLAN, Y., INCI, F. (2022), Unifying efforts of medicine, chemistry, and engineering biosensing technologies to tackle the challenges of the pandemic. *Analytical Chemistry* 94(1): 3-25.
- EVERITT, M.L., TILLERY, A., DAVID, M.G., SINGH, N., BORISON, A. & WHITE, I.M. (2021), A critical review of point-of-care diagnostic technologies to combat viral pandemics. *Analytica Chimica Acta* 1146: 184-199.
- FABIANI, L., SAROGLIA, M., GALARÁ, G., ..., MOSCONE, D., LISTA, F., ARDUINI, F. (2021), Magnetic beads combined with carbon black-based screen-printed electrodes for COVID-19: a reliable and miniaturized electrochemical immunosensor for SARS-CoV-2 detection in saliva. *Biosensors and Bioelectronics* 171: 112686 (9 pp).
- FAHAM, S., SALIMI, A., GHAVAMI, R. (2023), Electrochemical-based remote biomarker monitoring: toward Internet of Wearable Things in telemedicine. *Talanta* 253: 123892 (19 pp).
- FERREIRA, C.R., GOMEZ, P.C.F. de L., ROBISON, K.M., COOPER, B.R., SHANNAHAN, J.H. (2024), Implementation of multiomic mass spectrometry approaches for the evaluation of human health following environmental exposure. *Molecular Omics* 20(5): 296-321.
- GÁMIZ, F., SAMPEDRO, C., MÁRQUEZ, C., ..., RECIO, M.I., GALDÓN, J.C., MARCOS, M.E. (2025), Nanotecnologías para el diagnóstico precoz: el caso de la COVID-19. En "COVID-19: una aproximación pluridisciplinar", Asuero, A.G. (Coord.), Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla, Cap. XXIII.
- GAVINA, K., FRANCO, L.C., KHAN, H., LAVIK, J-P., RELICH, R.F. (2023), Molecular point-of-care devices for the diagnosis of infectious diseases in resource-limited settings – A review of the current landscape, technical challenges, and clinical impact. *Journal of Clinical Virology* 169: 105613 (9 pp).
- GHOSH, S.K., MANDAL, D. (2021), Envisioned strategy for an early intervention in virus-suspected patients through non-invasive piezo- and pyro-electric-based wearable sensors. *Journal of Materials Chemistry A* 9 (4): 1897-1909.
- GONG, S., LU, Y., YIN, J., LENIN, A., CHENG, W. (2024), Material-driven soft wearable bioelectronics for connected healthcare. *Chemical Reviews* 124(2): 455-553.
- GUO, J., CHEN, S., TIAN, S., ... KANG, Y., MA, X., GUO, J. (2021), 5G-enabled ultra-sensitive fluorescence sensor for proactive prognosis of COVID-19. *Biosensors and Bioelectronics* 181: 113160 (8 pp).

- HALEEM, A., JAVAID, M., SINGH, R.P., SUMAN, R. (2022), Medical 4.0 technologies for healthcare: features, capabilities and applications. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems* 2: 12-30.
- HE, T., WEN, Y., LE, X., LIU, W., LEE, C. (2023), Emerging wearable chemical sensors enabling advanced integrated systems toward personalized and preventive medicine. *Analytical Chemistry* 95(1): 490-514.
- HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, J.F., ROJAS, D., ESCARPA, A. (2021), Electrochemical sensing directions for next-generation healthcare: trends, challenges, and frontiers. *Analytical Chemistry* 93(1): 167-183.
- HOU, F., SUN, S., ABDULLAH, S.W., TANG, Y., LI, X., GUO, H. (2023), The application of nanoparticles in point-of-care testing (POCT) immunoassays. *Analytical Methods* 15(18): 2154-2180.
- HUANG, H., FAN, C., LI, M., , ZHENB, X., ZUO, X., HUANG, J. (2020), COVID-19: A call for physical scientists and engineers. *ACS Nano* 14(4): 3747-3754.
- JALALI-HERVAY, M., ARRASTRA, M., GÓMEZ, F.A. (2015), How chemometrics improve microfluidic research. *Analytical Chemistry* 2015, 87(7): 3544-3555.
- KALASIN, S., SURAREUNGCHAI, W. (2023), Challenges of emerging wearable sensors for remote monitoring toward telemedicine healthcare. *Analytical Chemistry* 95(3): 1773-1784.
- KANT, K., BEERAM, R., CAO, Y., ..., WANG, J., POLAVARAPU, L., SANTOS, I.P. (2024), Plasmonic nanoparticle sensors: current progress, challenges, and future prospects. *Nanoscale Horizons* 9(12): 2085-2166.
- KHAN, AR.R., HUSSAIN, W.L., SHUM, H.C., HASSAN, S.U. (2024), Point-of-care testing: a critical analysis of the market and future trends. *Frontiers in Lap on Chip Technology* 3: 1394752 (15 pp).
- KHAN, H., KUSHWAH, K.K., SINGH, S., URKUDE, H., MAURYA, M.R., SADASIVUNI, K.K. (2021), Smart technologies driven approaches to tackle COVID-19 pandemic: a review. *3 Biotech* 11: 50 (22 pp).
- KHANI, S., REZAEI, P. (2024), Optical sensors based on plasmonic nano-structures: a review. *Helvion* 10: e40923 (18 pp).
- KOKILA, M., REDDY K. (2025), Authentication, access control and scalability models in Internet of Things security – a review. *Cyber Security and Applications*. *Cyber Security and Applications* 3: 100057 (17 pp).
- KONDYLIS, P., SCHLICKSUP, C.J., ZLOTNICK, A., JACOBSON, S.C. (2019), Analytical techniques to characterize the structure, properties, and assembly of virus capsids. *Analytical Chemistry* 91(1): 622-636.
- KOSTARELOS, K. (2020), Nanoscale nights of COVID-19. *Nature Nanotechnology* 2020, 15: 343-344.
- LEE, S., BI, L., CHEN, H., ..., CHEN, L., JOO, S-W., CHO, J. (2023), Recent advances in point-of-care testing of COVID-19. *Chemical Society Reviews* 52(24): 8500-8530.
- LI, C., ZHOU, W., RUIZ, A.G., ..., ZHANG, S., LI, X., FU, G. (2024), Microfluidic immunoassays for point-of-care testing of SARS-CoV-2 antigens and antibodies. *Trends in Analytical Chemistry* 177: 117809 (20 pp).
- LI, P., LLE, G-H., KIM, S-Y., KWON, S.Y., KIM, H-R., PARK, S. (2021), From diagnosis to treatment: recent advances in patient-friendly biosensors and implantable devices. *ACS Nano* 15(2): 1960-2004.
- LI, Y., ZHANG, J., CHEN, J., ..., BAO, P., SHEN, W., TANG, S. (2023), Detection of SARS-CoV-2 based on artificial intelligence-assisted smartphone: a review. *Chinese Chemical Letters* 35: 109220 (10 pp).
- LIM, H., JAFRY, A.T., LEE, J. (2021), Fabrication, flow control, and applications of microfluidic paper-based analytical devices. *Molecules* 24: 2869 (32 pp).
- LINH, V.T.N., HAN, S., KOH, E., KIM, S., JUNG, H.S. (2025), Advances in wearable electronics for monitoring human organs: bridging external and internal health assessments. *Biomaterials* 314: 122865 (30 pp).

- LIU, H., DAI, E., XIAO, R., ..., TU, J., WANG, C., WANG, S. (2021), Development of a SERS-based lateral flow immunoassay for rapid and ultra-sensitive detection of anti-SARS-CoV-2 IgM/IgG in clinical samples. *Sensors & Actuators: B. Chemical* 329: 129196 (10 pp).
- LIU, J., LAI, H., LI, G. (2024), Biomarkers detection by surface-enhanced Raman spectroscopy. *Microchemical Journal* 203: 110912 (20 pp).
- LUKAS, H., XU, C., YU, Y., GAO, W. (2020), Emerging telemedicine tools for remote COVID-19 diagnosis, monitoring, and management. *ACS Nano* 14(12): 16180-16193.
- MABEY, D., PEELING, R.W., USTIANOWSKI, A., PERKINS, M.D. (2004), Diagnostics for the developing world. *Nature Review Microbiology* 2(3): 231-240.
- MADHRANRAKAM, S., MUTHUKUMAR, S., PRASAD, S. (2022), Emerging electrochemical biosensing trends for rapid diagnosis of COVID-19 biomarkers as point-of-care platforms: a critical review. *ACS Omega* 7(15). 12467-12473.
- MALHAIRE, M., LAGARCE, F. (2015), Is translational approach becoming a reality in nanomedicine? *European Journal of Nanomedicine* 2015, 7(2): 79-83.
- MANZ, A., NEUZIL, P., O'CONNORS, J. S., SIMONE, G., "Microfluidics and Lab-on-a-Chip", Royal Society of Chemistry: Cambridge, 2020.
- MARTIN, J., TENA, N., ASUERO, A.G. (en prensa), Algunos avances recientes y tendencias emergentes en métodos analíticos para COVID-19. En "COVID-19: una aproximación pluridisciplinar", Asuero, A.G. (Coord.), Editorial Universidad de Sevilla: Sevilla.
- MARTIN, J., TENA, N., ASUERO, A.G. (2021), Current state of diagnostic, screening and surveillance testing methods for COVID-19 from an analytical chemistry point of view. *Microchemical Journal* 167: 106305 (20 pp).
- MATHKOR, D.M., MATHKOR, N., BASSFAR, Z.,..., SLAMA, P. AHMAD, F., HAQUE, S. (2024), Multirole of the internet of medical things (IoMT) in biomedical systems for managing smart healthcare systems: an overview of current and future innovative trends. *Journal of Infection and Public Health* 17: 559-572.
- MAURO., M., NOTO, G., PRENESTINI, A., SARTO, F. (2024), Digital transformation in healthcare: assessing the role of digital technologies for managerial support processes. *Technological Forecasting & Social Change* 229: 123781(13 pp).
- MAVRIKOU, S., MOSCHOPOULOU, G., TSEKOURAS, V., KINTZIOS, S. (2020), Development of a portable, ultra-rapid and ultra-sensitive cell-based biosensor for the direct detection of the SARS-CoV-2 S1 spike protein antigen. *Sensors* 20: 3121 (12 pp).
- MAYER, M., BAEUMNER, A. J., A megatrend challenging Analytical Chemistry: biosensor and chemosensor concepts ready for the Internet of Things. *Chemical Reviews* 119(13), 7996-8027 (2019).
- MBUNGE, E., AKINNUWESI, B., FASHOTO, S.G., METFULA, A., MASHWAMA, P. (2020), A critical review of emerging technologies for tackling COVID-19 pandemic. *Human Behaviour & Emerging Technologies* 3(1): 25-39.
- MIN, J., TU, J., XU, C., LUKAS, H., SHIN, S., YANG, Y., SOLOMON, S.A., MUKASA, D., GAO, W. (2023), Skin-interfaced wearable sweat sensors for precision medicine. *Chemical Reviews* 123(8): 5059-5138.
- MISHRA, A., SINGH, P.K., CHAUHAN, N., ..., SHUKLA, Y.K., JAIN, U., TIWARI, A. (2024), Emergence of integrated biosensing-enabled digital healthcare devices. *Sensors & Diagnostics* 3: 718-744.
- MITTON, N., SIMPLOT-RYL, D. (2011), From the Internet of things to the Internet of the physical world. *Comptes Rendus Physique* 12(7): 669-674.
- MOHAMMADI, M.H., MULDER, S., KHASHAYAR, P., KALBASI, A., AZIMZADEH, M., AREF, A.R. (2021), Saliva Lab-on-a-chip biosensors: recent novel ideas and applications in disease detection. *Microchemical Journal* 168:106506 (13 pp).

- MOITRA, P., ALAFEEF, M., DIGHE, K., FRIEMAN, M.B., PAN, D. (2020), Selective naked-eye detection of SARS-CoV-2 mediated by N gene targeted antisense oligonucleotide capped plasmonic nanoparticles. *ACS Nano* 14(6): 7617-7627.
- MORGAN, A.A., ABDI, J., SYED, M.A.Q., EL KOHEN, G., BARLOW, P., VIZCAYCHIPI, M.P. (2022), Robots in healthcare: a scoping review. *Current Robotics Reports* 3: 271-280.
- MUJAWAR, M.A., GOBEL, H., BHARDWAJ, S.K., SRINIVASAN, S., HICKMAN, N., KAUSHIK, A. (2020), Nano-enabled biosensing systems for intelligent healthcare: towards COVID-19 management. *Materials Today Chemistry* 17: 100306 (9 pp).
- NAGAJAYANTHI, B. (2022), Decades of Internet of Things towards twenty-first century: a research-based introspective. *Wireless Personal Communications* 123: 3661-3697.
- O'CALLAGHAN, J. (2025), Apple Vision Pro: what does it mean for scientists? *Nature*, online ahead of print; doi: 10.1038/d41586-024-00387-z
- ORTEGA ORTIZ DE APODACA, F. (2006), "Biosensores y Biochips: Herramientas para el diagnóstico y la terapéutica", Real Academia Nacional de Farmacia, Madrid.
- POLAT, E.O., CETIN, M.M., TABAK, A.F., ..., KABBANI, A., HAMED, H., GÜL, S.B. (2022), Transducer technologies for biosensors and their wearable applications. *Biosensors* 12(6): 385 (32 pp).
- QIU, G., GAI, Z., RAO, Y., SCHMITT, J., KULLAK-UBLICK, G.A., WANG, J. (2020), Dual-functional plasmonic photothermal biosensors for highly accurate severe acute respiratory syndrome Coronavirus 2 detection. *ACS Nano* 14(5): 5268-5277.
- RAI, P., KUMAR, B.K., DEEKSHIT, V.K., KARUNASAGAR, I., KURUNASAGAR, I. (2021), Detection technologies and recent developments in the diagnosis of COVID-19 infection. *Applied Microbiology and Biotechnology* 105(2), 441-455.
- RAMALINGAM, M., JAISANKAR, A., CHENG, L., ..., KLIM, H-W., SHI, Z., MARRAZZA, G. (2023), Impact of nanotechnology on conventional and artificial intelligence-based biosensing strategies for the detection of viruses. *Discover Nano* 18:58 (28 pp).
- RAMIREZ-PRIEGO, P., MAURIZ, E., GIAROLA, J.F., LECHUGA, L.M. (2024), Overcoming challenges in plasmonic biosensors deployment for clinical and biomedical applications: a systematic review and meta-analysis. *Sensing and Bio-Sensing Research* 46: 100717 (18 pp).
- ROLANDO, J.C., MELKONIAN, A.V., WALT, D.R. (2024), The present and future landscape of molecular diagnostics. *Annual Review of Analytical Chemistry* 17: 459-474.
- ROSS, G.M.S., ZHAO, Y., BOSMAN, A.J.,..., NIELEN, M.W.F., RAFFERTY, K., SALENTIJN, G.I.J. (2023), Best practices and current implementation of emerging smartphone-based(Bio)sensors – Part 1: Data handling and ethics. *Trends in Analytical Chemistry* 158: 116863 (20 pp).
- SAADI, J., OUESLATI, S., BELLANGER, L., ..., NAAS, T., FENAILLE, N.F., BECHER, F. (2021), Quantitative assessment of SARS-CoV-2 virus in nasopharyngeal swabs stored in transport medium by a straightforward LC-MS/MA assay targeting nucleocapsid, membrane, and spike proteins. *Journal of Proteome Research* 20(2): 1434-1443.
- SACHDEVA, S., BHATIA, S., AL HARRADI, A.A., ..., SHAS, S.F.A., KHAN, A., HALIM, S.A. (2024), Unravelling the role of cloud computing in health care system and biomedical sciences. *Heliyon* 10: e29044 (15 pp).
- SADIGHBAYAN, D., HASANZADEH, M., GHAFAR-ZADEH, E. (2020), Biosensing based on field-effect transistors (FET): recent progress and challenges. *Trends in Analytical Chemistry* 133: 116067 (16 pp).
- SAWERES-ARGÜELLES, C., SÁNCHEZ-CALVO, A., SERRANO-PERTIERRA, E., MATOS, M., BLANCO-LOPEZ, M.C. (2025), Nanolabels for biosensors based on lateral flow immunoassays. *Analytica Chimica Acta*; <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343597>
- SEMPIONATTO, J. R., JEERAPAN, I., KRISHNAN, S., WANG, J., Wearable chemical sensors: emerging systems for on-body analytical chemistry. *Analytical Chemistry* 92(1), 378-396 (2020).

- SEO, G., LEE, G., KIM, M.J., ..., KIM, B.T., PARK, E.C., KIM, S.I. (2020), Rapid detection of COVID-19 causative virus (SARS-CoV-2) in human nasopharyngeal swab specimens using field-effect transistor-based biosensor. *ACS Nano* 14(4): 5135-5142.
- SIKANDER, S., BISWAR, P., KULLARNI, P. (2023), Recent advances in telemedicine: surgical, diagnostic and consultation services. *Biomedical Engineering* 6:100096 (15 pp).
- SIRJAR, J., LIAO, J-D., LEE, H., TSAI, H-P., WANG, J-R. (2024), Innovative and versatile surface-enhanced Raman spectroscopy-inspired approaches for viral detection leading to clinical applications: a review. *Analytica Chimica Acta* 135: 342917 (16 pp).
- TENG, R., DING, Y., SEE, K.C. (2022), Use of robots in critical care: systematic review. *Journal of Medical Internet Research* 24(5): e33380 (25 pp).
- THOMAS, M.J., LAL, V., BABY, A.K., VP, M.R., JAMES, A., RAJ, A.K. (2021), Can technological advancements help to alleviate COVID-19 pandemic? *Journal of Biomedical Informatics* 117: 103787 (22 pp).
- TRAPPEY, A.J.C., TRAPPEY, C.V., GOVINDARAJAN, U.H., CHUAN, A.C., SUN, J.J. (2017), A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: a key enabler for Industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics* 33: 208-229.
- UDUGAMA, B., KADHIRESAN, P., KOZLOSKI, H.N., ..., MUBAREKA, S., GUBBAY, J.B., CHAN, W.C.W. (2020). Diagnosing COVID-19: the disease and tools for detection. *ACS Nano* 14(4): 3822-3835.
- VALERA, E., HANKELOW, A., LIM, J.,, WHITE, K., KUMAR, J., BASHIR, R. (2021), COVID-19 Point-of-Care diagnostics: present and future. *ACS Nano* 15(5): 7899-7906.
- VARNOSFADERANI, S.M., FOROUZANFAR, M. (2024), The role of AI in hospitals and clinics: transforming healthcare in the 21st century. *Bioengineering* 11: 337 (38 pp).
- VERMA, N., PATEL, D., PANDYA, A. (2020), Emerging diagnostic tools for detection of COVID-19 and perspective. *Biomedical Microdevices* 22(4): 83 (18 pp).
- VORA, L.K., GHOLAP, A.D., JETHA, K., THAKUR, R.R.S., SOLANKI, H.K., CHAVDA, V. P. (2023), Artificial intelligence in pharmaceutical technology and drug delivery design. *Pharmaceuticals* 15: 1916 (46 pp).
- WANG, B., ZHOU, S., JIANG, S., QUIN, S., GAO, B. (2023), Personalized medical devices convert monitoring and assistance: emerging wearable soft robots. *Analytical Chemistry* 95(22): 8395-8410.
- WANG, X.V., WANG, L. (2021), A literature survey of the robotic technologies during the COVID-19 pandemic. *Journal of Manufacturing Systems* 60: 823-836.
- WHITESIDES, G. M., Is the focus on “molecules” obsolete? *Annual Review of Analytical Chemistry* 6, 1-29 (2013).
- WHITESIDES, G. M., The origins and the future of microfluidics. *Nature* 442 (7101), 368-373 (2006).
- WÖRNER, T.P., SHAMORKINA, T.M., SNIJDER, J., HECK, A.J.R. (2021), Mass Spectrometry-based structural virology. *Analytical Chemistry* 93(1): 620-640.
- XIAO, X., YIN, J., TAT, T., CHEN, J. (2024), Advances in machine learning for wearable sensors. *ACS Nano* 18(34): 22734-22751.
- XUE, J., CHEN, F., BAI, M., ..., FU, W., ZHANG, J., ZHAO, Y. (2021), Aptamer-functionalized microdevices for bioanalysis. *ACS Applied Material Interfaces* 13(8): 9402-9411.
- YADAV, A.K., VERMA, D., KUMAR, A., KUMAR, P., SOLANKI, P.R. (2021), The perspectives of biomarker-based electrochemical immunosensors, artificial intelligence and the Internet of Medical Things toward COVID-19 diagnosis and management. *Materials Today Chemistry* 20: 100443 (21 pp).
- YU, H., ZHANG, H., LIU, Z., ..., LI, J., TANG, W., YAN, F. (2023), Recent advances in field-effect transistor-based biosensors for label-free detection of SARS-CoV-2. *Small Science* 4: 2300058 (24 pp).
- ZHAO, H., SU, R., TENG, L., ..., LI, G., LIU, X., LIU, Z. (2022), Recent advances in flexible and wearable sensors for monitoring chemical molecules. *Nanoscale* 14(5): 1653-1669.

ZHOU, W., SUI, Z., LIU, J., ...YANG, K., ZHANG, L., ZHANG, Y. (2023), High sensitive detection towards SARS-CoV-2 S1 glycoprotein by parallel reaction monitoring mass spectrometry. *Analytical Chemistry* 95(23): 8752-8757.

AGRADECIMIENTOS

A las Profesoras Julia Martin Bueno y Noelia Tena Pajuelo, por la ayuda prestada en la elaboración de esta Conferencia. A la Editoriales Universidad de Sevilla y Elsevier por las facilidades.

CONVENCIONES: DEL DERECHO A LA MECÁNICA EN EL SIGLO XIX

*Resumen de la Conferencia pronunciada por la
profesora D^a. María de Paz,
el día 8 de abril de 2024*



En esta conferencia se abordó la noción de convención en mecánica, que aparece por primera vez a mediados del siglo XIX, aplicada al principio de inercia. La tesis de fondo presentada consiste en entender el uso de las convenciones en mecánica como un proceso de transferencia conceptual desde la jurisprudencia, contextualizado a partir de cambios jurídicos que se producen en este siglo y que forman parte del contexto socio-político e intelectual de los científicos que introdujeron esta noción. Además, la introducción de la noción de convención es indicativa del cambio en la comprensión de la mecánica que se produce a lo largo del siglo XIX.

SOBRE UN CONCEPTO HISTÓRICO-FILOSÓFICO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL: LAS VISIONES DE DESCARTES, TURING Y PENROSE

*Conferencia pronunciada por el
profesor D. Javier Almarza Madrera,
el día 22 de abril de 2024*



RESUMEN

En las próximas líneas se tratará de la dimensión histórica y filosófica del fenómeno de la inteligencia *artificial* (en adelante IA), en el intento de establecer nexos de unión entre los pensamientos de tres personalidades inmensas dentro del saber científico: René Descartes, Alan Turing y Roger Penrose. Todos ellos mostraron un interés profundo por los mecanismos de la mente humana y por cómo estos podrían ser replicados por máquinas de factura también humana. Se hará sobre la base de un concepto preciso de IA, de los muchos que puede contener, un concepto general o fuerte de esta disciplina científica: el que la define como la aspiración de conseguir mediante la computación replicar en una máquina el modo de razonamiento humano, alcanzando, además, mayor rapidez en el manejo de múltiples datos y eficacia en la resolución de problemas; lograr, en definitiva, que las máquinas dotadas con IA actúen con inteligencia y capacidad de aprendizaje, tal como lo hacen las personas.

EXTRACT

In the next few lines we will discuss the historical and philosophical dimension of the phenomenon of artificial intelligence (hereinafter AI), in the attempt to establish links between the thoughts of three immense personalities within scientific knowledge: René Descartes, Alan Turing and Roger Penrose. All of them showed a deep interest in the mechanisms of the human mind and how these could be replicated by human-made machines. It will be done on the basis of a precise concept of AI, of the many that it may contain, a general or strong concept of this scientific discipline: the one that defines it as the aspiration of achieving, through computing, the replication of the human mode of reasoning in a machine, also achieving greater speed in handling multiple data and

efficiency in problem solving; In short, ensuring that machines equipped with AI act with intelligence and learning capacity, just as people do.

INTRODUCCIÓN

El largo proceso histórico que nos lleva al momento que busco alcanzar con el encuentro con la filosofía de René Descartes (1596-1650), tiene su lejano punto de partida en el concepto griego de *Cosmos*. Un término que fue capaz de recoger y definir en uno sólo, todo el universo conocido en el momento. Para los filósofos griegos la Tierra y el hombre se encontraban en el centro de ese universo, y ese hombre, a su vez, estaba relacionado con él a través de fuerzas o de influencias invisibles que ponían todas sus partes en contacto. En el propio interior del hombre se descubría también un microcosmos particular (Bernal, 1979: 331-332).

Esta idea del hombre permaneció así durante cerca de dos mil años, hasta que entró en crisis llegado el Renacimiento europeo. Se separó radicalmente de la influencia de las imperantes ideas aristotélicas. Entonces, y centrándome en un campo científico muy concreto, la anatomía y la fisiología humanas fueron vistas y estudiadas de forma distinta. Muchos de los procesos fisiológicos obrados en el cuerpo encontraron explicación por asimilación con el funcionamiento de una serie de máquinas de nueva invención (molinos, bombas de agua, relojes, etc.). La existencia de estas máquinas útiles y complejas, con un funcionamiento efectivo como generadoras de trabajo y alivio de las labores del hombre, dio al filósofo una base segura sobre la que pensar que los mecanismos interiores del cuerpo humano, y animal en general, se comportaban de manera semejante. El cuerpo del hombre fue visto como un conjunto de articulaciones, fuelles, bombas y resortes que debían estudiarse para alcanzar una explicación clara de su funcionamiento. William Harvey (1578-1657), por citar un caso, hizo su relevante aportación descubriendo con el nuevo uso de la fisiología experimental, que la circulación sanguínea era un proceso mecánico comparable al desarrollado por una máquina hidráulica y, lo que era aún más notable, que este movimiento circulatorio quizás no precisara realmente del concurso de espíritus o de fuerzas ocultas actuando desde el interior del corazón, tal como se creía en el período.

El movimiento del corazón y de las arterias, o el mecanismo de la respiración y de la digestión, unificaban la naturaleza humana y la animal salvo, eso sí, en aquel lugar que las diferenciaba y donde Dios había dispuesto que residiera su alma razonable: el cerebro. Un alma razonable que los hombres poseían en exclusividad entre los seres de la creación, y que era una sustancia absolutamente distinta al cuerpo material. Estamos, por tanto, ante la generalización de lo que ha venido en llamarse movimiento “mecanicista”, una tradición de investigación (como diría el filósofo Larry Laudan), que vino a condicionar el desarrollo de mil y un aspectos de la ciencia y de la filosofía del momento. La corriente mecanicista impregnó la física del siglo XVII y también alcanzó a la biología. El núcleo de este pensamiento se basaba, como dije, en concebir a todos los seres vivos como máquinas, en especial los animales, y estudiar su fisiología

como se estudiaba la hidrostática, la dinámica, etc. Estas disciplinas de la física estaban alcanzando un desarrollo notable, ofreciendo altos niveles de certeza y seguridad en la explicación del funcionamiento de numerosos fenómenos naturales.

LA VISIÓN DE DESCARTES

Encontrándonos ya con Descartes, conocemos que consideraba los cuerpos de animales y hombres como meras máquinas de enorme perfección, gobernadas por las leyes de la física. Descartes separaba en sus estudios los aspectos físicos y psíquicos del hombre conforme a los principios de su teoría dualista de la existencia humana. Por una parte, tendríamos el cuerpo material, por otra el alma, que se asociaba también con la mente y el pensamiento racional. Como consecuencia, nació la teoría del “hombre-máquina”. Para él, los animales, incluido el hombre, eran como meras máquinas. Su estructura y funcionamiento se explicaban por principios mecanicistas. Lo que diferenciaba al hombre del resto de los animales de la creación era que su mecanismo, que funcionaba según los principios de la física, se ponía en relación con el espíritu racional que estaba contenido en este mecanismo; la organización y mantenimiento del organismo, incluso de la consciencia y el conocimiento, eran funciones del alma (Principe, 2012: 154-155).

La concepción dualista, sin embargo, resultó ser de gran utilidad para la medicina. Esta se dedicó al estudio de problemas particulares, algo más libre de observancias morales o religiosas, con científicos dedicados separadamente a un aspecto determinado de la fisiología humana, aunque sin hacer con ellos una síntesis que completara el concepto global de ser humano. Esto benefició, sin embargo, grandes avances y descubrimientos: la circulación de la sangre por William Harvey (1578-1657); el descubrimiento del mundo microscópico por Anton van Leeuwenhoek (1632-1723) o Robert Hooke (1635-1703), o la inmensa aportación de Andrés Vesalio (1514-1564) con su *Humani corporis fabrica* de 1543, un pormenorizado atlas de anatomía humana con un realismo sin precedentes.

Descartes, en su obra *El sistema del mundo* (1626-1633), manifestó vivir no sólo en la influencia del mecanicismo, sino trabajar intensamente por erradicar el antiguo sistema de la “Escuela” de Aristóteles, sustituyéndolo por un mecanismo universal que fuera capaz de explicar todos los fenómenos visibles de la naturaleza, apoyándose exclusivamente en los conceptos de extensión, figura y movimiento. Es decir, ofrecer una explicación mecánica de los fenómenos y comportamientos observados. En Descartes, extensión es igual a sustancia, materia y cuerpo. La extensión llena todo el espacio: Descartes no concibe la posibilidad del vacío, ni tampoco la existencia de átomos, por lo que aquí, cae en perpetuar la inveterada concepción aristotélica de imposibilidad del vacío y de la materia como un continuo eternamente divisible, rechazando las teorías atomistas de la materia, que ya estaban poco a poco asimilándose (Taton, 1972: 287). Probablemente, Descartes y Francis Bacon (1561-1626), se erigieran en los dos filósofos de la naturaleza que tomaron la responsabilidad del tránsito de la antigua ciencia aristotélica y de corte medieval, a la nueva ciencia moderna, más racional (según el método de Descartes) y más experimental (según el de Bacon).

La historia de hoy cobra sentido con la entrada en juego, dentro de este ambiente de influencia mecanicista, de una vieja invención de carácter lúdico que durante el Renacimiento alcanzó unas elevadas cotas de perfección: los autómatas o máquinas de movimiento autónomo que imitaban con gran realismo el comportamiento de seres humanos o animales (músicos, pájaros cantores, jugadores de ajedrez, etc.), muy presentes en la vida europea de la época. Los siglos XVII y XVIII, este último con especial intensidad, fueron los de la pasión por la complicación de los mecanismos de relojería, y toda una suerte de ingenios nacidos de la inventiva de diestros artesanos que combinaban piezas de diversos materiales, fabricadas con gran precisión por una industria cada vez más sutil y especializada.

Entre los estudios de Descartes en fisiología humana destacó *Tratado del hombre* (obra póstuma, con ediciones de 1662 en latín y de 1664 en francés), que consideró como una continuación de *El mundo o tratado de la luz*¹. Pues bien, en *Tratado del hombre* aludió constantemente al término “máquina” para describir la composición del cuerpo humano. El hombre, separado de su alma, no se diferenciaba en nada del resto de animales irracionales, a los que consideró meros autómatas sin alma. Ambos estaban compuestos de partes que se constituían en una máquina precisa, de funciones y movimientos semejantes, pero era Dios quien luego dotaba al hombre de un “alma razonable” que marcaría la distinción definitiva. Esta era una idea que nacía de las Sagradas Escrituras. En el relato del Génesis, el hombre y la mujer fueron creados en el quinto día: “Dios [dice el pasaje bíblico] formó al hombre del polvo de la tierra, sopló en su nariz un hálito de vida, y el hombre se convirtió en un ser viviente” (*La Biblia*: 2013, 36): El alma llegó así al hombre como su principio vital, que, en unión con el cuerpo, constituyó la esencia humana (Gn. 2,7).

Debido a estos condicionantes religiosos, Descartes se movió siempre con gran precaución para situar todo lo que narraba en un mundo imaginario, incluso al describir la máquina del hombre y su funcionamiento, para no caer en afirmaciones que chocaran con la ortodoxia católica. En la quinta parte de su *Discurso del método* (1637), Descartes siguió desarrollando esta teoría, que para él era dogma. La naturaleza obedecía a las mismas reglas que la mecánica; la fisiología del cuerpo se reducía a movimientos y el hombre adquiriría la condición de máquina o de “autómata”. El movimiento en los animales, incluido el hombre, era posible gracias a la fuerza impelida a los nervios y los músculos por los que Descartes llamaba “espíritus animales”. Eran causantes también de provocar en el cerebro la vigilia y el sueño, y de la impresión en el cerebro de sensaciones como los olores, los gustos, el calor, el hambre, la sed o el sentido común con el que se recibían todas estas “ideas”, y se traducían en las pasiones, la memoria de las cosas o la fantasía y la creatividad, entre otros muchos “movimientos” que el cuerpo hacía inconscientemente, al margen de la propia voluntad.

1. Obra esta última inédita hasta después de la muerte del autor, que había paralizado su publicación en vista del proceso a Galileo Galilei en 1633 y de que Descartes defendía en la obra el movimiento de la Tierra en torno al Sol. Su fidelidad a la ortodoxia y a la teología de la Iglesia Católica, sesgada esta y apoyada por siglos en la filosofía aristotélica y escolástica, le impulsaron a rechazar publicar una opinión que había sido declarada herética.

Sobre los autómatas y el cuerpo humano Descartes escribió que:

“de ninguna manera parecerá extraño a quienes, sabiendo cuántos diversos autómatas, o máquinas movientes, la industria de los hombres puede hacer sin emplear para ello sino muy pocas piezas, en comparación con la gran multitud de huesos, de músculos, de nervios, de arterias, de venas, y de todas las demás partes que hay en el cuerpo de cada animal, consideren este cuerpo como una máquina que, habiendo sido hecha por las manos de Dios, está incomparablemente mejor ordenada y encierra en sí movimientos más admirables que ninguna de las que pueden ser inventadas por los hombres” (Descartes, 2018: 122 y 123).

De este modo, y enlazando con lo antes comentado, el estado de perfección de los autómatas mecánicos era tan alto, que era posible concebir un futuro de ingenios aún más avanzados que ofrecieran quién sabe qué increíbles nuevas habilidades. Porque la destreza de los constructores favorecía verdaderamente la asimilación del concepto “organismo-máquina”, y la experimentación con él. De hecho, en la época se sucedían en las gacetas y revistas noticias sobre inventores y los prodigios alcanzados por sus autómatas, y se producían noticias fantasiosas, una suerte de *fake news*, con autómatas imposibles, casi vivos y pensantes, como protagonistas.

Aunque Descartes hizo constantes referencias a estos autómatas y expresó una gran confianza en las posibilidades de desarrollo de sus mecanismos, no pensaba en inteligencia artificial humana, ni que el desarrollo de la técnica pudiera lograr emular tal complejidad del ser humano. Sin embargo, sí confiaba en la replicación del resto de animales, pues estos no eran inteligentes. Descartes se aventuró a pensar en un futuro en el que los constructores podrían jugar con sus máquinas a ese “juego de imitación” que trescientos años después, como veremos, nos propondría Alan Turing con sus máquinas pensantes intentando “engañar” a los humanos con su “inteligencia”.

El autómata de un animal podría funcionar exactamente igual que ese animal, de modo que no tendríamos forma de distinguirlo de uno real. Pero si pretendiéramos recrear a un humano con su forma y actitudes, siempre habría manera de descubrir el engaño. Dos medios habría según Descartes para destaparlo: el primero, “que jamás podrían usar de palabras, ni de otros signos” para responder satisfactoriamente a todo lo que se le dijera [como sí pueden hacerlo hasta los hombres más embrutecidos, que aun así siguen mostrando rasgos de inteligencia], y “el segundo [medio] es que, aunque hiciesen muchas cosas igual de bien, o quizá mejor que cualquiera de nosotros, fallarían infaliblemente en algunas otras por medio de las cuales se descubriría que no actúan por conocimiento, sino solamente por la disposición de sus órganos”. A las máquinas les faltaría raciocinio o, al menos, una disposición particular, y para él irrealizable, de sus piezas para emularlo, “de donde procede [decía] que sea moralmente imposible que en una máquina los haya lo bastante diversos como para hacerla obrar en todas las circunstancias de la vida de la misma manera que nuestra razón nos hace obrar a nosotros” (Descartes, 2018: 123-125).

Con estos argumentos, Descartes no pensaba en máquinas calculadoras más o menos pensantes, a la manera de nuestros ordenadores (aunque las primeras ya empezaban a vislumbrarse), ni en un posible desarrollo superior de las mismas, sino exclusivamente en máquinas antropomorfas o zoomorfas. En su tiempo ya se conocía la primera calculadora mecánica, inventada en 1642 por el filósofo y matemático francés Blaise Pascal (1623-1662). Definida como “máquina aritmética” y bautizada como “pascalina”, el ingenio tenía capacidad de operar con sumas y restas, y funcionaba a base de ruedas y engranajes. Luego llegó la más compleja máquina de calcular de Gottfried Leibniz (1646-1716) de 1672, capaz de realizar operaciones donde intervenían las cuatro reglas. Su desarrollo dio origen a la moderna computación, gracias al uso de su sistema de ruedas de conteo y engranajes.

La incapacidad de los animales para el habla era para Descartes motivo suficiente para afirmar que carecían absolutamente de razón, y que no debían confundirse las verdaderas palabras

“con los movimientos naturales que manifiestan las pasiones y pueden ser imitados tanto por las máquinas como por los animales; ni [había que] pensar, como [hacían] algunos antiguos, que las bestias hablan, aunque nosotros no entendamos su lengua” (Descartes, 2018: 127).

Aunque algunos animales pudieran ser superiores en algunas de sus acciones a los humanos, y máquinas como el reloj, pudieran “contar las horas y medir el tiempo de manera más precisa que nosotros con toda nuestra prudencia” (Descartes, 2018: 128), esto no significaba que ni los primeros ni los segundos estuvieran dotados de ninguna razón, y que “es la naturaleza la que actúa en ellos [los animales] según la disposición de sus órganos”, como el reloj actúa por la disposición de sus órganos dotada por el hombre.

Muchos años después de la muerte de Descartes, ochenta y nueve concretamente, parece que aquel sueño o especulación iba tomando forma y cumpliendo paso a paso con lo imaginado: crear un ser vivo animal no humano que mostrara el mismo comportamiento de uno real. Así, se iba completando un programa mucho más ambicioso, a priori, que el de la propia “inteligencia artificial”: la creación de una auténtica “vida artificial”. Lo primero era imposible de simular o copiar, pues el intelecto era una facultad propiedad del alma humana regalada por Dios; lo segundo sí era posible, pues un animal carente de alma sí podía ser replicado. El claro ejemplo, de otros que se pueden nombrar, llegó en la forma de un pato autómatas capaz de desarrollar, gracias a complejos mecanismos y procesos químicos, todo el proceso de la digestión. Llamado originalmente “Canard digérateur”, su creador fue el célebre constructor de autómatas e ingeniero francés Jacques de Vaucanson (1709-1782), en 1739. Se trataba de un auténtico robot capaz, además, de caminar, limpiarse las alas y mover la cabeza a ambos lados. El pato, efectivamente comía grano, lo digería y finalmente lo evacuaba con la apariencia real de una deposición de ave. Con todo, para algunos observadores quedaba una duda, no menor, sobre si en este prodigio había o no engaño y si, como se rumoreaba-

ba, el proceso químico de la digestión no era real, pues quedaba oculto a la vista. Quizás el producto de desecho fuera una composición o papilla previamente colocada en las entrañas del mecanismo. Para Descartes, que no lo conoció, el invento en nada hubiera diferido de un pato real, y su vaticinio se hubiera dado así por cumplido.

Thomas Hobbes (1588-1679), un mecanicista convencido, podría haber firmado un atinado pie a esta invención que tampoco alcanzó a conocer, repitiendo lo que tan bien expresó en la introducción de su *Leviatán* (1651):

“La Naturaleza (el arte con que Dios ha hecho y gobierna el mundo) está imitada de tal modo, como en otras muchas cosas, por el arte del hombre, que éste puede crear un animal artificial. Y siendo la vida un movimiento de miembros cuya iniciación se halla en alguna parte principal de los mismos ¿por qué no podríamos decir que todos los autómatas (artefactos que se mueven a sí mismos por medio de resortes y ruedas como lo hace un reloj) tienen una vida artificial? ¿Qué es en realidad el corazón sino un resorte; y los nervios qué son, sino diversas fibras; y las articulaciones sino varias ruedas que dan movimiento al cuerpo entero tal como el Artífice [refiriéndose a Dios] se lo propuso?” (Hobbes, 2005: 3).

LA VISIÓN DE TURING

En este punto son varios los puentes que se pueden tender desde las ideas filosóficas de Descartes a las ideas computacionales y matemáticas, pero también filosóficas, de Alan Turing (1912-1954), nuestro segundo protagonista. Haré un poco de historia antes de valorar la figura del matemático inglés y su entorno intelectual. Con anterioridad al término “informática”, los avances en computación electrónica habían dado lugar al término “cibernética”. El padre de este nuevo concepto fue el matemático y filósofo estadounidense Norbert Wiener (1894-1964). Durante la Segunda Guerra Mundial Wiener se involucró, junto a otros colaboradores, en el proyecto de desarrollo de ordenadores para el desarrollo de cálculos balísticos, concretamente para la fijación de objetivos de la artillería antiaérea apoyada por el radar, elección de la trayectoria apropiada y corrección de la misma en función del cambio de los datos, etc. Para ello, era necesaria una calculadora que enviara toda la información procesada directamente a la torreta giratoria del cañón, convertida en instrucciones precisas para la dirección y el momento de los disparos. El desarrollo de estas calculadoras había sido posible gracias a los trabajos previos de Alan Turing, que desde 1936 había adaptado nociones de la lógica matemática a la concepción, en principio teórica, de una máquina calculadora universal conocida como “máquina de Turing”.

Con principios e ideas de Turing y de Wiener, el lógico, matemático y físico húngaro-estadounidense John Von Neumann (1903-1957), elaboró un nuevo modelo que definía la “arquitectura” de un computador de uso genérico de modo que su constitución material o *hardware* fuera independiente del programa o software, instalado en él. Wiener y el ingeniero informático Julian Bigelow (1913-2003), sorprendidos por los

grandes logros y la efectividad de aquellos mecanismos cibernéticos que habían creado para la artillería antiaérea, se dieron a pensar que, al fin y al cabo, estos complejos procesos que había desplegado una máquina eran parangonables con los procesos de planificación, cálculo, corrección y memorización que hacían los seres humanos, o incluso los animales, cuando desarrollaban un comportamiento intencional. Más tarde, y en colaboración con el neurofisiólogo mexicano Arturo Rosenblueth (1900-1970) Wiener y Bigelow publicaron en 1943 el artículo *Comportamiento, fin y teleología*, donde por primera vez apareció el término “cibernética”, y se pusieron las bases teóricas de la futura *inteligencia artificial* (Agazzi, 2011: 222-223), aunque todavía sin recibir esa denominación. En 1945, Wiener y von Neumann organizaron un encuentro en Princeton al que acudieron lógicos, matemáticos, físicos e ingenieros, dejando ya sentadas las bases de la cibernética como nueva disciplina científica y muchos de los términos que luego habrían de hacerse tan populares como los de “analógico”, “digital”, “bit” o “feedback” (Agazzi, 2011: 221). En 1948, Wiener publicó *Cibernética, o el control y la comunicación en el animal y en la máquina*.

¿Cómo es, por tanto, la continuación que da Alan Turing a toda esta nueva disciplina? y ¿qué hay de filosófico en su obra y su pensamiento? En primer lugar, debemos repasar la biografía académica y los contactos que hizo durante su época como estudiante universitario. En 1931, Turing ingresó en el King’s College de Cambridge, gracias a una beca. Entre sus profesores estuvo nada menos que el físico, astrónomo y matemático inglés Arthur Eddington (1882-1944), cuyo experimento durante un eclipse solar en Isla Príncipe en 1919 había ratificado una de las predicciones de la teoría de la relatividad de Einstein, mediante la demostración de la desviación de la luz por influencia del campo gravitacional del Sol. Alan Turing había mostrado un gran interés por la lógica matemática, que había recibido un gran impulso desde la publicación en el periodo 1910-1913 de los *Principia Mathematica* del filósofo lógico y matemático Bertrand Russell (1872-1970) y del matemático Alfred North Whitehead (1861-1947). Recordemos que con esta obra ambos autores se propusieron la tarea de apoyarse en la lógica para establecer la certeza de las matemáticas y de derivar todos los postulados matemáticos en axiomas lógicos y reglas de inferencia rigurosamente formalizados con los que, a su vez, poder traducir a este esquema todos los tipos de razonamientos matemáticos correctos (Penrose, 1996: 172-173)]. El arduo intento, sin embargo, quedó frustrado por el conocido teorema de incompletitud del lógico austriaco Kurt Gödel (1906-1978) que, sin entrar en detalles, acabó demostrando en 1931 que existían ciertas paradojas que impedían formalizar la aritmética con axiomas y reglas de inferencia como los usados por la lógica (Strathern, 1999: 22).

Tras una estancia de dos años en EE.UU., Turing regresó a Gran Bretaña después de haber rechazado la oferta de John Von Neumann de trabajar junto a él en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (New Jersey), una institución en la que habían trabajado Albert Einstein y Robert Oppenheimer entre otros muchos talentos. Alan Turing prefirió volver al King’s College con la beca que le había sido renovada. Fue en esta época cuando conoció al filósofo austriaco Ludwig Wittgenstein (1889-1951). Wittgenstein había sido discípulo de Bertrand Russell en el Trinity College de Cambridge. Turing

comenzó a asistir a sus clases. Estas estaban formadas por un grupo selecto y reducido de alumnos y versaban sobre los fundamentos de la matemática desde un punto de vista filosófico. Allí se hablaba sobre la naturaleza exacta de las matemáticas, más que de su funcionamiento, una cuestión que interesaba a Turing. Si Wittgenstein opinaba que las matemáticas, como la lógica, podían seguir siendo válidas incluso con contradicciones, Turing contestaba negativamente, pues una matemática con contradicciones no resolvía con corrección los problemas (y nos ponía en alerta con el ejemplo del cálculo erróneo que podía hacer que un puente se viniera al suelo) asumiendo, eso sí, que en matemática podían darse inconsistencias, pero que esto era algo muy distinto a las “contradicciones”. La relación entre ambos fue, en esto, de un total desencuentro.

Los años 50 del siglo XX fueron dando lugar a la aparición de los primeros modelos matemáticos que imitaban el comportamiento humano. De esto tuvo gran responsabilidad el artículo “Maquinaria de computación e inteligencia” que Alan Turing publicó en 1950, curiosamente en una revista de psicología y filosofía, la revista *Mind*, editada en Edimburgo. El contenido general es bien conocido: Alan Turing planteó la pregunta de si podían pensar las máquinas. Como previamente sería necesario definir qué se entiende por una máquina y qué se entiende por pensar, cosas realmente complicadas y abiertas al debate, Turing replanteó la cuestión y sugirió otra forma de abordarla. Así, propuso un test para averiguar si una máquina podía presentar un comportamiento inteligente, de modo que pudiera engañar a un interrogador y hacerle creer que quien le estaba respondiendo era verdaderamente un ser humano. Este test recibió también el nombre de “juego de la imitación” o “test de Turing”. El test, y toda la teoría subyacente, se planteaba en un plano especulativo, pues en su momento no había aún capacidad para el desarrollo de este tipo de inteligencias artificiales, aunque sólo fueran en un nivel muy básico.

Fijemos aquí el nexo de unión entre las concepciones de Alan Turing y René Descartes. Las “máquinas humanas” imaginadas por el filósofo francés no pasarían la prueba, pues ya nos dijo que nunca podrían hablar o usar del lenguaje corporal para comunicarse e interactuar completamente con un interlocutor/interrogador. Tarde o temprano, barruntaba Descartes, las máquinas cometerían fallos que demostrarían que no actuaban por poseer raciocinio, sino por estar construidas artificialmente, igual que lo haría una programación deficiente o un algoritmo limitado a funciones muy concretas. La máquina que Turing concibió no tendría necesariamente apariencia humana, como la de Descartes, ni pensamiento siguiendo los mecanismos de la mente humana. Era suficiente con que la máquina jugara satisfactoriamente al juego haciendo algo parecido a “pensar”, aun haciéndolo de manera distinta que un humano. Turing, como antes Descartes con los autómatas, discurrió sobre un futuro de máquinas pensantes gracias al desarrollo de los entonces “computadores digitales”, que habrían de realizar cualquier operación que pudiera hacer un “computador humano”. Y, curiosamente, si pudiera pensarse que la mejor forma de reproducir mecánicamente la forma del pensamiento humano pudiera ser la utilización de computadores digitales eléctricos, debido a la necesidad de electricidad en la transmisión rápida de señales nerviosas, Turing sostuvo que esto no era necesario. Lo justificó señalando que las computadoras digitales por él manejadas

utilizaban procesos mecánicos de funcionamiento, herencia de las antiguas máquinas analíticas como las de Leibniz o Charles Babbage (1791-1871), que eran puramente mecánicas en todos sus componentes, con el uso de tarjetas, rodamientos y memoria de almacenamiento. ¿A qué nos llevaba todo esto? a sacudirnos el pensamiento preconcebido de obligarnos a buscar una inteligencia artificial basada en la electricidad o en procedimientos químicos, tal como eran necesarios en los procesos mentales humanos. Turing hizo además una declaración de gran relevancia: si queremos encontrar las similitudes entre las computadoras digitales y el sistema nervioso “debemos entonces buscar analogías matemáticas de función” en la forma de pensar (Turing, 2010: 6).

Turing fijó un horizonte de cincuenta años, es decir hacia el año 2000, para lograr programar computadoras con gran capacidad de memoria que pudieran jugar su “juego de la imitación” engañando al interrogador al menos con un 30% de posibilidades durante un tiempo de cinco minutos de preguntas. Y, es más, pensaba que para finales del siglo XX “uno podrá ser capaz de hablar de “máquinas pensantes” sin esperar ser contradicho” (Turing, 2010: 8). En su artículo se adelantó a responder a las previsibles objeciones y opiniones contrarias que pudiera recibir su pretensión de desarrollar máquinas pensantes, consciente de los seguros debates filosóficos, psicológicos, morales y religiosos que habría de generar el anuncio de la posibilidad de crear inteligencia humana artificial. Y esto es algo que, como científico, Turing podía haber omitido perfectamente, sin estar obligado a tales justificaciones. Sin embargo, las hizo.

La primera fue la objeción religiosa. Las religiones, decía Turing, afirman que “pensar es una función del alma inmortal del hombre. Dios le ha otorgado un alma inmortal a cada hombre y mujer, pero no a otros animales o máquinas. Por lo tanto, ningún animal o máquina puede pensar”. A lo que añadía: “soy incapaz de aceptar ninguna parte de esto, pero intentaré responder en términos teológicos”. Para ello se preguntó si el Todopoderoso no lo era tanto como para, si así lo quisiera, poder dotar de alma a los animales, pero también a una máquina, aunque no tuviera poder para “igualar uno con dos” (Turing parece lanzar aquí a Dios un reto con las matemáticas, incapaz de manipularlas o ajustarlas a su antojo, a pesar de todo su poder). Premeditadamente ofreció contraejemplos en el fondo tan inconsistentes y especulativos como pensaba que eran los planteamientos teológicos, y acabó afirmando que, en el fondo, no le impresionaban mucho las discusiones teológicas, sea cual fuere el asunto (Turing, 2010: 9).

Otra importante objeción llegaría previsiblemente de los que opinaban que este tipo de inteligencia vendría a dar un enfoque mecánico de la inteligencia, y por ello un determinismo en los procesos mentales, lo cual ponía en duda el “libre albedrío” del que era poseedora la inteligencia humana (aunque este tema continua en el centro del debate filosófico). Turing atajó rápidamente el problema afirmando que las máquinas también manifestaban un comportamiento indeterminista o aleatorio, como había tenido ocasión de comprobar con las computadoras *Colossus* y *Delilah*. La primera había sido diseñada durante la Segunda Guerra Mundial por Tommy Flowers para el descifrado de mensajes alemanes y la segunda formaba parte de los trabajos criptográficos de Turing con la digitalización de los mensajes de voz. Confiado en sus propios experimentos, ofreció las instrucciones para crear máquinas que aprendieran y autocorrigieran errores,

introduciendo en su programación definiciones, proposiciones, teoremas matemáticos y expresiones que tuvieran la forma lógica de una proposición, para con todo ello poder tener un sistema completo de inferencias lógicas “construidos dentro” de ellas y ciertos elementos de aleatoriedad que quedarían fijados en su almacenamiento.

En su artículo Turing asumió también el doble papel de un filósofo de la ciencia y un filósofo de la mente, tal era la amplitud de sus inquietudes intelectuales. En el primer caso, ofreció un criterio de demarcación del método científico, corrigiendo un sentir muy extendido entre los filósofos de la ciencia por el cuál este método se regiría por la obtención y seguimiento de evidencias irrefutables, de modo que el científico sólo se guiaría por una absoluta certeza de los hechos para alcanzar el conocimiento de un fenómeno natural. De este modo:

“la visión popular de que los científicos proceden inexorablemente desde los hechos bien establecidos hacia otros hechos bien establecidos sin nunca ser influenciados por alguna conjetura no probada es bastante equivocada. Dado que se hace claro cuáles son los hechos probados y cuáles son conjeturas, no puede haber ningún daño. Las conjeturas poseen una gran importancia debido a que éstas sugieren líneas útiles de investigación” (Turing, 2010: 8-9).

En segundo término, entró a considerar el “problema de la consciencia”, ante quienes objetarían la posibilidad de una máquina también consciente de lo que piensa, y de que, si esta llegara a alcanzar un pensamiento autónomo, debería manifestar también una consciencia real sobre el mismo (incluso experimentar sentimientos o sensaciones, como el placer, el dolor o la frustración), es decir no sólo capaz de pensar sino de sentir su propio pensamiento, de saber que ha pensado. Una vez más Alan Turing rechazó el debate, aunque admitiendo el problema de la consciencia humana, el de su localización precisa en el cerebro y el saber describirla en otras personas. Si no podemos conocer en primera persona la consciencia de otro, decía, tampoco podremos saber si una máquina inteligente ha desarrollado su propia consciencia (sólo siendo la máquina, podría sentirse el propio pensamiento). Aquí, se defendería con el punto de vista extremo del solipsismo, una forma radical de subjetivismo por la que sólo existiría aquello de lo que es consciente el propio yo, es decir la propia consciencia y no la de los demás. No creía necesario, en última instancia, que estos misterios de la mente tuvieran que ser resueltos antes de seguir trabajando en el intento de responder a la pregunta ¿pueden las máquinas pensar?, y cerraba el debate de la mente y la consciencia de otros con cierto humor, diciendo que: “en vez de argumentar continuamente contra este punto, lo usual es tener la convención educada de que todos pensamos” (Turing: 11).

Otra de las objeciones a las máquinas pensantes consideradas por Turing fue la conocida como “objeción de Lady Lovelace”. Lady Lovelace fue colega del matemático inglés Charles Babbage, profesor Lucasiano de matemáticas en Cambridge desde 1828 a 1839, como el propio Turing nos informa. Babbage había planeado la construcción, lograda parcialmente, de una llamada “máquina analítica” que fue el germen de las futuras computadoras digitales. La historia de las ideas, triunfos y fracasos de Babbage

es larga, pero resulta que fue su colega de trabajos, la matemática y escritora Ada Lovelace (1815-1842), hija del poeta Lord Byron (de hecho, su única hija legítima reconocida), quien le planteó una objeción seria a su invento. Para Lady Lovelace, y según una memoria describiendo la invención de Babbage, “la máquina [analítica] sólo puede hacer lo que le digamos que haga”, es decir, que no tiene capacidad para desarrollar un pensamiento original y sorprendernos, obedeciendo sólo la instrucción que le ha sido dada. Turing contestó con la seguridad de lograr, contra esto, desarrollar máquinas con aprendizaje, intentando programarlas como si se tratara de la mente de un niño, listas a recibir información, almacenarla e ir amoldándola para lograr una forma de pensamiento maduro. Todo pasaría, desde luego, por una necesaria evolución futura en la investigación y en las tecnologías informáticas. Sobre todo, se necesitaba mayor velocidad en el procesamiento de datos y una mayor capacidad de almacenaje en la memoria.

El artículo de Alan Turing fue algo más que la exposición de una teoría científica donde se defendían argumentos matemáticos, técnicos o mecánicos. Todo el texto estaba impregnado de un pensamiento intelectual que demostraba las finas conexiones existentes entre historia, filosofía, lógica, psicología y ciencia, de las que Turing era conocedor y usaba para justificar la viabilidad de sus ideas. En sus líneas encontraron espacio referencias a Pierre-Simon Laplace (1749-1827), Galileo Galilei (1564-1642), Charles Babbage o al Antiguo Testamento. Lo que quiero destacar en Alan Turing, es que en 1950 nos estaba hablando abiertamente de un programa perfectamente diseñado de Inteligencia Artificial, valiente en sus proposiciones, confiado en sus resultados y, sobre todo, preocupado en ofrecer respuestas a todas las objeciones, pero sin desviarse ni un solo centímetro del camino obstinado que había decidido tomar. En 1951 Alan Turing fue elegido miembro de la Royal Society con tan solo 39 años. Entre los proponentes a este nuevo honor se encontraba Bertrand Russell, ahora convertido en admirador, que estudió su trabajo y apreció abiertamente su profundo significado filosófico (Strathern, 1999: 45).

Como señal del grado de influencia que la nueva disciplina de la cibernética y la computación, y sobre todo del trabajo de Turing, tuvo en la filosofía, tenemos la de su papel en el refuerzo de las teorías funcionalistas. Efectivamente, aunque tenía raíces en la concepción aristotélica del alma, inseparable del cuerpo, o en Thomas Hobbes, que decía que el razonamiento era una especie de cálculo que procedía por principios mecanicistas comparables a las reglas de la aritmética, el funcionalismo, o mejor dicho una de las versiones del mismo, era una doctrina asociada a la Filosofía de la Mente, que alcanzó con las ideas de Alan Turing su máxima justificación en el denominado “funcionalismo del estado de máquina” (Levin, 2018: 3). Esta teoría fue desarrollada por el matemático, filósofo e informático estadounidense Hilary Putnam (1926-2016). Según esta idea, la mente humana era una máquina de Turing, funcionando como una computadora, capaz de trabajar con cualquier algoritmo dado. Por su parte, los estados mentales (sentir dolor, alegría, deseo, intención, creencia, memoria, etc.) se asemejaban a los estados de su “tabla de máquina”. La tabla de máquina se correspondería con el programa, el conjunto de instrucciones en forma de tabla, dadas a la máquina para proceder de paso en paso hasta la solución que se le pedía. Obviamente, la tabla de máquina de una mente

humana sería inmensamente más compleja que la utilizada en una máquina de Turing. Así, como en una computadora, el cerebro sería el hardware y la mente el software, o sea, la mente se definiría como el conjunto de programas ejecutados en el cerebro.

Haciendo historia de nuevo tenemos que en 1956, el término inteligencia artificial fue empleado por primera vez en la Conferencia de Dartmouth, una iniciativa de la Universidad de Dartmouth, New Hampshire, para el desarrollo de máquinas pensantes. La conferencia fue organizada, entre otros, por John McCarthy (1927-2011), un profesor de matemáticas en Dartmouth, que, a su vez, acuñó el término Inteligencia Artificial (AI por sus siglas en inglés), suponiendo el inicio de las Ciencias de la Computación y el espíritu fundacional de la IA en su concepción fuerte. Pero Alan Turing no pudo ya ni ser testigo de este proyecto, ni participar en desarrollos similares pues había muerto, al parecer por suicidio el 7 de junio de 1954, después de una vida maltratada por la intolerancia y el rigor del sistema legislativo británico, que consideraron “imperdonable” y punible su condición homosexual.

Turing vivió un tiempo de confianza en la ciencia y la tecnología, donde era posible especular con futuribles muy optimistas. Algo similar le pasó a Descartes, como vimos, que fijándose en la perfección cada vez mayor de los mecanismos de relojería, veía posible mejorarlos y darles una apariencia humana o animal. La evolución de la informática no abandonó el estudio del desarrollo de inteligencias artificiales (continúa de hecho en este camino), y la cuestión fue materia de interés y discusión recurrente en todos los ámbitos de la comunidad científica. Tenemos un ejemplo muy llamativo en la postura adoptada por el físico y Premio Nobel en 1965 Richard Feynman (1918-1988). Feynman se interesó también por el problema de la mente y su naturaleza, la relación entre física y computación, y por la posibilidad de reproducir sus estados a través de máquinas capaces de una inteligencia propia. La opinión de Feynman partía de una evidencia: que todo está hecho de átomos. De este modo cuando un animal aprendía, algo debía haber cambiado en su estructura cerebral, aunque, como nadie sabe, él tampoco podía responder a la pregunta ¿de qué manera era diferente entonces ese cerebro? Equiparaba también el cerebro a un gran ordenador, con un montón de líneas por las que pasaba la información al modo de una sinapsis neuronal. Y aunque le interesaba el tema de la relación entre pensamiento y máquinas computadoras, consideraba que se estaba muy lejos de conseguir respuestas. Los seres humanos eran muy diferentes a las máquinas, decía, y, resignadamente, admitía que había que empezar por investigar desde más atrás, desde organismos aparentemente menos complejos. Con su peculiar forma de expresar sus conocimientos e ideas Feynman dijo:

“[...] Si pudiéramos siquiera concebir cómo funciona un perro, habríamos llegado muy lejos. Los perros son más fáciles de entender, pero nadie sabe todavía cómo funciona un perro”. (Feynman: 2022, 96).

Sus ideas eran reflejo de su concepción materialista y fiscalista de la especie humana, y de toda la naturaleza por extensión. Su entusiasmo por la inteligencia humana y por la computación, le llevó a colaborar a principios de los años 80 con la empresa

“Máquinas pensantes” (*Thinking Machines Corporation*), para el desarrollo de superordenadores. La empresa había sido fundada por Carl Feynman, hijo de Richard, junto con un grupo de antiguos estudiantes del Massachusetts Institute of Technology (MIT). Richard Feynman trabajó con ellos durante varios veranos y aplicó sus métodos de acortamiento de cálculos, para el diseño de las primeras máquinas de súper-computación paralela (capaces para una ejecución simultánea de muchos cálculos independientes, y distintas de los convencionales ordenadores en serie). En la época se confiaba en que este sistema pudiera dar lugar a máquinas con las capacidades de un cerebro humano (Penrose: 575). Los métodos de acortamiento de cálculos de Feynman, fueron similares a los que empleó durante el desarrollo de la bomba nuclear en los años 40, durante su participación en el Proyecto Manhattan en el Laboratorio Nacional de los Álamos, junto a Robert Oppenheimer. Feynman fue también uno de los primeros científicos en imaginar la posibilidad de computadores cuánticos, desarrollando su propia versión.

LA VISIÓN DE PENROSE

Roger Penrose (n. 1931), nuestro tercer protagonista de hoy, por estos mismos años 80 no creía en las posibilidades de la computación paralela en orden a descubrir cómo se desarrolla un pensamiento consciente. Pensaba más bien, que la percepción consciente se producía en un plano de “unicidad”, es decir, de muchos procesos independientes diferentes como “andar, abrochar un botón, respirar o incluso hablar” que se hacen simultáneamente sin tener consciencia efectiva de ninguno de ellos. Lanzó, así, la teoría de que esta “unicidad” del pensamiento consciente pudiera estar relacionada con el *paralelismo cuántico*. Esto significa que existe en el nivel cuántico la posibilidad de coexistencia en una superposición, de alternativas diferentes. “Por lo tanto [según Penrose] un *estado cuántico simple* podría consistir en principio en un gran número de actividades diferentes, todas ellas ocurriendo simultáneamente” (Penrose: 576). Esta idea es la que deriva en el desarrollo de los computadores cuánticos, o sea, ordenadores con la capacidad de realizar un gran número de cálculos simultáneos aprovechando el principio de *paralelismo cuántico*.

El físico matemático y Premio Nobel de Física en 2020 Roger Penrose, también hizo sus propios planteamientos filosóficos, como los que preocupan acerca del llamado problema mente-cuerpo: ¿cómo puede una consciencia surgir de un objeto material como el cerebro, y cómo esta consciencia, que tiene una naturaleza *no-material* puede influir en los movimientos, que en apariencia están determinados físicamente? (Penrose: 585). Este planteamiento hacía resurgir, y se sumaba a ella, la conocida objeción que Isabel de Bohemia hizo a Descartes en aspectos precisos de su teoría dualista de la mente y el cuerpo. El interrogante se planteaba en la cuestión de la interacción mente-cuerpo y cómo, según Descartes, uno y otro se influían. Si la mente y el cuerpo están formados por sustancias distintas, etérea la primera y material la segunda, la princesa no entendía cómo algo inmaterial podía prestar su influjo a algo con entidad física y extensa.

Durante sus estudios universitarios en Cambridge, Penrose asistió a tres cursos que marcaron su pensamiento futuro: uno impartido por el físico y cosmólogo británico-austriaco Hermann Bondi (1919-2005) sobre relatividad general, otro ofrecido por el matemático y físico teórico Paul Dirac (1902-1984) sobre mecánica cuántica y un tercero dado por el matemático Stourton W. Peile Steen (1897-1979) sobre lógica matemática. En una entrevista concedida en 1996 Penrose nos informó sobre estos cursos declarando:

“La importancia del teorema de Gödel apareció muy clara y también la idea de las máquinas de Turing y demás, y creo que en ese periodo se formó mi opinión, que todavía mantengo, de que hay algo en los fenómenos mentales, en nuestra comprensión de las Matemáticas en particular, que no se puede encerrar en ningún tipo de cálculo. Desde entonces mantengo este punto de vista” (García, 1996: 16).

Penrose se convirtió en un reconocido negacionista de la inteligencia artificial computacional. Hubo un tiempo en que había estado de acuerdo en pensar que los cerebros funcionaban como ordenadores, hasta que conoció los teoremas de Gödel. En 1989 publicó su famosa obra *La nueva mente del emperador*. En ella dedicó sus dos primeros capítulos a Alan Turing y sus ideas computacionales, y luego de realizar un pormenorizado análisis de su trabajo, declaró su opinión tajante sobre la imposibilidad de alcanzar la inteligencia artificial. Fundó dicha opinión en la combinación de argumentos de la matemática, la física (como la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica) y el estudio de la estructura cerebral humana, que desarrolló en los capítulos del libro. Y todo ello para sostener que cuando pensamos, hacemos algo más que computar. Opinaba que la matemática no era un modo de pensamiento de carácter computacional, es decir, algorítmico, y que era demostrable que ciertas formas de pensamiento y de procedimientos matemáticos no podían describirse como computacionales: que eran procedimientos no-algorítmicos (Sánchez Ron, 2000: 18).

Para Penrose la IA fuerte no podría ser posible nunca a base de algoritmos, pues por muy complejos que estos fueran, ninguno podría incorporar en sí mismo verdadera comprensión o consciencia. En esta inteligencia, la estructura lógica del algoritmo (lo que sería el símil de un “estado mental”) es lo verdaderamente importante, al margen de si este algoritmo se ejecuta en un computador electrónico o en un cerebro humano. Como muy bien apuntó Penrose, siguiendo al filósofo americano John Searle (n. 1932), esta idea entrañaba una cierta forma de “dualismo”, una especie de regresión al pensamiento pasado de Descartes en el siglo XVII. Si con Descartes teníamos dos sustancias, una física o materia ordinaria (el cuerpo) y otra mental (la mente o espíritu racional), ahora con la IA fuerte tendríamos de nuevo una sustancia material (el cerebro o el ordenador) y una sustancia mental o etérea representada por la estructura lógica de un algoritmo, con una existencia incorpórea como la de un pensamiento o un sentimiento (o cualquier otro estado mental). Esta forma extrema de dualismo era inaceptable para Penrose desde sus ideas de unicidad cuerpo-mente y su vínculo físico. Por extensión,

tampoco compartía la afirmación de la IA fuerte de que la simple activación de un algoritmo podía producir en una máquina un estado de consciencia igual al desarrollado en el cerebro.

Por lo que respecta a la comprensión del pensamiento humano, del funcionamiento de la mente y el intelecto, Penrose sostuvo que “es nuestra actual falta de comprensión de las leyes fundamentales de la física la que nos impide aprehender el concepto de “mente” en términos físicos o lógicos” (Penrose, 1996: 42-43), no descartando, y deseando, que en el futuro el propio desarrollo de la física nos de la respuesta al lugar que ocupa la mente en ese mundo de la física. Este momento podría llegar al hacerse compatible la teoría cuántica con la teoría de la relatividad general de Einstein, un campo en el que el propio Penrose había hecho sus aportaciones desde la teoría de *twistores* (objetos geométricos abstractos y matemáticos en el dominio de los números complejos).

La unificación daría lugar a la nueva teoría de la *gravitación cuántica*. Esta, según Penrose,

“suministraría una conexión más satisfactoria entre el nivel microscópico de los átomos y las moléculas (el “nivel cuántico”) y el nivel macroscópico de los fenómenos discernibles (el “nivel clásico”). Creo que la acción del cerebro no se entenderá nunca de manera apropiada sin semejante teoría” (Penrose, 1996: 20).

Se trataba de un pensamiento que ya estaba en algunos de los padres de la nueva física cuántica. En la época dorada del desarrollo de la mecánica cuántica, el físico alemán Werner Heisenberg (1901-1976) escribió en sus *Conversaciones sobre la relación entre la biología, la física y la química*, redactadas entre 1930 y 1932: “Las mismas fuerzas ordenadoras que han configurado la naturaleza en todas sus formas, son también las responsables de la estructura de nuestra alma y, por tanto, también de nuestra facultad de pensar” (Heisenberg, 1996: 179).

La personal, y no falta de polémica, aportación de Roger Penrose a la unificación entre mecánica cuántica y procesos mentales, vino conjuntamente de la mano del anestesiólogo y profesor de la Universidad de Arizona Stuart Hameroff (n. 1947). Ambos propusieron la idea de que en los microtúbulos de las neuronas humanas podrían producirse fenómenos cuánticos cuyos efectos darían lugar a la aparición de la consciencia. De la concreta localización de estos fenómenos y de la interpretación de los mismos, cosa por el momento no lograda, vendría la verdadera explicación de la naturaleza del intelecto y la consciencia humana, un descubrimiento que de producirse tendría un carácter revolucionario.

Este es el episodio final del apretado, y desde luego parcial recorrido mostrado aquí sobre la trayectoria histórica y filosófica de la llamada IA, y por las particulares visiones y estados de la cuestión experimentados hasta finales de los años 80 del siglo XX. El trabajo de matemáticos, informáticos, lógicos, filósofos, filólogos e ingenieros siguió, y continúa siguiendo, su camino hacia delante, ofreciéndonos cada vez más sorprendentes usos y aplicaciones de la IA. Sólo el futuro, cada vez más cercano, nos dirá cuál de nuestros protagonistas se aproximó más al vaticinio de una total inteligencia artificial

humana. Descartes, hijo de un tiempo aún muy limitado en conocimientos y apegado a su religiosidad, descartó por completo su posibilidad; Alan Turing la vio clara en la computación, la lógica y las matemáticas, al margen de todo tipo de prejuicios, y Roger Penrose, contrario a la vía computacional y algorítmica, quizás todavía a sus 92 años, confíe en que la computación cuántica y la averiguación de las causalidades físicas del funcionamiento mental traerán la respuesta.

BIBLIOGRAFÍA

- AGAZZI, EVANDRO (2011). *La ciencia y el alma de occidente*. Madrid: Tecnos.
- BERNAL, JOHN D. (1979). *Historia social de la ciencia. I. La ciencia en la historia*. Barcelona: Ediciones Península.
- DESCARTES, RENÉ (2011). *Grandes pensadores. Descartes*. Flórez Miguel, Cirilo (Est. introd.). Madrid: Editorial Gredos.
- (2018). *Discurso del método para bien conducir la razón y buscar la verdad en las ciencias*. Lomba Falcón, Pedro (Edic. y trad.). Madrid: Editorial Trotta.
- FEYNMAN, RICHARD P. (2022). *Seis piezas fáciles. La física explicada por un genio*. Barcelona: Crítica.
- GARCÍA PRADA, ÓSCAR (1996). “Entrevista a Roger Penrose”. Alcón, María José (Transcripción y traducción). La Gaceta. pp. 13-39.
- HEISENBERG, WERNER (1996). “Física atómica y pensamiento pragmático (1929)”, en Diálogos sobre la física atómica. Publicado en Física cuántica. Barcelona: Círculo de Lectores.
- HOBBS, THOMAS (2005). *Leviatán. O la materia, forma y poder de una república eclesiástica y civil*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- LA BIBLIA DIDÁCTICA (2013). Madrid: Fundación SM-PPC Editorial.
- LEVIN, JANET (2018). “Functionalism”. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Otoño, 2018. Edward N. Zalta (ed.).
- PENROSE, ROGER (1996). *La nueva mente del emperador*. Barcelona: Círculo de Lectores.
- PRINCIPE, LAWRENCE M. (2012). *La Revolución Científica. Una breve introducción*. Madrid: Alianza Editorial.
- SÁNCHEZ RON, JOSÉ MANUEL (2000). *El siglo de la ciencia*. Madrid: Taurus.
- STRATHERN, PAUL (1999). *Alan Turing y el ordenador en 90 minutos*. Madrid: Siglo XXI de España Editores.
- TATON, RENÉ (1972). *Historia general de las ciencias, tomo II. La ciencia moderna*. Barcelona: Ediciones Destino.
- TURING, ALAN (1937). “On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem”. *Proceedings of the London Mathematical Society*, nº 42, pp. 230-265.
- (2010). *Maquinaria computacional e inteligencia* (1950). Fuentes Barassi, Cristóbal (Trad.). Universidad de Chile.

LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EDUCACIÓN. OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS¹

*Conferencia pronunciada por el
profesor D. Juan Luis Rubio Mayoral,
el día 6 de mayo de 2024*

Para iniciar este recorrido voy a emplear una escena narrada por Lemuel Gulliver² en uno de los viajes prodigiosos de este personaje singular. Guiado, por la pluma y el ingenio de Jonathan Swift, cuenta que en una dependencia de la Academia de Lagado, existía un ingenio técnico capaz de «hacer progresar el conocimiento especulativo mediante operaciones prácticas y mecánicas». A juicio del inventor, con aquel tablero hasta «el más ignorante podía, a un precio razonable y con un pequeño esfuerzo físico, escribir libros de filosofía, poesía, política, leyes, matemática y teología con la mínima necesidad de ingenio y estudio» (2019, p. 217). A todas luces, esta suerte de invento imaginado por Swift parece que cumplía con las funciones de lo que ahora denominamos Inteligencia Artificial Generativa (IAG). Esa que desde noviembre de 2022 a través de la aplicación Chat GPT, creada por la empresa OpenAI, ha supuesto una innovación disruptiva en los sistemas de gestión de la información y creación de conocimiento. Como tendré ocasión de exponerles, Jonathan Swift mostrará luego, que el al ingenio de Lagado había que incorporarle algo más, para que tal prodigio generara un texto coherente.

Pero antes de adentrarme o quizá perderme en el relato, permítanme que les dé cuenta de la estructura que intentaré aplicar a esta intervención. Mi voluntad es ordenarla en cuatro partes que tienen relación con el área de la que provengo y con los temas en que me especialicé en su momento, sobre los que investigo y sobre los que puedo hablar³. El primero es la historicidad del conjunto de técnicas que componen lo que conocemos como inteligencia artificial, limitada en su estudio a las herramientas que facilitan el acceso y el procesamiento de información, los sistemas generativos y su integración en la enseñanza y el aprendizaje. La segunda analiza las capacidades propias del ser

1. El texto corresponde al contenido de la conferencia pronunciada el 5 de mayo de 2024 dentro del Ciclo «Filosofía e Historia de la Ciencia y de la Técnica» en memoria del profesor Ramón Queralto Moreno organizado por la Real Academia Sevillana de Ciencias.

2. En la ficción, estudiante de Medicina en Leiden y oficial médico.

3. Punto 7 del *Tractatus Filosófico* de Ludwig Wittgenstein: «Sobre lo que no se puede hablar hay que callar».

humano para aprender y evolucionar en el dominio del conocimiento de la realidad, desde la hipótesis de que los avances en las neurociencias relacionados con la cognición y el aprendizaje son la base científica sobre la que asentar principios teóricos y procedimientos técnicos en enseñanza. También para mostrar la medida en que la neurociencia, nutre de inspiración a su emulación artificial. La tercera, compara ambas para analizar las fortalezas de la inteligencia artificial (IA) aplicada a distintos modelos de enseñanza y aprendizaje, acordes o no con las ciencias cognitivas, para desvelar las oportunidades, así como las debilidades y amenazas que toda técnica posee, y para comprender alguno de los desafíos que tiene ante sí. La cuarta y última, se centra en los retos que los poderes del Estado han de afrontar para regular las políticas en materia de IA en educación y enseñanza en el caso de España, a partir de la Ley aprobada por el Parlamento Europeo. Un área, esta de la enseñanza, que viene siendo considerada por Europa como de alto riesgo.

HISTORICIDAD DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EDUCACIÓN

Las máquinas empleadas para procesar datos han sido una ocupación constante para la educación. De hecho, para el ingeniero Jeff Krimmel, la inteligencia artificial comenzó con el ábaco, una de las herramientas empleadas en la enseñanza y por su impacto, considerada como una de las más importantes para la civilización. En la cultura Maya haciendo uso el «Nopohualtzintzin», que sigue formando parte del contenido formativo en algunos países americanos. En la historia de la educación queda constancia de que cada avance técnico útil para una sociedad se ha integrado en la enseñanza como parte de su cultura y con ello de su supervivencia. Como sucede en el resto de las áreas de actividad humana la técnica ha modificado la manera de concebir la enseñanza, desde los niveles elementales a los superiores. Pero no nos engañemos, los avances técnicos son la proyección de un conocimiento que el objeto o medio didáctico sobre el que se proyecta mantiene para sí. Nunca un medio empleado en la enseñanza ha transferido el conocimiento que lo ha hecho posible a la persona que lo emplea. De manera que los avances en los medios didácticos apenas han alterado los procesos humanos de aprendizaje. Un proceso complejo que para cada materia requiere del análisis, estudio, asimilación, dominio y aplicación de lo aprendido para cada campo de actividad concreto.

Las evidencias insisten en que la técnica apenas aporta cambios en los procesos básicos de adquisición del conocimiento. Un hecho que está lejos de negar la necesidad de incorporar a los procesos de formación todos los recursos técnicos generados por los avances en el conocimiento. Lo contrario sería una negación de la realidad que haría inservibles a los sistemas de formación. Debemos entender que la adquisición de conocimiento es lo que nos hace humanos. En la concepción de Immanuel Kant el ser humano «solo podrá llegar a serlo mediante la educación. No será otra cosa que lo que la educación haga de él» (Kant, 1803). Es sencillo de entender que la función de las herramientas técnicas es instrumental y en ningún caso finalista, salvo en aquellas especialidades que tengan por objeto el dominio de la técnica. Los sistemas digitales

parten de la base de ser las plataformas ideales para adquirir conocimientos y promover aprendizajes. Por otra parte, el seguimiento de los tiempos y acciones realizadas por cada estudiante en su proceso de aprendizaje, han de ser acordes a los procesos cognitivos humanos avanzados por las neurociencias y avalados por la experiencia, así como con los contenidos oficiales previstos en la legislación vigente

En la enseñanza elemental, básica o primaria, el empleo del ábaco o la calculadora nunca puede suplantar la adquisición de los conocimientos que permiten operar con cantidades y entender los procedimientos básicos de cálculo, lo que se conoce como «las cuatro reglas». Este hecho también sucede con la lectura y la escritura en la que los avances técnicos pueden haber mejorado el proceso esencial de aprehender la asociación de un sonido a una grafía y desde ella el dominio de la comunicación escrita, de la que por otra parte dependemos para acceder a la mayor parte del conocimiento acumulado por la humanidad.

En la narración de Swift, Lemuel Gulliver observa el artefacto de la Academia de Lagado que ocupa toda el aula y que se compone de numerosas piezas de madera cubiertas por todos lados de papel pegado a ellos y ensartadas juntas en alambres delgados. Sobre aquellos papeles aparecían escritas todas las palabras del idioma en sus varios modos, tiempos y declinaciones, pero sin orden alguno. Para hacer funcionar el ingenio aquellos avezados aprendices, a una orden del maestro, echaban mano a unos mangos de hierro que había alrededor de los bordes, en número de cuarenta, y, al girarlos, alteraban toda la disposición de las palabras. Después, le ordenaba a treinta y seis analizar las líneas y, cuando encontraban tres o cuatro palabras juntas que podían formar parte de una oración, las dictaban a los otros cuatro, encargados de ir anotándolas, y así durante seis horas al día. El profesor mostró a Gulliver «varios volúmenes en gran folio, ya reunidos en sentencias cortadas, que pensaba enlazar, para, sacándola de ellas, ofrecer al mundo una obra completa de todas las ciencias y artes».

El tablero y su función sirven para plantear una cuestión central, que quizá pueda formularse con precisión en términos semejantes a estos: ¿Cómo debe la educación equilibrar la incorporación de avances técnicos con la preservación de principios pedagógicos esenciales? El avance en el conocimiento especulativo de Lagado, al que remite Swift, queda condicionado a la capacidad de una persona de procesar las sentencias fragmentarias generadas de manera aleatoria por una máquina, almacenados en un soporte escrito. Aquí es donde se hace preciso el empleo de técnicas que permitan transformar los datos acumulados en información para estructurarla en un discurso coherente y que aporte conocimiento original o al menos nuevas formas de interpretar lo conocido. Pero además, este hipotético conocimiento debe ser validado. Ha sido el aumento progresivo de la capacidad de computación, la generación y acceso a volúmenes crecientes de datos lo que ha permitido desarrollar y programar algoritmos para que las máquinas aprendan por sí mismas de forma autónoma.

La transformación de datos en información requiere un aprendizaje previo, una formación específica basada en conocimientos precisos para ordenar, procesar y analizar los datos con los que obtener información válida, veraz y valiosa. El acceso a los datos no garantiza que se alcance a obtener información, y la que facilitan los sistemas

transformadores pre-entrenados generativos ha de ser validada antes de aceptarla como veraz. Es preciso comprobar las fuentes, contrastar la información.

CÓMO HA EVOLUCIONADO LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los procesos que confluyen en los sistemas de IA tienen una trayectoria temporal que las concatena a la historia y les dota de sentido. La ciencia investiga los principios que caracterizan la inteligencia humana para replicarla de formas diversas. Desde los autómatas que custodiaban la isla de Rodas en la Odisea narrada por Homero, a la máquina de Charles Babbage, o el ajedrecista mecánico de Torres Quevedo junto a otros mecanismos de cálculo. Un autómata particular es la máquina de Turing, provista de una cinta imaginaria de longitud infinita, que se puede mover en ambos sentidos estampando o borrando un cero o un uno en cada espacio. Esta máquina tan abstracta ha ejercido enorme influencia pues representa un punto de vista en el estudio de la teoría, en relación con la existencia de procedimientos mecánicos para la resolución de problemas (teoría de algoritmos). Pero quizá la clepsidra concebida por Ctesibio de Alejandría le transforma en el primer constructor de una máquina autocontrolada por un regulador del flujo del agua que actuaba conforme a un método programado. Por tanto, se identifica como uno de los primeros artefactos de la humanidad regido por un algoritmo. La clepsidra funcionaba con instrucciones incorporadas en el sistema.

Más allá de la programación mecánica de los sistemas analógicos, si queremos entender la transformación operada, es preciso relacionarla con la «computación natural» o «biocomputación» que ha sido básica en el desarrollo de la IA. Esta se ha inspirado en el funcionamiento de los organismos vivos desde los que simular e implementar los procesos dinámicos que se dan en la naturaleza, susceptibles de ser considerados como procesos de cálculo (Pérez & Sancho, 2003). En sus comienzos, los sistemas de biocomputación, imitando los sistemas biológicos, tomaron como unidad de funcionamiento la célula nerviosa y sus conexiones aferentes y eferentes. A pesar de otras propuestas, el desarrollo del modelo de neurona artificial se basa en el que en 1943 idearon Warren McCulloch y Walter Pitts donde cada neurona tenía un «umbral de activación» fijo. Hicieron uso de los principios básicos de la fisiología neuronal, del análisis formal de la lógica proposicional de Bertrand Russel y Alfred N. Whitehead (1910) y de la teoría de la computación propuesta por Alan Turing, para formular la hipótesis de que, redes definidas de manera apropiada podrían aprender.

La conferencia de trabajo celebrada en el verano de 1956, dos años después de la muerte de Alan Turing [1912-1954] en el Dartmouth College de Hanover, en el estado de New Hampshire, financiada en parte por la Office of Naval Research, es el origen del campo de conocimiento de la inteligencia artificial. Se trata de una denominación propuesta por John McCarthy, su organizador, para poner nombre al campo de conocimiento cuyo tema principal unificado era la idea de «agente inteligente». En los términos descritos por Russell y Norvig (2016) sería aquel ente que pueda percibir su entorno a través de sensores y actuar sobre él a través de efectores. Además, se espera que el

«agente inteligente» actúe de manera autónoma, tomando decisiones para lograr sus objetivos o resolver problemas.

En la reunión del Dartmouth College participaron una decena de expertos, que debatieron durante dos meses sobre los temas que serían el núcleo de la materia, como la cibernética, la teoría de autómatas o el procesamiento de información compleja. Declararon que sus trabajos partían de una conjetura: si cada aspecto del aprendizaje fuera descrito con la precisión necesaria, podrían construir máquinas capaces de simularlo (McCarthy, et al., 1955). Intentarían averiguar el modo de fabricarlas de manera que haciendo uso del lenguaje, formaran abstracciones y conceptos, resolvieran problemas y mejoraran por sí mismas (Belda, 2017). De sus debates iniciales en pos de hallar soluciones para la IA, surgieron distintas corrientes de investigación y desarrollo. Allen Newell y Herbert Simon partieron de la independencia entre el cerebro, como procesador biológico, y la cognición como fenómeno de alto nivel (1980, 1974) en una línea de investigación que progresó hacia el desarrollo de «sistemas expertos». Por su parte, Frank Rosenblatt propuso replicar la biología neuronal para desarrollar modelos de inteligencia artificial. La estructura del cerebro era el soporte desde el que se desplegaban las funciones cognitivas y, en consecuencia, era necesario ingeniar un hardware capaz de replicarlo (1961). Este sería el origen de las «redes neuronales» y por extensión del denominado «modelo conexionista». Sería Donald Hebb en 1949 quien demostró la capacidad de una regla sencilla de actualización para modificar las intensidades de las conexiones establecidas entre neuronas, en lo que se conoce como modelo de aprendizaje de Hebb o Hebbiano.

Alan Turing (1950) ingenió la «máquina desorganizada de tipo B» la cual se basaba en un sistema binario que podía ser entrenado a partir de un procedimiento que designó como «interferencia de entrenamiento». Este proceso permitía hacerlo en una red de neuronas interconectadas a través los cambios oportunos en los «modificadores de conexión» (Russell y Norvig, 2016). A finales de los años cincuenta Frank Rosenblatt amplió la capacidad del aprendizaje de las redes con un modelo de neurona artificial capaz de ajustar los pesos, o señales de entrada, y el umbral de su función de activación, definido como «perceptrón» (1958). En la estructura más sencilla, la primera capa de entradas recibe información del exterior, y unas capas intermedias realizan el trabajo de la red, hasta la última capa de salidas, que transfiere el resultado del trabajo de la red. Pero el problema del XOR de lógica Booleana planteado en 1969 por Marvin Minks y Seymour Papert –inventor del lenguaje de programación Logo– cuestionó las bases de la IA. A pesar de la aparente sencillez, al generalizarse a través de la no separabilidad lineal, resultaba irresoluble a una neurona artificial. Esta evidencia abrió paso a lo que se conoció como el «invierno de la IA». El desarrollo de las redes neuronales se reactivó tras resolver el problema del XOR a través de máquinas de soporte vectorial [«support vector machines» (SVP)], desarrolladas por Vladimir Vapnik y su equipo a comienzos del siglo XXI en AT&T Bell Labs (Nitta, 2003).

La naturaleza había resuelto este problema y la solución era conectar varios perceptrones entre sí para formar redes neuronales (Belda, 2017) que diseñadas por el profesor finlandés Teuvo Kohonen evolucionaron hacia un aprendizaje no supervisado en el que

la propia red va aprendiendo de sus errores a medida que va trabajando. A diferencia de los sistemas anteriores, a través de los algoritmos matemáticos, como los de tipo genético, que están detrás del aprendizaje profundo o «deep learning» (DL,) los sistemas, tras ser sometidos a un entrenamiento son capaces de aprender y generar nuevos conocimientos de manera autónoma a partir de grandes conjuntos de datos sin ser programados por ningún experto humano (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015). Se trata de una clase de técnicas de «machine learning» (ML) que emplean muchas capas de procesamiento no lineal de información, de ahí el adjetivo «deep», a partir de las cuales extraen y transforman sus características, para establecer análisis y lograr una clasificación de patrones (Appenzeller, 2017).

INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Los humanos venimos al mundo sin la programación necesaria para hacer frente a los desafíos que requiere la vida. Pero poseemos la plasticidad necesaria para ir aprendiendo de manera progresiva. Lo hacemos a medida que nuestro organismo se desarrolla e interacciona con su entorno. Algo semejante ha sucedido con el desarrollo de los sistemas que forman parte de la IAG. Uno de sus responsables es Dennis Hassabis, cofundador, director ejecutivo y presidente de DeepMind. Desde pequeño se empeñó en crear alguna máquina que pensara por él. Con el tiempo ingenió el deseo de lograr escribir un algoritmo que fuera capaz de aprender por sí mismo. Tras obtener la licenciatura en ciencias de la computación en la Universidad de Cambridge, en 1995, decidió ampliar su formación con un Doctorado en neurociencia computacional que completó en 1998. Para fundar DeepMind contó con la financiación de un grupo de inversores entre los que figuran Elon Musk y Peter Thiel que apostaron por aquella singular idea de crear un programa capaz de aprender por sí mismo como parte del camino necesario para desarrollar la inteligencia artificial.

En realidad, se trataba de un metaprograma, encargado de escribir el programa para jugar al Go. Pocos años transcurrieron hasta que en 2015 publicaran en la revista *Nature* un artículo que en el que explicaban que el programa había aprendido a superar a los humanos en veintinueve de los cuarenta juegos de Atari. Sin embargo, el sueño de alcanzar el juego del Go quedaba aún a una distancia extensa, que se mantenía muy lejos de poder ser recorrida con los recursos de que disponían. Decidieron vender la compañía a Google a fin de tener la solidez necesaria para crear un nuevo programa con el que resolver el problema que suponía enfrentarse al Go. La jugada número 37 de la segunda partida de AlphaGo contra Lee Sedol rompía todas las reglas establecidas durante siglos entre los maestros de Go. Era un acto de creación. Se trataba de una jugada impropia de un humano que encerraba la sutil belleza del cálculo matemático expresado en una estrategia de juego desconocida hasta entonces. Pero la creatividad transformadora de la que habla Margaret Boden (1995) en *La mente creativa. Mitos y mecanismos*, por medio de la cual se hallan nuevos caminos rompiendo las reglas del sistema, no era algo que poseyera AlphaGo. La estrategia «amashi» con la que Sedol realizó la jugada 78,

en la cuarta partida, alteró las capacidades de cálculo de la máquina para dar la victoria al humano, quizá la última en la historia de nuestra especie, pues las capacidades de aprendizaje, creatividad y adaptación de la máquina se impusieron en la quinta y última partida de aquel esclarecedor torneo.

Las innovaciones de AlphaGo han transformado el juego milenario. Han superado la dificultad y el reto de la creatividad exploratoria que mostró en sus partidas, haciendo que sus nuevas propuestas tengan un valor incalculable. Entre los maestros de Go se habla de que ha desplazado lo que los matemáticos llaman el «máximo local» alcanzado hasta su aparición a una cumbre más alta y desconocida hasta que fue descubierta por AlphaGo. Hay ideas, cambios o innovaciones que suscitan rechazo cuando aparecen, aunque transcurrido el tiempo demuestran ser actos creativos transformadores. En opinión de los expertos, la IA es un instrumento para explorar con mayor profundidad, mayor distancia y con más amplitud que antes, lo que ya preveíamos.

El primer modelo de GPT se lanzó a mediados de 2018 y contaba con 120 millones de parámetros, valores numéricos que podían ajustarse como resultado del entrenamiento. Al parecer se había entrenado con 4 GB de texto, menos información de la que almacenaba una tarjeta de memoria de una cámara de fotos. A partir de ahí, los modelos no pararon de expandirse. Su sucesor, GPT2, vio la luz en febrero de 2019 y contaba con 1.500 millones de parámetros, entrenados sobre la base de ocho millones de páginas web. Luego vino GPT3, elevando más de cien veces la capacidad de su antecesor: 175.000 millones de parámetros para procesar 45 TB de datos. GPT4, presentada en marzo de 2023, quizá con 100 billones y el volumen de datos usado para entrenarlo se estima en el orden de un petabyte, es decir, un poco más de un millón de GB. Ese crecimiento ha sido similar al que han tenido modelos competidores generados por Google, Facebook y otros, dando lugar un nuevo tipo de IA. Son las redes neuronales basadas en Transformers, entrenadas con grandes volúmenes de texto para producir lenguaje. Se los denomina LLM (Large Language Models), es decir, Grandes Modelos de Lenguaje.

NEUROCIENCIA, INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y EDUCACIÓN

Cuando a una serie de técnicas las definimos como parte de la inteligencia artificial, estamos empleando términos zoomorfos con relación a las máquinas como señalaba el profesor Aracil. Es lo que hacemos cuando describimos el «brazo» de un robot o las «alas» de un avión. El problema aparece con el término inteligencia, que en su opinión «debería reservarse para funciones más propias de la especie humana, y más cuando, en este último empleo, aún no acabamos de entender qué es la inteligencia» (Aracil, 2004). También tenemos problemas para analizar las posibilidades de determinar algo propio del sujeto como es, si una máquina posee conciencia de sí, tal como planteó el profesor Arana en su intervención en este ciclo.

Es posible que Santiago Ramón y Cajal tenga razón cuando afirma que, si en nosotros hay algo «verdaderamente divino», eso es la voluntad. Mantenía que por ella «afirmamos la personalidad, templamos el carácter, desafiamos la adversidad, corri-

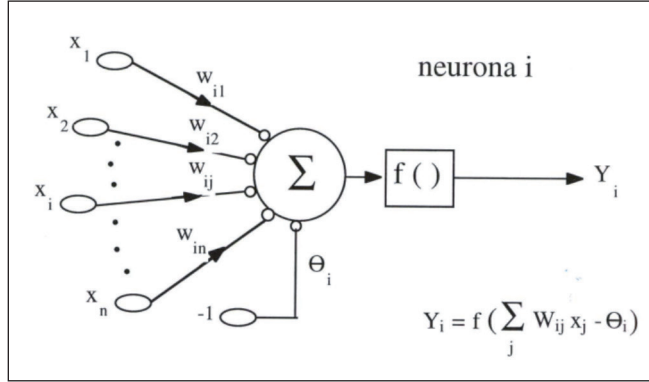
mos el cerebro y nos superamos diariamente» (2007, p. 143). Si consideramos que la voluntad es un rasgo identificador de la humanidad, es posible que la IA carezca aún de la facultad de decidir y ordenar su propia conducta, de actuar por libre albedrío o por libre determinación de su voluntad. No obstante, quizá sea necesario insistir en los problemas de libertad y autonomía que comienzan a modelar nuestro horizonte cognitivo. Todos ellos afectan a la educación, tanto a nivel de contenidos como de capacidades y así la adaptación a los sistemas recomendadores, el engagement a las redes o a sistemas de generación de contenidos, o el efecto Google, entre otros fenómenos, podrían estar detrás de algunas realidades detectadas en evaluaciones internacionales a gran escala, como los proporcionados por el Programa para la Evaluación Internacional de Alumnos más conocido como PISA, por sus siglas en inglés. Sus resultados sugieren una relación negativa entre el uso excesivo de las TIC y el rendimiento de los alumnos.

¿Qué sucedería si hubiera que explicar que la modernidad, que la vanguardia de la educación dista de depender tan solo del nivel de los elementos técnicos empleados en ella? Tendríamos que dar cuenta de los motivos que nos conducen a ello. El primero es la necesidad de basar los procesos de enseñanza y aprendizaje en evidencias y quizá trasladarlas a convenciones como pudimos vislumbrar en el caso del derecho y la matemática en la exposición de María de Paz. La teoría neuronal, dio paso al estudio de su fisiología, de sus funciones, la anatomía, sus relaciones funcionales básicas, o la tipología de sinapsis. La idea de Donald Hebb (1949) es esencial para comprender la plasticidad sináptica y los procesos de aprendizaje humanos. Resumida en una frase sencilla: «las neuronas que disparan juntas se conectan». De manera que las teorías del aprendizaje por refuerzo se apresuraron a desvelar la posible forma en que las conexiones neuronales alteraban la configuración cerebral en base a la plasticidad que lo caracteriza.

Hay algo que une ambos mundos, en este caso, el de la inteligencia artificial, y en concreto los sistemas de aprendizaje de las máquinas, y los de la inteligencia humana. Este afán por unir ambos mundos hace que las teorías de la inteligencia humana traten de determinar el algoritmo que la rige para ser emulado en la artificial. Veamos lo más sencillo, del funcionamiento neuronal, el proceso de despolarización es necesario para que la célula nerviosa desencadene un potencial de acción unidireccional que provoca en el terminal axónico la liberación de transmisores químicos al espacio sináptico, desencadenando una posible despolarización en la célula receptora, tal como queda detallado en estas gráficas. La réplica artificial de una célula neuronal requiere establecer un modelo de que permita construir un sistema de procesamiento de información semejante al que se produce en el cerebro humano. Tal como pueden apreciar en la representación gráfica, cada entrada está emulada por una dendrita con un peso específico en la suma total, que tiene un umbral o límite para mantenerse inhibida si no se supera o para emitir un valor de salida.

Frank Roseblatt, en 1957 diseñó las primeras redes neuronales artificiales, distribuyendo las entradas entre las distintas neuronas y añadiendo distintas capas a su conformación, que aplicó a la compleja construcción del Mark I Perceptron, sentando las bases de los procesos que definen el Machine learning, que caracterizan las técnicas de IA. Esas permiten aprender a las máquinas. Lo que en algún momento ocupa a la

FIGURA 1
MODELO DE NEURONA ARTIFICIAL TIPO MCCULLOCH-PITTS



educación, es hallar algún procedimiento que permita comprender la esencia de estos procesos de aprendizaje artificial. Investigando en esta área, hallé una referencia a una máquina capaz de aprender jugar y ganar las partidas de tres en raya. Se trata de una creación de Donald Michie (1961) fabricada con cajas de cerilla y cuentas de colores, llamada MENACE por sus siglas en inglés, Matchbox Educable Noughts and Crosses Engine. Era una computadora mecánica construida con 304 cajas que, mediante aprendizaje supervisado, al jugar, adquiría la capacidad de ganar. La estrategia era recompensar las estrategias ganadoras y eliminar las perdidas. Pese a lo limitado del juego, resulta un ejemplo sencillo e inspirador para la alfabetización digital en materia de inteligencia artificial. En la obra de Martin Gardner es posible hallar otros ejemplos simples de máquinas que aprenden desde los que es fácil acceder a esta área (1962, pp. 138-142).

Volvamos a la cognición humana. En una obra reciente, Jeff Hawkins (2024) describe el cerebro como un sistema de memoria que almacena y reproduce experiencias para ayudarnos a predecir lo que sucederá a continuación. Mantiene que, en contra de la idea de que el cerebro es un sistema complicado, las capacidades relacionadas con la inteligencia, como la percepción visual, el lenguaje, la música, las matemáticas, la ciencia y la ingeniería dependen de un algoritmo único y relativamente simple que los modelos de inteligencia artificial podrán emular muy pronto. En este momento, los trabajos sobre esta materia indican que los modelos matemáticos del cerebro constituyen un objeto de investigación relevante (Skinner, 2024) y funcional (Wheeler, et al. 2024). En buena medida porque los sistemas de IA pueden emular las capacidades cognitivas y perceptivas de los sistemas biológicos, incluso la toma de decisiones. Pero, además, la IA se está empleado cada vez más como herramienta para la investigación en neurociencia y está transformando nuestra comprensión de las funciones cerebrales (Hassabis, et al. 2017). En particular, el aprendizaje profundo se ha utilizado para modelar la forma en que las capas convolucionales y las conexiones recurrentes en la corteza cerebral controlan funciones importantes, incluido el procesamiento visual, la memoria y el control motor. Aunque la literatura sobre este tema es extensa y apasionante, sabemos que los avances que se han producido antes de la eclosión de los sistemas de generación de contenidos

sobre todo han sido en modelos de memoria de trabajo de IA, procesamiento visual de IA, o análisis de IA de grandes conjuntos de datos de neurociencia (Macpherson, et al., 2021).

ANTES DE NOVIEMBRE DE 2022

En el ámbito de ciencias de la educación, el examen de grandes volúmenes de datos vinculado al proceso de minería de datos educativos o «educational data minning» (EDM) se aplica a la analítica de aprendizaje o «learning analytics» (LA), a partir del examen de «logs» o grabaciones secuenciales de un archivo en una base de datos, para promover nuevos descubrimientos y avances mediante el uso de la información almacenada. Las herramientas basadas en inteligencia artificial pueden proporcionar recomendaciones individualizadas para mejorar el éxito de los estudiantes (Weir, 2021). Del mismo modo, los chatbots pueden proporcionar servicios de apoyo académico (Yao, et al., 2015) y específicos de apoyo a los estudiantes. Una parte de estas herramientas se orientan a reforzar los sistemas de tutores inteligentes virtuales (Du Boulay, 2016) o «intelligent tutoring systems» (ITS).

Una perspectiva que formaba parte de la transformación del modelo de educación donde existe una demanda creciente de aprendizajes. Parte de sus contenidos son facilitados a través de algoritmos que analizan el contenido de redes sociales en lo que se conoce como «social net analysis» (SNA). No cabe duda de que se trata de una potente herramienta al servicio de intereses particulares de diversa índole y alcance. Pueden partir de un plano de intereses comerciales o circunscribirse a estrategias híbridas, encubiertas tras «boots» o «granjas de troles» encargados de generar «fake news» (noticias falsas) y desinformación a fin de lograr que los adversarios acaben actuando de la manera que más interesa a la potencia rival que promueve esta estrategia. Baste recordar que la denominada doctrina Gerasimov atribuida al jefe de Estado Mayor de las Fuerzas Armadas Rusas, por el periodista Mark Galeotti, a partir del contenido del discurso que el militar ruso pronunció en marzo de 2013 en la Academia Rusa de Ciencias Militares. Lo paradójico es que en su contenido trataba de dar cuenta de las tácticas y estrategias con las que occidente participa en los conflictos (Trellevik & Cieśla, 2025).

Junto a ellos aparece el «modelo-e» de enseñanza y aprendizaje a distancia o «distance eTeaching and eLearning» (DTL) adaptada a los nativos digitales de las denominadas «sociedades inteligentes». Los sistemas DTL necesitan de la IA en el análisis y la gestión de datos, la interactividad del aprendiz con el sistema, la cognición del sistema, la planificación de recursos, así como su agilidad y escalabilidad (Mehmood, et al., 2017). También en la gestión de sistemas educativos y centros de enseñanza, y en la planificación y desarrollo de programas educativos como desarrollo de las políticas educativas. Dentro de ellas la sistematización y el análisis de grandes volúmenes de registros forma parte de la «minería de datos» y constituyen un requisito necesario para facilitar su manejo por sistemas de IA (Williamson, 2018). Estas eran algunas de las realidades evolutivas anteriores a la pandemia que, promovían la adaptación de la educación al

entorno de la industria 4.0. como un elemento clave en la transición productiva liderada entonces por las principales economías occidentales (Kaplan & Haenlein, 2019).

La IA puede proporcionar una ventaja competitiva en las instituciones de educación superior en los procesos de enseñanza y el aprendizaje. Puede aplicarse a la investigación o a la enseñanza en áreas específicas, como la biosanitaria, sobre la que se centran muchas de las investigaciones. Otra área de gran interés es la valoración de las capacidades de la IAG para la calificación de trabajos y pruebas escritas. Es posible aplicarla también para fortalecer la permanencia en los estudios y prever hipotéticos abandonos (Arqawi, et al., 2022) en base a modelos que intentan predecir posibles elementos de riesgo (Bilquise, et al., 2022).

OpenAI - Chat GPT 3.0

Una búsqueda⁴ en Scopus de artículos y trabajos sobre IA en educación, limitado a ChatGPT arroja un resultado de 158 registros para 2023 y 99 para 2024. Dado que la base de datos facilita distintas posibilidades de análisis, la clasificación de estos documentos para las diferentes áreas de estudio presenta la distribución que muestra la Figura 2. Una investigación reciente dedicada a analizar los trabajos publicados en Scopus sobre Chat GPT y educación analizó 82 publicaciones, concluyendo que tenían como objeto principal de estudio: la escritura académica, el potencial y los beneficios de la inteligencia artificial (IA), el uso de ChatGPT en la investigación, y el estudio de las mejores prácticas educativas de la IA (Zheltukhina, et al., 2024). Los resultados del análisis de palabras clave mostraron cinco grupos de estudios sobre ChatGPT en educación. Estaban relacionados con su empleo en la formación en puericultura y enfermería y en los modelos LLM en educación médica. En consecuencia, el área de formación biosanitaria era el objeto de la mayor parte de estudios. El resto de los núcleos se centraban en las dimensiones éticas de la IAG y los efectos de ChatGPT en los resultados educativos.

Se ha debatido sobre el papel de la IAG y el que desempeñan distintas instituciones en la alfabetización digital como medio para facilitar el acceso y manejo de la información a través de los sistemas de generación de contenido. Por otra parte, el estudio de futuro sobre la inteligencia artificial en educación (IAEd) ha incorporado como temas relevantes la legislación sobre protección de datos y desde el lanzamiento de ChatGPT, una creciente preocupación sobre la evaluación y la importancia de contar con una participación de los estudiantes en la integración de la IA en la educación.

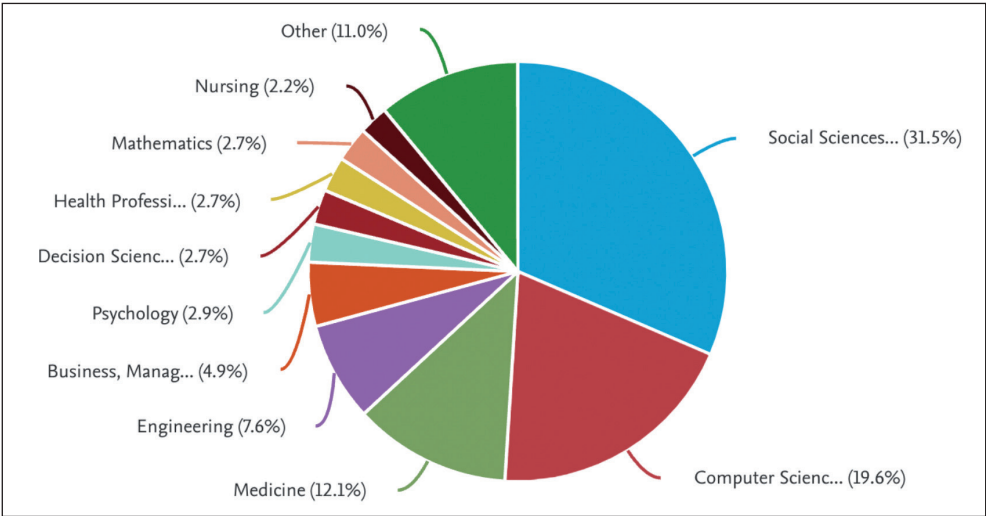
En cuanto a los docentes, pese al breve lapso transcurrido desde su eclosión, las encuestas y trabajos de campo se han centrado, tal como hemos comentado, en las ciencias biomédicas. Sus resultados indican que hay una relación directa entre la importancia que perciben los profesores y el conocimiento que poseen sobre de la IA. Por otra parte,

4. TITLE-ABS-KEY ("AI" "Generative" "Artificial Intelligence" "Education") AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "ChatGPT"))

https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0238_ES.html

son conscientes de los posibles cambios que prevén en los contenidos, la pedagogía y los modelos de enseñanza-aprendizaje, así como la evaluación. Por su parte, los estudiantes se preocupan de que la formación les dote de competencias para incorporarse al terreno laboral futuro. Hay plena coincidencia con los docentes en la necesidad de que se adopten medidas para la alfabetización en IAG, se transformen los modelos docentes, unidos a pedagogías innovadoras y nuevas formas de evaluación.

FIGURA 2
RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA EN SCOPUS:
TITLE-ABS-KEY (“AI” “Generative” “Artificial Intelligence” “Education”) AND ((LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, _”ChatGPT”))
Fuente: Elaboración propia a partir de Scopus.



La hipótesis que manejan algunos investigadores es que las técnicas de IAG proporcionan un entorno personal que podría motivar el aprendizaje autorregulado de manera más eficiente que otro tipo de procedimientos. Sin embargo, la contrastación de esta hipótesis parece indicar que el impacto de ChatGPT en la motivación y la satisfacción de las necesidades de los estudiantes queda lejos de alcanzar las expectativas previstas. Para contrastarla, se tomó como base la teoría de la autodeterminación y sus tres fases (previsión, desempeño y autorreflexión). Se trata de una de las teorías que explican la motivación y el proceso de aprendizaje autorregulado (Chiu, 2024a). A ellas se unen la teoría de la atribución, la de metas, o la teoría social cognitiva (Chiu, 2024b). Las investigaciones parecen indicar que la curiosidad por sí sola como medio de motivación para el acceso a la información a través de IAG es insuficiente e incapaz de alterar las capacidades personales y mejorar los aprendizajes (Gao et al., 2024a, 2024b).

En cuanto a las tendencias en los temas de investigación han sido vinculados a términos que actúan de descriptores como ChatGPT, chatbots, IA, IAG, aprendizaje automático, reconocimiento de emociones, LLM, redes neuronales convolucionales y teoría de decisiones (Ivanova, Gosseck & Holotescu, 2024). En lo relativo a la experiencia de formación inicial de profesores en el área STEM –que como saben corresponde a las siglas de los términos Science, Technology, Engineering, Mathematics– a partir de dos grupos experimentales de una clase formada, indica que los maestros en formación que utilizaron ChatGPT mostraron una mayor sistematicidad en el pensamiento crítico, eficiencia en la finalización de tareas y experimentaron una carga cognitiva más baja. En tanto que los que fueron emparejados con maestros en activo superaron ligeramente a aquellos que emplearon ChatGPT en la propuesta final de diseño de enseñanza (Li, et al., 2024). Pero también se preocupa que los estudiantes hagan mal uso de dichas herramientas; por lo tanto, las universidades han adoptado diferentes medidas para evitar el uso indebido. Algunas instituciones han prohibido por completo este tipo de herramientas, mientras que otras están revisando y actualizando sus políticas (Sullivan, Kelly & McLaughlan, 2023).

UNIÓN EUROPEA

Como parte de su estrategia digital, la Unión Europea elaboró la Estrategia Europea para la IA presentada en abril de 2018 que buscaba, entre otros objetivos, desarrollar habilidades necesarias para trabajar en IA y mejorar las calificaciones profesionales de los trabajadores para adaptarlas a la transformación de esta tecnología. En la estrategia se incluía la Acción 3, que pretendía establecer y respaldar redes de universidades y centros de educación superior pioneros, para atraer a los mejores académicos y científicos y ofrecer programas de máster en IA que se sitúen a la vanguardia mundial. En 2020 publicó el *Libro Blanco sobre la inteligencia artificial - un enfoque europeo orientado a la excelencia y la confianza* en el que se incluía una actualización del *Plan de acción sobre educación digital* y debía contribuir a hacer un mejor uso de los datos y de las tecnologías basadas en IA.

La UE ha sido pionera en regular la IA para garantizar mejores condiciones de desarrollo y uso de esta tecnología. En abril de 2021, la Comisión propuso el primer marco regulador, para que aquellos sistemas de IA que pudieran utilizarse en distintas áreas se sometieran a análisis y clasificación en relación con el riesgo que comportaban para los usuarios. Los mayores niveles de peligro conllevaban una mayor regulación. La prioridad del Parlamento era garantizar que los sistemas de IA utilizados en la UE fueran seguros, transparentes, trazables, no discriminatorios y respetuosos con el medio ambiente. Los sistemas de IA debían ser supervisados por personas para evitar resultados perjudiciales. El Parlamento también era partidario de establecer una definición uniforme y tecnológicamente neutra de la IA que pudiera aplicarse a futuros sistemas. El 19 de mayo de 2021 aprobó una resolución sobre la inteligencia artificial en la educación, la cultura y el sector audiovisual⁵ que perseguía afianzar derechos fundamentales

como la libertad de expresión e información, la diversidad cultural y los derechos de propiedad intelectual. En diciembre de 2022 el Consejo de la UE adoptó su posición común sobre la Ley de Inteligencia Artificial o AI Act centrada en la seguridad y los derechos fundamentales. En diciembre de 2023 se alcanzó un acuerdo provisional entre el Parlamento y el Consejo para adoptar la IA Act incluyendo prohibiciones a los sistemas de «riesgo inaceptable». Los sistemas de IA de «riesgo inaceptable» son los que se consideran una amenaza para las personas y serán prohibidos. En estos se incluye la manipulación cognitiva, sistemas de puntuación social o de identificación biométrica. Entre los sistemas de IA de alto riesgo están los de educación y formación profesional, que debían registrarse en una base de datos de la UE, e incluían los relativos a empleo, gestión de trabajadores y acceso al autoempleo, o el acceso y disfrute de servicios privados esenciales y prestaciones públicas. Todos los sistemas de IA de alto riesgo serán evaluados antes de su comercialización y a lo largo de su ciclo de vida. Aunque la IAG no se considera de alto riesgo, tendrá que cumplir requisitos de transparencia y con la legislación de la UE en materia de derechos de autor, revelando que el contenido ha sido generado por IA. Los modelos de IA de uso general que cuenten con un alto impacto y que pudieran plantear un riesgo sistémico, tendrán que someterse a evaluaciones exhaustivas e informar a la Comisión de cualquier incidente grave. En el Anexo III, dedicado a los Sistemas de IA de Alto Riesgo, el apartado dedicado a educación y formación profesional incluye los sistemas de IA destinados a determinar el acceso o asignación de personas físicas a los centros de educación y formación profesional y a evaluar a los participantes en pruebas necesarias para acceder a centros de educación.

En Estados Unidos, el presidente Joe Biden firmó en 2023 la Orden Ejecutiva por una Inteligencia Artificial Segura y Confiable (Safe, Secure, and Trustworthy Artificial Intelligence), como primera herramienta de acción en la Administración para promover la inclusión de la IAG en el sector público. Por otra parte, se han iniciado proyectos europeos de investigación sobre IA en educación para definir políticas educativas para el empleo adecuado en las aulas y fortalecer la formación de docentes con relación al dominio de estas técnicas. Además, comienzan a impulsarse distintas iniciativas de formación sobre aplicaciones de IA, oportunidades, implicaciones éticas y sociales, y aprendizaje personalizado. De igual modo, hay un creciente interés por elaborar un marco teórico, discutir sobre desafíos y oportunidades y compartir buenas prácticas. Quizá, como ha sucedido con otras innovaciones técnicas, los sistemas educativos puedan sacar provecho de las capacidades del área de IA. Sobre todo, para mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje contando con la formación adecuada de los profesionales de la educación y para formar a los estudiantes en un medio cada vez más condicionado por la evolución técnica aplicada a la información.

La Ley de AI de la UE se publicó en el Diario Oficial de la Unión Europea el 12 de julio de 2024 y establece obligaciones para proveedores y usuarios en función del nivel de riesgo. En Europa, la implementación de la inteligencia artificial requiere medidas de control previas, siendo el enfoque *ex ante* el más adecuado para prevenir completamente los posibles daños que ciertos sistemas de IA puedan ocasionar. La obtención de licencias constituye una herramienta fundamental para esta regulación preventiva, aplicable

especialmente en dominios de alto riesgo, tal como demandan tanto los responsables políticos como destacados desarrolladores y comercializadores de IA, quienes abogan por establecer acreditaciones específicas para distintos ámbitos de aplicación. De forma paralela, diversos estudios están identificando los requisitos necesarios para validar el uso responsable de estas tecnologías. Considerando los riesgos documentados y potenciales de los sistemas de IA de alto riesgo, resulta imprescindible que los organismos reguladores exijan a las empresas demostrar el cumplimiento de estándares claros en materia de seguridad, no discriminación, precisión, idoneidad y legitimidad antes de su puesta en funcionamiento. Este modelo ex ante obligaría a los desarrolladores a acreditar que sus tecnologías carecen de sesgos discriminatorios, no son manipuladoras, injustas, inexactas o ilegítimas en sus fundamentos y aplicaciones. Aunque el Reglamento General de Protección de Datos ofrece pautas relevantes para la regulación ex post, es la Ley de IA la que representa el primer esfuerzo normativo hacia un sistema de licencias previas en sectores sensibles como la educación, proponiéndose para ello reforzar las garantías mediante la ampliación de su alcance normativo, el desarrollo de contenidos sustantivos más robustos y procesos de justificación previa más transparentes (Malgieri, 2024).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Leonardo Torres Quevedo mantenía que la misión de la enseñanza ha de consistir en educar la inteligencia, y para ello consideraba preciso que los estudiantes entendieran las ideas fundamentales, se familiarizaran con ellas y se acostumbraran a manejarlas; «que se las asimilen —decía— y las tengan como ciencia propia, adquirida por su propio esfuerzo». Para formar al ingeniero había que destacar los principios fundamentales, explicar, «en forma elemental, las teorías científicas con la amplitud necesaria para estudiar los problemas corrientes de la profesión y hacer que los alumnos se apliquen, hasta que se familiaricen con ellas» (1917).

La información necesita de la narración para generar un continuo temporal, una historia. En palabras de Marcus du Sautoy, lo que nos hace humanos es la capacidad de compartir por medio de relatos nuestro mundo consciente, algo que ninguna especie había sido capaz de conseguir. Esto parece que ha sido alcanzado, basta trasladar un «prompt», en realidad una entrada de texto proporcionada a los programas generadores de contenido solicitando un relato, una imagen o una composición para entenderlo. El profesor de Oxford cerraba su obra *Programados para crear* indicando que es posible comenzar a «descifrar su código fuente y sentir lo que significa ser una máquina», a partir de sus producciones creativas (2020, p. 372). El desarrollo de lo que se conoce como *prompt engineering* que identifica la habilidad profesional para optimizar IAG es indicativo de que el arte de formular buenas preguntas es esencial para obtener un conocimiento relevante. Una realidad que aplicada a las máquinas apenas difiere de lo que para los humanos ha representado el método Socrático que, para hallar la verdad crítica, busca respuestas precisas empleando como medio el diálogo basado en preguntas re-

flexivas. Un diseñador de conocimiento, para Daniel Innerarity es alguien que se dedica a hallar las preguntas correctas, pues donde mejor se manifiesta la creatividad es en el descubrimiento y la formulación de problemas, por lo que la creatividad se manifiesta como una gestión del desconocimiento (2022, pp. 58-61).

Un hecho que enlaza con la necesidad de verificar, contrastar o validar, por emplear alguno de los términos aplicados a la idea de hallar el nivel de fiabilidad de las respuestas obtenidas a través de las máquinas capaces de generar respuestas a preguntas humanas. Existe un fenómeno que se conoce como «alucinaciones de IA» que afecta a los modelos LLM cuando perciben patrones imperceptibles a humanos creando resultados que carecen de sentido o son inexactos con consecuencias significativas si alcanzan a ser aceptadas o aplicadas. Esto requiere la intervención humana para autenticar los resultados, algo que ya se producía en la Grecia helenística cuando la biblioteca creada en el Museion fundado en 280 a. C. por Ptolomeo I Soter en la ciudad de Alejandría se ocupó de incorporar obras escritas de toda procedencia geográfica, comenzaron a crearse manuscritos espurios apócrifos, muchos de los cuales fueron adquiridos, originando una nueva labor de recensión y de autenticación, que pasó a convertirse en una actividad propia de la que conocemos ahora como la Biblioteca de Alejandría (McLeod, 2004, Canfora, 1998).

Un problema de la enseñanza es que a veces transmitimos tan solo información, parcial y sesgada, lo que no transmite sentido. Originariamente sentido significa dirección. De manera que en palabras de Han, «hoy estamos más informados que nunca, pero andamos totalmente desorientados» (Han, 2023). Pues bien, el final de esta historia, en Europa, es que, tras sentar las bases de entes capaces de superar la inteligencia humana en procesos de cálculo precisos, sus representantes políticos han alcanzado a establecer unas bases regulatorias de su aplicación y desarrollo. En educación queda mucho por hacer, pero sabemos que es necesario que las aplicaciones cumplan unos requisitos precisos. Además, es oportuno que respeten las capacidades cognitivas y humanas, entre las que Martha Nussbaum incluye la vida, la salud, la integridad física, la capacidad de sentir, imaginar, razonar, de tener sentimientos y emociones, una razón práctica, de participar en la vida social, de convivir con otras especies, de disfrutar del juego y el ocio, así como de ser capaz de tener control sobre las decisiones de nuestra propia vida (2012).

REFERENCIAS

- APPENZELLER, T. (2017). The scientist's apprentice. *Science*, 357(6346), 16-17. <https://doi.org/10.1126/science.357.6346.16>
- ARACIL SANTOJA, JAVIER (2004). La información y las máquinas, *Historia Actual Online*, 4, 143-152. Conferencia pronunciada en el Ateneo de Sevilla el 20 de febrero de 2001 y publicada en las *Memorias de la Real Academia Sevillana de Ciencias*, vol. 4.
- ARACIL, J. (2017). *Ingeniería. La forja de un mundo artificial*. Madrid: Real Academia de Ingeniería.
- ARQAWI, S.M., ZITAWI, E.A., RABAYA, A.H., ABUNASSER, B.S. & ABU-NASER, S.S. (2022). Predicting University Student Retention Using Artificial Intelligence. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 13.

- BAIDOO-ANU, D.; ANSAH, L. (2023). Education in the Era of Generative Artificial Intelligence (AI): Understanding the Potential Benefits of ChatGPT in *Promoting Teaching and Learning*. *J. AI* 7, 52-62.
- BELDA REIG, IGNASI (2017). *La inteligencia artificial. De los circuitos al conocimiento*. Barcelona: RBA.
- BILQUISE, G.; SHAALAN, K. (2022). AI-based Academic Advising Framework: A Knowledge Management perspective. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* 13, 193–203
- BODEN, M. A. (2017). *Inteligencia artificial*. Madrid: Turner.
- BODEN, MARGARETH (1995). *La mente creativa*. Barcelona: Gedisa.
- BUABBAS, A.J.; MISKIN, B.; ALNAQI, A.A.; AYED, A.K.; SHEHAB, A.A.; SYED-ABDUL, S.; UDDIN, M. (2023). Investigating Students’ Perceptions towards Artificial Intelligence in Medical Education. *Healthcare* 11, 1298.
- CANFORA, L. (1998). *La biblioteca desaparecida*, Gijón: Trea.
- CHAN, C.K.Y. (2023). A comprehensive AI policy education framework for university teaching and learning. *Int. J. Educ. Technol. High. Educ.* 20, 38.
- CHIU, T.K.F. (2024a). A classification tool to foster self-regulated learning with generative artificial intelligence by applying self-determination theory: a case of ChatGPT. *Educational Technology Research and Development*, <https://doi.org/10.1007/s11423-024-10366-w>
- CHIU, T.K.F. (2024b). Future research recommendations for transforming higher education with generative AI. *Computers and Education: Artificial Intelligence* 6, <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100197>
- COOPER, G. (2023). Examining science education in ChatGPT: An exploratory study of generative artificial intelligence. *J. Sci. Educ. Technol.* 32, 444-452.
- DU BOULAY, B. (2016). Artificial intelligence as an effective classroom assistant. *IEEE Intell. Syst.*, 31, 76-81.
- Du Sautoy, Marcus (2020). *Programados para crear. Cómo está aprendiendo a escribir, pintar y pensar la inteligencia artificial*. Barcelona: Acantilado.
- GAO, L., LÓPEZ-PÉREZ, M. E., MELERO-POLO, I., & TRIFU, A. (2024). Ask ChatGPT first! *Transforming learning experiences in the age of artificial intelligence. Studies in Higher Education*, <https://doi.org/10.1080/03075079.2024.2323571>-
- GAO, Z., CHEAH, J.-H., LIM, X.-J., & LUO, X. (2024). Enhancing academic performance of business students using generative AI: An interactive-constructive-active-passive (ICAP) self-determination perspective. *International Journal of Management Education* 22(2), <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2024.100958>.
- GARDNER, MARTIN (1962). How to build a game-learning machine and then teach it to play and to win. *Scientific American*, marzo, 1962, pp. 138-144.
- HAN, BYUNG-CHUL (2023). *La crisis de la narración*. Barcelona: Herder.
- HASSABIS, D., KUMARAN, D., SUMMERFIELD, C., BOTVINICK, M. (2017). Neuroscience inspired Artificial Intelligence. *Neuron* 19;95(2), 245-258, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.06.011>
- HSU, Y.-C.; CHING, Y.-H. (2023). Generative Artificial Intelligence in Education, Part One: The *Dynamic Frontier*. *TechTrends* 67, 603-607
- INNERARITY, DANIEL (2022). *La sociedad del desconocimiento*. Barcelona: Galaxia Gutenberg.
- IVANOVA, M., GROSSECK, G., & HOLOTESCU, C. (2024). Unveiling Insights: A Bibliometric Analysis of Artificial Intelligence in Teaching. *Informatics* 11(1). <https://doi.org/10.3390/informatics11010010>
- KANT, IMMANUEL (1803). *Über Pädagogik*. Königsberg.
- LECUN, Y., BENGIO, Y. & HINTON, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521, 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- MACLEOD, R. (ed.) (2004). *The Library of Alexandria: Centre of Learning in the Ancient World*. London: I.B. Tauris.

- MACPHERSON, T., CHURCHLAND, A., SEJNOWSKI, T., DICARLO, J., KAMITANI, Y., TAKAHASHI, H., & HIKIDA, T. (2021). Natural and Artificial Intelligence: A brief introduction to the interplay between AI and neuroscience research. *Neural Netw.* 144:603-613, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.09.018>.
- MALGIERI, G., & PASQUALE, F. (2024). Licensing high-risk artificial intelligence: Toward ex ante justification for a disruptive technology. *Computer Law and Security Review* 52. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2023.105899>
- McCARTHY, J., MINSKY, M. L., ROCHESTER, N., & SHANNON, C.E. (1955). A proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence. August 31, 1955, <http://jmc.stanford.edu/articles/dartmouth/dartmouth.pdf>
- MOORHOUSE, B.L., YEO, M.A., & WAN, Y. (2023). Generative AI tools and assessment: Guidelines of the world's top-ranking universities. *Comput. Educ. Open* 5, 100151.
- NEWELL, A., & SIMON, H.A. (1974). Simulación del pensamiento humano. *Teorema: International Journal of Philosophy*, 4(3), 335-378.
- NITTA, T. (2003). Solving the XOR problem and the detection of symmetry using a single complex-valued neuron. *Neural networks: the official journal of the International Neural Network Society* 16(8), 1101-1105, [http://doi.org/10.1016/S0893-6080\(03\)00168-0](http://doi.org/10.1016/S0893-6080(03)00168-0)
- NUSSBAUM, MARTHA (2012). *Crear capacidades. Propuestas para el desarrollo humano*. Barcelona: Paidós.
- PÉREZ, M. DE, & SANCHO, F. (2003). *Máquinas moleculares basadas en ADN*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- QADIR, J. (2023). Engineering Education in the Era of ChatGPT: Promise and Pitfalls of Generative AI for Education. In *Proceedings of the 2023 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Kuwait, 1-4 May 2023, 1-9.
- RAMÓN Y CAJAL, SANTIAGO (2007). *Obra literaria*. Charlas de café. Cuentos de vacaciones. Zaragoza: Gobierno de Aragón. [Capítulo VIII. Pensamientos de tendencia pedagógica y educativa].
- RUIZ-ROJAS, L.I., ACOSTA-VARGAS, P., DE-MORETA-LLOVET, J. & GONZALEZ-RODRIGUEZ, M. (2023). Empowering Education with Generative Artificial Intelligence Tools: Approach with an Instructional Design Matrix. *Sustainability* 15, 11524.
- RUSSELL, B., & WHITEHEAD, A. N. (1910) *Principia Mathematica*. Cambridge: University Press
- RUSSELL, S., & NORVIG, P. (2016). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. London: Pearson.
- SKINNER, FRANCES (2024). Building a mathematical model of the brain. *Elife* 28;13: e96231, <https://doi.org/10.7554/eLife.96231>.
- SU, J.; YANG, W. (2023). Unlocking the Power of ChatGPT: A Framework for Applying Generative AI in Education. *ECNU Rev. Educ.* 6, 355-366.
- SULLIVAN, M.; KELLY, A.; MCLAUGHLAN, P. (2023). ChatGPT in higher education: Considerations for academic integrity and student learning. *J. Appl. Learn. Teach.* 6, 31-40.
- SWIFT, JONATHAN (2019). *Los viajes de Gulliver*. Madrid: Alianza Editorial.
- TORRES QUEVEDO, LEONARDO (1917). Enseñanza de la Ingeniería en España. En: Torres Quevedo, Leonardo. *Mis inventos y otras páginas de vulgarización*. Madrid: Hesperia, 5-42.
- TRELLEVIK, AMUND & CIEŚLA, WOJCIECH (2024). La injerencia rusa dispara las alarmas en la UE a las puertas de las elecciones. *Investigate Europe*, 26 marzo 2024, <https://www.investigate-europe.eu/es/posts/russia-interference-europe-eu-elections-2024>
- TURING, A. (1950). Computing Machinery and Intelligence. *Mind, New Series*, 59(236) (Oct. 1960), 433-460.
- WEIR, T. (2021). 3 Ways to Use AI to Improve Student Success during Online Learning, *EdTech. Focus On Higher Education*, 06.04. 2023 <https://edtechmagazine.com/higher/article/2021/04/3-ways-use-ai-improve-student-success-during-online-learning>

- WHEELER, D. W., KOPSICK, J.D., SUTTON, N., TECUATL, C., KOMENDANTOV, A.O., NADELLA, K., ASCOLI, G.A. (2024). Hippocampome.org 2.0 is a knowledge base enabling data-driven spiking neural network simulations of rodent hippocampal circuits, *eLife* 12:RP90597 <https://doi.org/10.7554/eLife.90597.3>
- WILL, M. (2023). With ChatGPT, Teachers Can Plan Lessons, Write Emails, and More. What's the Catch? *Educ. Week* 42, 7.
- WILLIAMSON, BEN. (2018). *Big data en educación*. Madrid: Ediciones Morata
- YAO, F.; ZHANG, C., CHEN, W. (2015). Smart talking robot Xiaotu: Participatory library service based on artificial intelligence, *Library Hi Tech* 33(2), <https://www.doi.org/10.1108/LHT-02-2015-0010>
- ZHAI, X., NYAABA, M., & MA, W. (2024). Can Generative AI and ChatGPT Outperform Humans on Cognitive-Demanding Problem-Solving Tasks in Science? *Science and Education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-024-00496-1>
- ZHELTUKHINA, M.R., SERGEEVA, O.V., MASALIMOVA, A.R., BUDKEVICH, R.L., KOSARENKO, N.N., & NESTEROV, G V. (2024). A bibliometric analysis of publications on ChatGPT in education: Research patterns and topics. *Online Journal of Communication and Media Technologies*, 14(1). <https://doi.org/10.30935/ojcm/14103>

FRITZ HABER IMPUTADO POR MÚLTIPLES HOMICIDIOS Y UN SUICIDIO

*Conferencia pronunciada por el
profesor D. Antonio Roselló Segado,
el día 13 de mayo de 2024*



De las vidas de científicos, la de Fritz Haber cuenta entre las apasionantes. Desde unos inicios muy meritorios pero convencionales Haber llegó a benefactor de la Humanidad por producir amoníaco con el nitrógeno del aire. Reincidió en fracasos conyugales, finalizando el primero con el suicidio de la doctora Clara Immerwahr, una pionera. Transformó el uso bélico de los gases, innovación por la que los vencedores de la Gran Guerra amagaron con juzgarlo. Por ser desafecto y no ser ario el primer gobierno nazi lo forzó a dejar su Instituto de Química Física y Electroquímica, y después Alemania, arrebatándole investigación y patria y convirtiéndolo en judío errante hasta su muerte. En la segunda postguerra mundial lo rehabilitaron. Hogaño han vuelto a condenarlo por envenenador contumaz y mal marido.

Sobre la talla de Haber como científico, organizador de ciencia y transmisor de ésta a la industria no cabe controversia, ni puede haberla sobre un ángel de la luz que remediaba hambrunas convirtiendo *“las piedras en panes”*. De modo que para conciliar esa bondad con su vileza se enfatiza la dualidad de su carácter y la ambigüedad de su legado; y para ilustrar la presunta dicotomía moral de sus empeños se recurre al Dr Jekyll y Mr Hyde. No obstante, resulta más popular como ángel de las tinieblas y así se ha propagado el retrato de un hombre ambicioso, autoritario, oportunista, egotista e insensible; un engendro de soberbia; un belicista que menospreció las vidas de sus semejantes para sacrificarlas a la nación alemana. Sin embargo, Fritz Haber había sido durante décadas ejemplo del *“científico caballero, cuya recompensa se medía en términos de honor, servicio, prestigio, respeto y fama”*; y un patriota al que cuadraba el epitafio que compuso para sí: *“Sirvió a su país en la guerra y en la paz, tanto como le fue concedido”* Cabe preguntarse qué se ha sabido ahora que no se conociese antes para acabar desenmascarando a tal monstruo.

EL GRAN ÉXITO

En 1840 Liebig sentó que el papel esencial de la agricultura era almacenar nitrógeno en los suelos cultivables, por lo que para mejorarlos se explotaron masivamente el gua-

no y el caliche chilenos. Tanto que según estimó William Crookes en 1898 las reservas de guano estaban ya a punto de agotarse y las de caliche no durarían ni medio siglo. En consecuencia advirtió que *“Inglaterra y todas las naciones civilizadas están en peligro de morir de hambre”* Ahora bien, cabía regenerar las tierras utilizando procedimientos químicos para que *“la gran raza caucásica siguiese prevaleciendo”*. Crookes sostenía que *“Es mediante el laboratorio que la hambruna puede convertirse en abundancia”* y urgía a la captación del nitrógeno atmosférico. Algo parecido aventuró el año siguiente Carl Engler, químico industrial, político, rector en Karlsruhe y mentor de Fritz Haber en esa época: *“Puede vislumbrarse que en el porvenir las capacidades de las tierras no serán suficientes para soportar a los millones de humanos”*.

Aparentemente la solución no parecía muy complicada: pasar por síntesis directa del inerte e inagotable nitrógeno del aire al activo amoníaco, y oxidar después la base hasta ácido nítrico para llegar a los nitratos. En su autobiografía Ostwald escribió que cualquier especialista sabía que el problema de la síntesis ya estaba correctamente definido en 1900. Especialmente por él, que se tituló *“padre intelectual de la industria del amoníaco”*. Buscó ser mucho más, para lo que formalizó una patente que en marzo de 1900 ofreció a varias empresas. Al aplicarla en BASF un joven Carl Bosch dictaminó que el amoníaco provenía de una impureza del catalizador. En consecuencia el fallido progenitor retiró la patente y a sí mismo de la síntesis, que en sus palabras quedó *“como un niño abandonado”*.

Haber tuvo su primer contacto con ese expósito en 1903, al ser contratado por unos empresarios vieneses interesados en el amoníaco que les aparecía como subproducto. El criterio básico de entonces para decidir sobre la viabilidad de una reacción industrial era que hubiese un equilibrio favorable hacia los productos. Haber midió el de la síntesis a presión atmosférica y 1000 C°, obteniendo 44 ppm de NH_3 . Es decir, en esas condiciones la reacción estaba tan irreversiblemente desplazada en el sentido de los reactantes que era comercialmente inviable. Haber publicó esos datos en 1905. A finales de 1906 Nernst le advirtió que mostraban un equilibrio aún más favorable que el estimado por él aplicando su *teorema del calor*. También le informaba de que había encargado a un ayudante medidas del equilibrio a altas presiones, resultados que presentaría en la primavera siguiente durante el congreso de la Sociedad Bunsen. Esta amenaza provocó que Haber refinara y ampliara su experimentación. De manera que cuando el sucesor *in pectore* de Ostwald en la cúspide de la Química Física germana expuso sus valores Haber le opuso los suyos. Nernst los menospreció argumentando que si fuesen correctos *“se podría considerar factible sintetizar directamente amoníaco de nitrógeno e hidrógeno”*. Esta desautorización pública hirió profundamente a Haber. Tras padecer uno de sus accesos psicósomáticos se dispuso a conseguir sintetizar NH_3 con la disposición de *“un toro ante un portón”* que recordara un químico inglés. Por si precisaba de mayores estímulos, Nernst cambió pronto de parecer, reconoció que la obtención era industrialmente posible y anunció que trabajaba en ella.

Al afirmar Ostwald que consideraba definido el problema de la síntesis quería decir que como se deducía del principio de Le Chatelier (1884) había que operar a presiones muy elevadas y favorecer el equilibrio con una baja temperatura. Pero no tan baja como

para que colapsara la velocidad de la reacción. Al tener que mejorar la cinética era imprescindible un catalizador adecuado. Además, se necesitaría una recirculación eficaz para los reactantes no reaccionados, al ser esperables conversiones muy bajas.

Este escueto planteamiento ocultaba grandes problemas. Por ejemplo: ¿cuál sería esa temperatura, baja pero no muy baja? Haber adelantó que operando a presión atmosférica no debía pasar de 300°C, pero eso lo condenaba a aceptar una velocidad inasumible, ya que no creía que existiese un catalizador con el que compensar una temperatura tan pequeña. Los catalizadores se elegían por empirismo racional y para eso nadie con la preparación de Wilhelm Ostwald, Nobel 1909 por sus méritos en Cinética Química y Catálisis. Para la síntesis propuso uno de cobre o de hierro, con tan malos resultados como los que obtuvo Haber con hierro muy puro. El que más tarde instaló Mittasch en el reactor industrial era asimismo de hierro, una demostración de que la acción catalítica no sólo dependía del elemento elegido. Pues bien, junto a esos grandes retos químicos había que superar los ingenieriles. Al operar a altas presiones y temperaturas se complicaban la separación del producto, la recirculación de los reactantes y el diseño de las válvulas y compresores; y se extremaba el riesgo.

Para emprender la obra más importante de su vida Haber contaba con sus datos de equilibrio a bajas presiones y su *Termodinámica de las reacciones técnicas gaseosas*, texto capital que publicó en 1905 y estaba dedicado “*A mi querida esposa Clara Haber, doctora en filosofía, en gratitud por su colaboración silenciosa*”. En él se informaba sobre la síntesis del amoníaco, por lo que el autor estaba pertrechado para afrontar los aspectos químicos del problema, aunque no tanto los ingenieriles. Tuvo fortuna al contar con Robert Le Rossignol, un inglés que se formó en Karlsruhe entre 1906 y 1909 y tenía más afición y capacidad para las cuestiones mecánicas que su profesor. Éste ofreció al estudiante el 40% de sus derechos si la síntesis llegaba a la escala industrial, otra muestra de la generosidad legendaria de Haber que aseguró la riqueza perpetua de Le Rossignol. La investigación fue financiada por BASF en marzo de 1908. En marzo de 1909 un reactor alimentado con una mezcla estequiométrica de N_2-H_2 y operando con catálisis de osmio a 600°C y 200 atm produjo un efluente con el 6% de amoníaco. Lo que no habían logrado Ostwald o Nernst, ni antes Le Chatelier, lo logró Haber por aquella capacidad que le alabara Engler, la de distinguir los hilos relevantes para después anudarlos rápidamente. El uno de julio Bosch y Mittash viajaron hasta Karlsruhe para seguir una demostración que hubo que retrasar por una fuga. Bosch no esperó a que se reparara y no presenció la repetición del milagro. Al contemplarlo, Mittash se declaró “*profundamente impresionado y completamente convencido*”. Su informe fue asumido por su empresa, que se apresuró a implementar lo que ha perdurado como un logro inmarcesible de la industria química. El escalado fue muy rápido por las precisas especificaciones que aportaron Haber y Le Rossignol y la capacidad tecnológica de BASF. En la primavera de 1913 su fábrica de Oppau producía veinticinco toneladas diarias de amoníaco para uso agrícola.

EL GRAN FRACASO

Clara Immerwahr y Fritz Haber se conocieron hacia 1890. Pertenecían a familias judías burguesas de Breslau, *“una aristocracia intelectual educada hacia el conocimiento, el humanismo y el liberalismo político, pero socialmente aislada”*, lo que propiciaba la endogamia del colectivo. En abril de 1891, año en el que Haber se graduó en Berlín, Clara pidió a un amigo común una foto del graduado *“por razones de hecho bastante simples que no puedo divulgar por el momento”*; pero esos escauceos eran inanes en tanto el varón no contara con una posición social que sostuviese una familia. En 1894 Haber cobró su primer sueldo como ayudante en el Instituto Tecnológico de Karlsruhe. Progresó y a finales de 1898 era un Profesor Extraordinario de treinta años, así que pensó en casarse. Para intentarlo invitó al congreso de 1901 de la Sociedad Alemana de Electroquímica a celebrar en Friburgo *“al Profesor Dr. Richard Abegg y a la Ayudante Dra. Señorita Clara Immerwahr”*. Abegg enseñaba en Breslau y era amigo de Fritz desde que fueran condiscípulos en Berlín. Tras ser el tutor doctoral de Immerwahr la aceptó en su laboratorio. Fritz remitió a Clara otra carta confesándole haber pasado la última década intentando olvidarla, *“diligente pero infructuosamente”*.

Immerwahr ya no era la jovencita que solicitaba retratos, sino una adelantada doctora en Química. Días antes de la Navidad de 1900 una multitud mayoritariamente femenina asistió a su investidura en el Aula Leopoldina de la universidad de Breslau. El decano se congratuló por la sabiduría de aquella *doctissima femina*, ya que *“la ciencia da la bienvenida a todos, con independencia del sexo, raza, confesión o nacionalidad”*. En la continuación fue franco y limitó el alcance del hito, ya que recelaba del inicio de una nueva era en la que las mujeres dejaran de ser el santuario de la familia. En efecto, incluso una joven acomodada como Immerwahr tenía difícil ser otra cosa. Precisó de una década para doctorarse y el laboratorio del que dispuso estaba en la Escuela de Minas de Clausthal, a seiscientos kilómetros de Breslau. Soportó impertinencias como la un profesor de Física Experimental que le espetó: *“No tengo nada que tratar con Amazonas intelectuales”*. Así que Clara fue muy afortunada cuando en 1899 Richard Abegg llegó a Breslau. Entre ellos se estableció una relación cálida a la vez que formal que convirtió al tutor en el mejor confidente que quizás tuvo su alumna. Sabemos de la *“blandura infeliz”* de Clara por las cartas que escribió a su *Querido Sr Profesor*. Tras un percance en el laboratorio respondía así a los ánimos que Abegg trataba de infundirle: *“Sé que el señor profesor tiene razón. Pero ¿cómo se supone que tenga “valor renovado y entereza” cuando soportar la existencia diaria consume toda mi limitada fuerza? Sólo en momentos fugaces he conocido la alegría de vivir y puedo decir que cada uno de ellos se ha compensado con años de pesadumbre”*. Ya se comprende que Abegg tenía que combatir una profunda desesperanza. Su deferencia y tacto fueron un apoyo insustituible para Clara, quién entraba en pánico cuando oía rumores de que en uno de los traslados habituales en la época él podía dejar Breslau.

En marzo de 1901 el catedrático Abegg y la señorita ayudante Immerwahr viajaron a Friburgo y allí Fritz propuso nupcias a Clara. Ella aceptó con reservas al pensar que *“no era del tipo correcto para el matrimonio”* y explicó esa decisión poco entusiasta de este

modo: *“Mi aproximación a la vida fue siempre que sólo merece la pena vivirla si uno desarrolla al máximo sus capacidades. Y así decidí casarme porque entre otras razones sentí que de otra manera quedaría en barbecho y sin tocar una página del libro de mi vida y un acorde de mi alma”* Los novios tenían en común estirpe, posición social, gran inteligencia, talante generoso, un estricto sentido del deber, la lealtad como cualidad nuclear, pasión científica y desapego religioso; pero sus caracteres eran contrapuestos. Una sobrina describía a Clara como *“una mujer gentil, casi una muchachita, con una voz tierna,... muy sensible, una persona sedienta de ternura”*. Y también muy austera, inclinada a juicios éticos absolutos, emocionalmente rígida y renuente a lo sensual. En tanto que Fritz era una mente en actividad perenne, un enérgico incapaz de reposo al que sólo sus problemas de salud podían detener. A la vez que plétórico era cordial y divertido, no rehuía endulzar la existencia y al contrario que a Clara *“el dinero se le caía de los dedos”*. Como profesor y como hombre Haber despertó grandes y perdurables afectos de los que abundan los testimonios. De este modo mostraba Le Rossignol su gratitud: *“Para un joven como era yo entonces es raro tener la suerte de estar en contacto con un profesor tan excelente, que por su propio amor y devoción al trabajo era un modelo para sus estudiantes, alguien en que podían estar seguros de encontrar siempre un sincero amigo y consejero”*. Otro inglés formado en Karlsruhe rememoró a Haber departiendo con sus discípulos: *“A veces era como un actor... y solía contar historias. Daba la impresión de ser un gran hombre, pero cercano al mismo tiempo”*. Es el recuerdo repetido de un profesor informal y genial, tan abordable y tan afectuoso: *“Siempre era así entre sus estudiantes, amable, alegre y exuberante, aunque la vida no fuese demasiado feliz en su hogar”*.

En abril de 1909 Richard Abegg visitó al matrimonio Haber. A su vuelta a Breslau escribió una postal a Clara en la que se congratulaba de los logros de Fritz. Al mes ella le respondió con una muestra de su franqueza e inflexible empeño por aclararlo todo. Pedía a Abegg que comparara su situación con la de su exitoso marido: *“Lo que Fritz ha conseguido en estos ocho años, yo lo he perdido e incluso más. Y eso me deja llena de la insatisfacción más profunda...”* Aunque aceptaba su responsabilidad por permitir *“la abrumadora aserción en el hogar y el matrimonio”* de Fritz, no dejaba de condenarlo por abandonar sus cualidades humanas, menos la de investigar, por su envejecimiento prematuro, por permitirse caprichos y despreciar las rutinas de la vida. Los caprichos que Clara criticaba podían referirse a que el marido gustaba de invitar en su domicilio a colegas y estudiantes. Uno recordó que *“Se decía que Haber era regañado por su mujer continuamente y que eso le perturbaba”*. Esa reprobación no impedía a Fritz divertir a sus invitados con ocurrencias, relatos y rimas improvisadas.

El resentimiento que mostraba Immerwahr y su lamento por la pérdida de rasgos propios al haber elegido al hombre inadecuado descubrían un conflicto que comenzó con el nacimiento del enfermizo Hermann al año de casarse. El sacrificio de su carrera científica a una relación insatisfactoria y una ingrata ocupación doméstica debieron hacer todavía más insoportable la desdicha a la que se creía condenada. Su carta a Abegg presagiaba que en adelante a los Haber sólo les quedaba conllevarse. Aunque con expectativas diferentes, porque Fritz, fracasado como cónyuge, había alcanzado una cumbre

en su carrera; en tanto que Clara empequeñecía hasta mutar en “*una ratita gris, sin carácter y circunspecta... que estaba excesivamente ansiosa*”. En abril de 1910 sufrió una pérdida irreparable: Richard Abegg murió al precipitarse con el globo que tripulaba, una afición funesta adquirida en sus prácticas como reservista.

EL GRAN PECADO

La Gran Guerra estalló a finales de julio de 1914. Hoy se piensa que los beligerantes, que llevaban años amagando con el conflicto, entraron en él sin ser conscientes de lo que iba a seguir. Consideraron que una campaña que sería poco más que veraniega era una solución razonable con la que purgar los malos humores acumulados en Europa. Para Alemania resultaba vital un litigio breve, al no poder sostenerlo mucho tiempo con un doble frente y suministros bloqueados. Su Alto Mando acumuló material con el que guerrear unas seis semanas, el plazo que se dieron para ejecutar el plan Schlieffen, inspirado según su autor en el de Aníbal en la batalla de Cannas: empezar golpeando a franceses y británicos mientras se frenaba a los rusos, de movilización más lenta, para volverse contra ellos tras cerrar el frente occidental. Si querían lograrlo rápidamente los alemanes estaban forzados a atacar desde Bélgica ignorando la neutralidad que un tratado garantizaba. Pero la inesperada resistencia belga retrasó la ofensiva germana y las tropas que se acercaron a París llegaron exhaustas y con un gran ejército enfrente. A primeros de septiembre la batalla del Marne apuntilló el plan Schlieffen-Molke. Los dos bandos marcharon hacia el mar y terminaron atrincherándose desde el Atlántico hasta Suiza. Con una contienda prolongada la derrota germana sería inexorable, por lo que los alemanes necesitaban reactivar su frustrada ofensiva como fuese.

Se ha dicho que la elevadísima mortandad de aquella Gran Guerra se debió a aplicar una doctrina militar decimonónica con un armamento potenciado por la tecnología del siglo XX. El Alto Mando alemán tenía que agradecer a sus ingenieros químicos que sus cálculos en la dotación de polvorines no les hubiesen obligado a rendirse para Navidad. En efecto, el amoníaco producido en Oppau convertido en ácido nítrico tras llevar a la escala industrial el método de Ostwald, otro gran logro de Bosch y Mittasch, permitió a Alemania prescindir de un inaccesible nitrato de Chile. Aún así los militares seguían renuentes a que los científicos interviniesen en sus asuntos, pero ante la urgencia de desalojar trincheras y la impotencia para conseguirlo con sus métodos el jefe del Estado Mayor, general Eric von Falkenhayn, se prohibió remilgos. De hecho la química se estaba utilizando desde el inicio del atrincheramiento, ya que en agosto de 1914 los franceses cargaron granadas con bromoacetato de etilo, un lacrimógeno afrutado. En octubre los alemanes usaron proyectiles con clorosulfonato de dianisidina, un tusígeno con el que no lograron vaciar las trincheras inglesas. De ahí que un decepcionado Falkenhayn se quejara a Emil Fischer de que los químicos anduviesen buscando productos malolientes en lugar de algo que “*pusiera a la gente en permanente fuera de combate*”. Fischer le informó de que no era fácil encontrar un tóxico letal a concentraciones muy

bajas; y que aunque él sabía de uno lo desaconsejaba por no contar el país con materia prima para obtenerlo.

Alemania ha sido acusada de violar los tratados de La Haya de 1899 y 1907 por recurrir a la guerra química. En La Haya las potencias sólo aceptaron compromisos “*que no afectaran a su honor e intereses vitales*” pero se aprobó una propuesta que prohibía “*los proyectiles que tuviesen como único objeto esparcir gases asfixiantes o deletéreos*”. No la suscribieron ni los Estados Unidos ni el Reino Unido, que sí acabó firmándola en 1907. Esto no impidió que los gases asfixiantes permanecieran en el catálogo oculto de las potencias, como los proyectiles de punta hueca. Pero mientras las balas *dum-dum* no tenían contraindicaciones para el usuario, los tóxicos eran de aplicación peligrosa y de eficacia cuestionable. Por eso al comenzar la Gran Guerra no se les concedía gran atención, el arsenal era reducido y su producción limitada. No por escrúpulos éticos o respeto a los tratados, sino por las malas prestaciones militares.

Fritz Haber participaba desde septiembre de 1914 en la Comisión de Suministros del Ministerio de la Guerra, por lo que en diciembre asistió a las pruebas que trataban de mejorar los gaseados del otoño. Vista su inoperancia Haber propuso contaminar zonas extensas del frente liberando cloro desde cilindros presurizados. Sustituía el proyectil con antiquísimos precedentes chinos cargado con líquidos y metralla por nubes de un gas tóxico denso que se pegaba al suelo y estaba más disponible en Alemania que el fosgeno que Haber también consideró. Esta innovación convirtió la guerra química en un arma operativa al coste de complicarla con el control meteorológico y la protección de las tropas propias. A mediados de enero de 1915 un escéptico Alto Mando aceptó la propuesta. En primavera los alemanes acumularon cloro en el frente de Yprés sin que la Inteligencia aliada reaccionara a los buenos informes que le llegaron. El 22 de abril de 1915 se liberaron 167 toneladas del gas que el viento dirigió hasta las trincheras francesas. La sorpresa fue absoluta. Hubo unas cinco mil bajas, de ellas mil muertos, incluidos algunos alemanes, aunque no una rotura consolidada del frente. El ataque se repitió dos días después contra tropas canadienses. Al persistir la sorpresa y mejorar la meteorología se doblaron los afectados y se cuadruplicaron los finados. Haber se anticipaba así al ataque con gases lacrimógenos previsto por los franceses para esa primavera de 1915.

Alarmado ante una novedad en la que el enemigo llevaba ventaja, el jefe del cuerpo expedicionario británico Sir John French clamó que al emitir “*un gas tan virulento y venenoso*” se había producido “*una cínica y bárbara ignorancia de los bien conocidos usos de la guerra civilizada*”. A las veinticuatro horas de proferir el oxímoron solicitó a su gobierno medios similares para sus tropas. El gabinete británico informó a Jorge V que los alemanes no habrían violado el tratado de La Haya y se afanó en devolver el golpe. Lo intentaron en septiembre de 1915 dirigiendo 140 toneladas de cloro hacia las trincheras alemanas, pero sin el factor sorpresa y con la protección antigás les sirvió de poco. Desde entonces ambos bandos pugnaron con nuevos gases y nuevas máscaras. En esta continua innovación residía el elevado concepto que Haber tenía de la guerra química, una forma superior de combatir puesto que “*Si la guerra convencional es como las damas, el ataque y la defensa con gases es como el ajedrez*” Implicaba un cambio de

objetivo militar, ya que si las armas clásicas buscaban eliminar adversarios, las químicas se dirigían sobre todo a minar su moral.

Las potencias emplearon ingentes recursos en ese juego. De él se ocupaban ciento cincuenta investigadores del instituto de Haber. Competían con los de los laboratorios militarizados que en Francia coordinaba la Sorbona; con las universidades de Oxford y Cambridge, el University College de Londres, la fundación Lister y la medicina militar del Reino Unido; con el MIT y las universidades de Harvard, Yale y John Hopkins en EEUU. En total participaron cinco mil quinientos científicos y las decenas de miles de trabajadores que arriesgaron sus vidas en la preparación de los tóxicos. Este esfuerzo logró la defunción de noventa mil combatientes, de ellos nueve mil alemanes. Ya que en la guerra se consumieron casi diez millones de vidas, esa cifra representaba sólo un modestísimo 1% frente al 70% que consiguió la artillería. Y aún así en el imaginario colectivo los gases y las máscaras han quedado como paradigma del horror de aquel conflicto, avalando el efecto psicológico que Haber buscó. Es verosímil que esa repulsa al empleo de los gases deletéreos haya facilitado la imagen de Haber como científico criminal; pero siendo justo que quede como símbolo de la guerra química por ser su innovador y el más dotado de sus ejecutores, no lo es que ignorando al resto se le condene por ser el más listo. Y no era fácil serlo, ya que entre la multitud de científicos que se ocuparon de los gases y máscaras en aquella guerra se contaban W. Nernst, O. Hahn, J. Frank, G. Hetz, R. Willstätter, V. Grignard, J. Haldane, G.N. Lewis...

EL CAPITÁN HABER ENVIUDA

A principios de 1910 Adolph von Harnak, teólogo y consejero de Guillermo II, persuadió al káiser del interés vital que la ciencia tenía para Alemania, de hecho su segundo pilar, y lo indujo a patrocinar los grandes institutos de investigación que constituyeron la Sociedad Káiser Guillermo. El estado no podía financiarlos al estar empeñado en la construcción de una gran flota, por lo que imitando a las fundaciones de Carnegie o Rockefeller se recurrió a los patronos de la industria pesada. El banquero y empresario Leopold Koppel costeó el Instituto de Química Física y Electroquímica con la doble condición de participar en las patentes y de que lo dirigiera Haber. En junio de 1911 los Haber se trasladaron a Berlín-Dahlem y Fritz puso en marcha un centro que llegaría a ser para Michael Polanyi el modelo de investigación científica.

Tras el éxito de Yprés el ya capitán Haber retornó a casa con un permiso corto. Lo aprovechó para organizar una recepción el uno de mayo de 1915. Se ha especulado si asistió Charlotte Nathan, de veintiséis años y “*ningún talento para el ascetismo*” según declaración propia. Haber la conoció en el club político que frecuentaba, la Sociedad Alemana 1914, en el que Nathan ejercía de factótum. En la madrugada que siguió a aquella velada condenada por algunos como la celebración inmoral de un holocausto Clara Immerwahr se suicidó con la pistola reglamentaria de su marido. Se ha supuesto que disparó primero para probar el arma y después contra su pecho. Fritz consumía somníferos y no pudo oír las detonaciones que sí oyó su hijo. Cuando el adolescente

llegó al jardín encontró a su madre cubierta de sangre. Clara tardó en expirar, quizás horas. Haber resumió la tragedia comunicando al administrador de la Sociedad Káiser Guillermo Schmidt-Ott que su esposa no había soportado más la vida. Asimismo que la víspera habían discutido por la guerra química, de lo que se concluye algo improbable y sin verificación posible, que ella *“le dio un ultimátum para que detuviera su actividad o se suicidaría”*. A Clara se le atribuyen otras frases que tal vez no dijo, como que el arma química era *“una perversión de la ciencia”* y *“un signo de barbarie”*; pero no cabe dudar de su rechazo a las aportaciones bélicas de su marido. Lo que pensaba de ellas se sabía en Dahlem: la guerra tenía que acabar de inmediato y era una inmoralidad que la ciencia sirviera para prolongarla. Cuando pocos días antes de su muerte Clara visitó a la esposa de su primo Paul Krassa se mostró *“desesperada por las horribles consecuencias de la guerra con gases, cuyos preliminares y las pruebas con animales había visto”* James Franck la recordaba como *“un ser humano bondadoso que deseaba reformar el mundo. El hecho de que su marido estuviese implicado en la guerra de gases jugó ciertamente un papel en su suicidio”* Uno determinante para Gerit von Leitner, arqueóloga que en su biografía de Immerwahr lo endosa al esposo desatento con el pacifismo ardiente de su compañera. Tampoco dudaba el mecánico Hermann Lütge al sostener que la *“celebración de la victoria”* en Dahlem había devenido en *“erótica”*. Clara se habría matado por celos al sorprender a su marido *“en una situación embarazosa”* con la señorita Nathan. Ésta, dos años más tarde señora Haber, también dio su versión asumiendo lo oído a su suegro: que una herencia patológica ínsita en los Immerwarh hacía que sus hembras se suicidaran y los varones acabaran alcoholizados.

Clara debió explicar sus motivos en las cartas que dejó escritas antes de dispararse y que se destruyeron. Al considerarlos Krassa apuntaba a su complejidad, *“aparte de que no era posible una vida armoniosa en su matrimonio”*. Según la hipótesis de Friedrich y Hoffmann, mucho más elaborada que los reduccionismos de Leitner, Lütge y Nathan, se produjo un *“fallo catastrófico”* alimentado por un cúmulo de circunstancias. Una había sucedido cuatro meses antes del suicidio. A mediados de diciembre de 1914 los químicos Sackur y Just investigaban en el instituto de Haber con cloruro de cacodilo. El director estaba presente pero lo solicitaron poco antes de que el montaje estallara. Just perdió la mano derecha y Sackur quedó horriblemente mutilado, como contempló Clara cuando acudió en socorro del viejo conocido que hizo el papel de opositor académico en su doctorado. Sackur falleció a los pocos días. Su muerte pudo pesar en la decisión de Clara, como la de Richard Abegg, como el agotamiento por una vida familiar muy insatisfactoria, el horror por la guerra y la participación de su marido en ella. En su biografía de Haber, Szöllösi-Janze, señala como detonante el devaneo de Fritz. Pero Ethel Hahn lo hacía responsable por su indiferencia hacia Clara, que *“no iba a dejar pasar”* aunque ella fuese *“una mujer enferma que disgustaba a todos”*. De otra forma opinaron en el entorno próximo a los Haber, que exoneró a Fritz. Sin embargo, Franck notó que él se sentía culpable. Seis semanas después de morir Clara, Haber escribió a Engler desde el frente y la evocó: *“Después se vuelve al Cuartel General, y escucho en mi corazón las palabras que la pobre mujer dijo una vez; y en una imagen nacida del cansancio, veo su cabeza emergiendo desde órdenes y telegramas, y sufro”*.

SEGUNDO ESPLENDOR DE HABER

Coates apunta que la guerra agudizó en Haber una pulsión prusiana, pero lo seguro es que el abatimiento por la derrota y las duras condiciones del tratado de Versalles no apaciguaron su patriotismo. En Versalles los vencedores exigieron responsabilidades a un imperio belicoso y buscaron triturar su economía, su ejército y su ciencia. En este ajuste de cuentas Haber estuvo particularmente preocupado al incluirse en una lista de malhechores (que compartía con Nernst, los hijos del káiser, altos mandos militares y comandantes de submarinos) y cuestionársele su Nobel. En la postguerra los suecos se mostraron rumbosos con la ciencia alemana concediendo el Nobel de Química 1918 a Haber y el de 1920 a Nernst; y los de Física 1918 a Planck y 1919 a Stark. De ahí que el *New York Times* ironizara solicitando el Nobel de Literatura para Luddendorf y sus boletines de campaña. Hubo protestas y premiados que devolvieron la medalla. Los aliados también se acordaron de las figuras relevantes de la cultura germánica, Haber entre ellas, que al inicio de la guerra habían firmado el *“Manifiesto de los noventa y tres”* en el que reivindicaban su civilización y negaban la versión aliada sobre diversas atrocidades en Bélgica. De modo que se exigió a los firmantes una palinodia cuyo rechazo sirvió de nueva excusa para intentar excluir a la ciencia alemana del concierto mundial.

El encausamiento con el que se le amenazaba llevó a Haber a cambiar de aspecto y a pasar a Suiza con su familia. En Zürich enseñaba Hermann Staudinger, pacifista que renunció a su nacionalidad y a partir de 1917 publicó artículos en los que solicitaba un armisticio y auguraba la derrota de Alemania. Los envió a Haber cuando lo tuvo cerca, pidiéndole a la vez *“señalar el peligro de la moderna tecnología, promoviendo así la paz en Europa”*, un papel al que según él estaban obligados los químicos. En una respuesta breve Haber advirtió al que fue su colega en Karlsruhe que la legalidad de los gases bélicos se reconocía ya en documentos alemanes, británicos y americanos. En efecto, al acabar la guerra la opinión sobre ellos había mejorado y un yanqui responsable de las municiones los alababa así: *“El gas puede ser no sólo uno de los recursos más eficaces (porque producía un 20-30% de bajas), sino de los más humanos (utilizando máscaras sólo eran fatales un 3-4%)”*. En ese punto Staudinger planteó si la guerra química podía ser ética aún siendo legal, provocando una respuesta más extensa de Haber. Entre otras cosas reprochó a Staudinger su alejamiento de la realidad al creer que la paz perpetua puede asegurarse mediante los medios técnicos que manejan los químicos. Se precisa de algo distinto: *“Un marido y una esposa permanecen juntos por su espíritu y autodisciplina, no por echar la llave a todas las escobas y atizadores”*

Aun habiendo pasado el arma química de abominable a humanitaria los vencedores la vetaron a los vencidos, reservándose la producción e investigación de los gases tóxicos. Obvio que esto no se aceptó, por lo que de vuelta a su instituto Haber siguió trabajando en el campo, enmascarando sus estudios con otros sobre fumigantes. Se trataba de un afán de *“su corazón patriótico”*, como lo fue el proyecto para facilitar el pago de las reparaciones de guerra que Alemania tenía que abonar en marcos-oro. Arrhenius había estimado que una tonelada de agua de mar contenía unos 6 mg de oro, por lo que tal vez compensara extraerlos. Para comprobarlo hubo que empezar afinando el análisis

de una disolución compleja de contaminación fácil en la que había que computar masas muy pequeñas. Al final se determinó una riqueza media de una centésima de mg de oro por tonelada. Es decir, una seiscientas veces menos de lo estimado por Arrhenius, lo que hacía el intento inviable.

Aunque Haber mantuvo los programas con tóxicos, a partir de 1926 encaminó su instituto hacia la investigación básica, no sólo en Química Física, sino en Fisiología y en Física Teórica. En el prestigio que alcanzó el centro también contaron los coloquios que moderaba su director y en los que se trataba *“desde el átomo de helio a la gripe”*. En este segundo esplendor Haber persistió en la intensísima actividad de *“un hombre que no soportaba la ociosidad, se exigía un esfuerzo extremo, y cuya mente tenía que estar siempre activa”*. Y ello a pesar de quejarse desde 1921 de dolencias que se agravaron con lo que él calificó de *“su último logro”*: unos espasmos cardíacos que al asfixiarlo lo despertaban de madrugada, hasta que la nitroglicerina lo reponía tras *“unos minutos muy duros”*. Tales angustias comenzaron en el año 1927, en el que para cerrar media década *“de tensión y tumulto”* los Haber se divorciaron.

EL FIN DE UN ALEMÁN

En enero de 1933 nombraron a Hitler canciller. Su gobierno fue diligente en promulgar leyes ideológicas. La de Restauración del Funcionariado de 7 de abril expulsaba del servicio público a los judíos y las *“personas políticamente poco fiables”*. Los alemanes hubieron de declarar sobre su raza y la de sus ancestros y Haber informó que él y las dos mujeres con las que había estado casado, junto con sus ascendientes, serían *“no-arios según se define por la ley”*. El presidente Hindenburg impuso que la norma no se aplicase a los veteranos de guerra, por lo que Haber quedó exento de este adelanto de las Leyes Raciales de 1935. Sí estuvo concernido en la depuración del personal no-ario de su instituto, un 25% del total. La dirección entrante en la Sociedad Káiser Guillermo pretendía que se despidiese primero a los menos laureados. Haber aplicó el método opuesto: prescindió antes de los más prestigiosos, como Polanyi o Freundlich, que no tendrían problemas en recolocarse; retrasó la marcha de los restantes; y pidió a Otto Hahn que les pagase con la libre disposición del Instituto. Haber actuó de este modo hasta su dimisión a finales de abril de 1933, quedando así despojado de trabajo y nación. Erró entonces por Europa buscando un nuevo hogar y llegó a contactar con el movimiento sionista, algo inconcebible para el judío alemán que siempre pretendió ser. Había coincidido años antes en Francia con Chaim Weizmann, quién no olvidaba la apostasía de Haber aunque convino que era un apóstata muy afable. Cuando en julio de 1933 volvieron a verse en Londres Weizmann encontró al *“otrora orgulloso químico”* *“roto, confuso, girando en un vacío mental y moral”*. Tal vez, pero no tanto como para que olvidara sus valores. Abandonar Alemania comportaba para Haber un problema económico a la vez que sentimental, ya que se le exigiría un *“impuesto de emigración”* cuya cuantía alcanzaba las tres cuartas partes de sus recursos. Haber podía ignorarlo

al tener la mayor parte de su fortuna en Suiza, pero le resultaba insoportable aparecer como un evasor.

En sus años postreros Haber luchó con energía menguante contra cuatro enemigos: el insomnio, las peticiones financieras de su ex mujer, la preocupación por el futuro y la sensación de que había cometido serios errores en su vida. Y persiguió dos objetivos: pasar esos años en una comunidad científica, con honor pero sin los deberes exigentes de los que ya no se sentía capaz; y renunciar a la ciudadanía alemana para no legar una de segunda clase a sus descendientes. Pudo elegir entre una oferta de Weismann para marchar a Palestina y una estancia en Cambridge que auspiciaron Hartley, Donan y Pope, sus adversarios en la guerra química. Haber aceptó ésta y abandonó finalmente Alemania en septiembre de 1933. El invierno inglés agravó sus achaques y en enero de 1934 tuvo que regresar a Suiza. Tras dos días de viaje llegó agotado a Basilea la tarde del 29 de enero. Esa madrugada murió. En su testamento especificaba el lugar y el epitafio para su tumba. Quería que lo sepultaran junto a Clara en Dahlem; pero si el gobierno nazi se oponía a su retorno incluso como cadáver serviría cualquier otra ubicación en la que ella lo acompañase. Su condición de judío pesó más que la de patriota clave para el esfuerzo bélico alemán en la Gran Guerra y los restos de Fritz Haber no acabaron en Berlín. Su hijo Hermann trasladó los de su madre a Basilea y allí, sin epitafio, han quedado los esposos Haber.

EPÍLOGO

Cuando Haber penaba “*roto y confuso*” por Europa Einstein escribió a su amigo para alegrarse de que su “*amor por la bestia rubia se hubiese enfriado un poco*”. Se mostró más empático en otra carta en la que decía entender sus conflictos íntimos, que según él serían “*como abandonar una teoría en la que se ha estado trabajando toda la vida*”. Finalmente estuvo a la altura del gran aprecio que sentía por Haber y remitió a sus hijos un pésame emotivo. En él decía sentirse como un fósil porque casi todos sus verdaderos amigos estaban muertos y rememoraba la tragedia de Haber, “*la del judío alemán, la tragedia de un amor no correspondido*”

Siendo evidente el desdén de los nazis por Fritz Haber también lo es que muchos alemanes respetaban, estimaban y aún reverenciaban a aquel “judío patético” en las palabras del ministro de Cultura Rust. Como Max von Laue, que combatió el silencio oficial al morir Haber publicando en *Ciencias de la Naturaleza* un brioso obituario. En él decía que así como se recordaba a Temístocles no como el exilado en Persia sino como el vencedor de Salamina, Haber sería recordado no por su exilio, sino “*por alimentar con el aire y lograr un triunfo al servicio de su nación y de toda la humanidad*”. En el primer aniversario de la muerte de Haber se celebró un homenaje a su memoria en el salón de conferencias de la Sociedad Káiser Guillermo. La dirección del centro prohibió a sus miembros que asistieran. El acto fue presidido por Max Planck y en él Otto Hahn leyó su texto y el del ausente obligado Karl Bonhoeffer. El salón se llenó porque las esposas de profesores e investigadores acudieron en representación de sus maridos,

eludiendo de este modo *“la prohibición brutal de dar el último adiós a tan importante persona y científico”* Dos años más tarde la Sociedad Química de Londres encargó otra conferencia recordando a Haber. La pronunció en abril de 1937 Joseph William Coates, profesor de la universidad de Swansea, que había trabajado tres años en Karlsruhe. En ella mostró *“el aprecio a la vez profesional y personal”* y *“la perdurable lealtad a su memoria que Haber era capaz de inspirar a los que lo conocían mejor”* En diciembre de 1952 se dio al Instituto de Química Física y Electroquímica de Berlín el nombre de su fundador y Bonhoeffer pudo pronunciar el discurso que le vetaron en enero de 1935.

Por tanto, cuarenta años después de haber dado pie con su patriotismo, talento y energía a su actual oprobio, Fritz Haber era una figura muy respetada y no el criminal de guerra que había provocado el suicidio de su mujer. No lo tuvieron por tal ni los pacifistas Einstein y Staudinger, ni los parientes y amigos del matrimonio, ni su otro entorno social. Con buen criterio, porque para explicar el suicidio de Clara había más causas que la guerra tóxica que Fritz no inventó. Tras un siglo XIX de exuberante oferta química la aplicación bélica de los gases deletéreos flotaba en el ambiente y por eso trataron de pararla en La Haya. Las potencias ignoraron los acuerdos cuando creyeron que los tóxicos podían acabar con la guerra de trincheras y de ahí que los solicitaran a sus técnicos. El presunto delito de Haber lo compartieron muchos colegas. Entonces y después le valió la alabanza de sus compatriotas y la admiración de sus contrincantes. De manera que durante largo tiempo la única repulsa por gasear enemigos que se recordó fue la de su esposa.

Hoy no es raro que se enaltezca a Clara Immerwahr como una pacifista radical y una gran científica embargada. Pero una mujer valiosa *“quebrantada por su inteligencia, su amor a la verdad y su perfeccionismo”* no merece prestigios falsos. Clara no fue una baronesa von Suttner ni llegó a ser una química rutilante frustrada en su carrera por un marido desaprensivo. Su enorme mérito fue el de la precursora que abrió camino con su tesis a las primeras habilitadas en Alemania: Lise Meitner, Hertha Sponer, Edwig Kohn. Tampoco merece Fritz aparecer como su contrafigura, ni ser convertido en un engendro ensamblado con rasgos horribles. Recuerda al que compusiera el doctor Frankenstein utilizando retales de difuntos; aunque empeorándolo, al no concedérsele anhelo de amor. Se desconoce así al *“hombre de sentimiento rebosante e impetuoso, de corazón amable y tierno”* que fue Fritz Haber.

BIBLIOGRAFÍA

- CHARLES, D. *Master Mind. The rise and fall of Fritz Haber, the Nobel laureate who launched the age of chemical warfare*. Harper Collins (2005).
- COATES, J.E. *The Haber Memorial Lecture*. J. Chem. Soc. 1642-1672 (1939)
- FIZTGERALD, G.J. *Chemical warfare and medical response during World War I*. Am. J. of Public Health (98) 4 (2008).
- FRIEDRICH, B. *A brief biography of Fritz Haber*. Angew. Chem. Int. Ed. (44) 3957, (45) 4053, (51) 2, (52) 2 (2005-3013).

- FRIEDRICH, B., HOFFMANN, D. *Clara Immerwahr: A life in the shadow of Fritz Haber* [One hundred years of chemical warfare, 45-66 (2016)]. *Clara Haber, neé Immerwahr (1870-1915): Life, work and legacy*. Friz Haber Institut (2017).
- HABER, F. *Thermodynamics of chemical gas reactions. Seven lectures*. [Traducción de A. Lamb] (1908). Longmans, Green & Co.
- HIROTA, N. *A History of the Modern Chemistry*. Kyoto University Press, Trans Pacific Press (2016)
- JOHNSON, B. *Making ammonia*. Springer (2022).
- KATZ, M. *La química y sus contextos: el caso Fritz Haber*. Scribd: Química y civilización (IX) 1-18 (Septiembre, 2011).
- LAUE, M. VON. *Naturwissenschaften* (22) 67 (1934).
- LÜTGE, M. *Life and death of Clara Immerwahr*. 1-36. Ruhr-Universität Bochum (2021)
- PÉREZ PARIENTE, J. *Fritz Haber en el contexto científico, social y cultural de su tiempo*. CSIC. (Noviembre, 2018)
- PITSCHMANN, V. *Overall view of chemical and biochemical weapons*. *Toxins* (6) 1761-1784 (2014)
- STOLTZENBERG, D. *Fritz Haber: Chemist, Nobel laureate, german, jew*. Chemical Heritage Press (2004)
- SZÖLLÖSI-JANZE, M. *Fritz Haber (1868-1934). Eine biographie*. Beck (1998).

***CURSO DE CONFERENCIAS
RASC-FUNDACIÓN CAJASOL
Biotecnologías para una sociedad saludable***

ENVEJECIMIENTO, SALUD Y DEPORTE

*Resumen de la conferencia pronunciada por el
profesor D. Juan Ribas Serna,
el día 9 de mayo de 2024*

La conferencia completa se puede ver en:
[Ciclos Cajasol. Envejecimiento, Salud y Deporte.](#)

El envejecimiento es un proceso normal, fisiológico que empieza desde el mismo momento en que nacemos. La proporción de gente envejecida aumenta en todo el planeta a una tasa superior a la de los nacimientos. A la vez la esperanza de vida va aumentando conforme mejoran los procedimientos diagnósticos y terapéuticos de enfermedades crónicas importantes.

Por otra parte, el envejecimiento parece no afectarnos hasta alcanzada la madurez, en la que empiezan a manifestarse signos relacionados con la edad cronológica. Como ejemplos de signos evidentes de envejecimiento estarían el pelo blanco, las arrugas en la piel (deshidratación), la pérdida de masa muscular en las extremidades y el cambio en la postura corporal. Cada uno de estos signos tiene su base estructural y bioquímica. Sin embargo la parte más importante de los cambios durante el envejecimiento no es evidente y alcanza a la mayoría de los órganos y aparatos que conforman nuestro organismo. Una de las piedras angulares de las alteraciones estructurales y funcionales es la pérdida de tejido muscular y, por lo tanto, de las cotidianas y necesarias acciones que este tejido realiza. En efecto, el sedentarismo es una causa, la falta de actividad mecánica de los músculos esqueléticos es un estímulo para que se atrofen las fibras musculares; pero, en sentido contrario, la falta de fuerza muscular lleva al sedentarismo con lo que se cierra el lazo de realimentación positiva, dando lugar a la sarcopenia (pérdida de músculo).

La tendencia al sedentarismo es el gran enemigo a batir. La mejor herramienta que tenemos es la actividad física. La actividad física es un potente estímulo para frenar la atrofia muscular y mantener una tasa de regeneración muscular razonable. Además la actividad física genera efectos multitisulares, desde la disminución de la resistencia periférica al paso de la sangre por los vasos sanguíneos con lo que se atenúa el riesgo de hipertensión arterial, o la mejor distensibilidad del miocardio ventricular, o la acción trófica positiva sobre el sistema nervioso central de los factores neurotróficos producidos durante las contracciones musculares. No obstante, hay que ser prudente en la

prescripción de intensidad y volumen de actividad física, recomendándose una actividad moderada instaurada progresivamente. Actualmente se admite el uso de entrenamiento interválico de alta intensidad, cuando las condiciones del sujeto lo permite, acompañado por la oportuna dosis de entrenamiento de resistencia. Todo ello debe terminar aumentando los niveles de fuerza y velocidad motora en el sujeto senescente.

Por otra parte, los patrones conductuales psico-sociales han demostrado su efecto positivo sobre la salud de la población de más edad. Así en los núcleos poblacionales de mayor edad se ha identificado que las relaciones sociales y familiares y, sobre todo, la persistencia de proyectos mentales a corto y medio plazo, mejoran el bienestar personal y grupal.

Finalmente, el desarrollo de biomarcadores de envejecimiento y la genómica permite una mejor definición del estadio de envejecimiento. En paralelo, se están desarrollando alternativas dietéticas y farmacológicas (fármacos mimetizantes del ejercicio o senolíticos) para retrasar la edad biológica de la población. De hecho, el envejecimiento se puede considerar como la pérdida de velocidad en los procesos genéticos, bioquímicos, celulares, mecánicos, de decodificación y respuesta neuromuscular. La realización de ejercicios físicos que utilicen al menos el 60% de la masa muscular y realizados progresivamente con el propio cuerpo hasta alcanzar sus velocidades máximas, puede retrasar el enlentecimiento de las funciones motoras e intelectuales.

GUIÓN RESUMIDO DE “ENVEJECIMIENTO, SALUD Y DEPORTE (J. RIBAS)

- Envejecimiento.
- Concepto, demografía.
- Cambios evidentes.
- Deshidratación, postura.
- Cambios estructurales y funcionales.
- El desuso como base de las alteraciones en el envejecimiento.
- Músculo esquelético, sarcopenia.
- Riesgo para la salud.
- Beneficios de la actividad física.
- Recomendaciones de actividad física.
- Recursos dietéticos, analíticos, farmacológicos, genéticos y psicológicos para el envejecimiento.

INTERACCIÓN ENTRE MECÁNICA Y BIOLOGÍA: UN DESAFÍO PARA LOS INGENIEROS

*Resumen de la conferencia pronunciada por el
profesor D. Manuel Doblaré Castellano,
el día 9 de mayo de 2024*



La conferencia completa se puede ver en:

[Ciclos Cajasol. Interacción entre Mecánica y Biología: un desafío para los ingenieros.](#)

Desde los albores de la humanidad, los principios de la mecánica se aplicaron al estudio del movimiento de los seres vivos, la estabilización de las fracturas óseas para su correcta consolidación, y, más adelante, analizar el movimiento de órganos como el corazón, o la circulación sanguínea. En las últimas décadas del siglo XX, la combinación de tecnologías como la imagen in vivo, o nuevas técnicas microscópicas junto a los métodos computacionales han permitido simular el comportamiento mecánico de los tejidos y órganos en condiciones sanas y patológicas.

Un descubrimiento crucial, ya intuido a finales del siglo XIX, abrió un nuevo campo de estudio, la Mekanobiología. El objetivo de esta disciplina es comprender el efecto de la deformación mecánica sobre la respuesta celular. Algunas aplicaciones, entre muchas otras, son el mantenimiento del estado fisiológico de tejidos y sistemas (homeostasis), la aparición y prevención de enfermedades como la escoliosis, el diseño de nuevas prótesis y ortesis, el desarrollo de tejidos artificiales (ingeniería tisular), y el efecto de las propiedades mecánicas del microambiente celular en la progresión tumoral. No es de extrañar por tanto que la Mecánica sea hoy una disciplina esencial en la Biomedicina y en la Biología modernas.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN IMAGEN MÉDICA: DE LA ESPERANZA A LA REALIDAD

*Resumen de la conferencia pronunciada por el
profesor D. Juan M. Górriz Sáez,
el día 15 de mayo de 2024*



La conferencia completa se puede ver en:
[Ciclos Cajasol. Inteligencia Artificial en Imagen Médica: de la esperanza a la realidad.](#)

La inteligencia artificial (IA) ha revolucionado la imagen médica, especialmente en el campo de la neuroimagen y la oncología. Este charla analizó los avances, desafíos y perspectivas de la IA en la detección y tratamiento de enfermedades neurológicas mediante técnicas de aprendizaje automático y profundo. Se abordaron problemas como el manejo de grandes volúmenes de datos, la interpretabilidad de los modelos y la validación de resultados. Uno de los principales retos es la naturaleza de la IA como una “caja negra”, lo que dificulta su adopción en entornos clínicos. Para ello, se presentaron técnicas de IA explicable (XAI) que permiten interpretar los modelos y mejorar su confiabilidad. Además, se presentaron aplicaciones en neuro-oncología, donde la combinación de imágenes médicas y datos genómicos facilita la detección temprana de tumores y la personalización de tratamientos. Desde una perspectiva ética y metodológica, se destaca la importancia de la teoría del aprendizaje estadístico (SLT) en la validación de modelos y la necesidad de una IA responsable (RAI) que garantice transparencia y equidad. En el futuro, se requiere un mayor volumen de datos y mejores estrategias de validación para consolidar la IA como herramienta clave en el diagnóstico médico.

EVOLUCIÓN DE LOS CORONAVIRUS: PATOLOGÍA, VACUNAS Y ANTIVIRALES

*Resumen de la conferencia pronunciada por el
profesor D. Luis Enjuanes Sánchez,
miembro de la Real Academia de Ciencias de España,
el día 23 de mayo de 2024*



La conferencia completa se puede ver en:

[Ciclos Cajazol. Tecnologías microbiológicas: convivir con virus y sus vacunas.](#)

Los virus son muy abundantes en el planeta y son grandes generadores de variabilidad, mediante el intercambio de información genética entre ellos y el genoma de las células a las que infectan, y se están reinventando a sí mismos constantemente. Se han descrito hasta el momento siete coronavirus CoV humanos. Los cuatro descubiertos entre los años 1960 y 1980 están atenuados y nos infectan a casi todos inadvertidamente. Sin embargo, los otros tres, el Virus del Síndrome Respiratorio Agudo (SARS-CoV), el virus causante del síndrome respiratorio identificado en el Oriente Medio (MERS-CoV), y el virus causante de la epidemia actual, el Síndrome Respiratorio Agudo y grave (SARS-CoV-2) identificado en el año 2019, han emergido en los años 2002, 2012 y 2019, respectivamente, y los tres causan una elevada patología y la muerte de las personas.

Todos los CoV proceden de los murciélagos. En el caso MERS-CoV y del SARS-CoV-2 hemos determinado su mecanismo de patogenicidad. En el caso del MERS-CoV el vector intermedio entre los murciélagos y las personas han sido los camellos, y en caso del SARS-CoV-2 recientemente (año 2022) se ha mostrado casi con toda seguridad los mapaches están implicados en la transmisión del virus a las personas. La patogenicidad del SARS-CoV-2 se ha relacionado, entre otras cosas, con un corte proteolítico que puede sufrir la proteína de las espículas del virus (S), mediado por una proteasa, la furina, presente en la mayoría de los tejidos del cuerpo humano, lo que facilita la diseminación del virus a cualquier órgano del cuerpo y una enorme variedad de patologías. Se ha especulado mucho sobre el origen del SARS-CoV-2. Por razones geopolíticas algunos mandatarios de países importantes, como EE UU, han indicado durante los años 2019-2023 que el virus procede de los laboratorios del Instituto de Virología de la ciudad de Wuhan, en la parte central de China. Sin embargo, la evidencia científica apoya con abundancia de datos que lo más probable es que proceda de los mapaches, dado que en

las jaulas metálicas del mercadillo de Wuhan, en las que se mantenía a estos animales, se encontró material biológico que contenía un virus con una identidad de secuencial del 99,993 % respecto al SARS-CoV-2 humano.

En la actualidad nos enfrentamos a dos problemas importantes para la eliminación del SARS-CoV-2, y de las consecuencias de la infección por el mismo. El primero es la presencia de este virus en muchos animales domésticos y de otros que circulan libremente por la naturaleza, y en las grandes ciudades. El segundo es la prevalencia de lo que se denomina el Covid de larga duración, una combinación de patologías que pueden aparecer hasta al menos dos años después de la infección de algunas personas. Entorno a un 10-20 % de las personas infectadas con el CoV, que se creían completamente recuperadas de la infección, mantienen una patología asociada a la infección por el SARS-CoV-2, un tema de amplio impacto sanitario, social y económico.

La estrategia más importante para controlar la infección por coronavirus es el desarrollo de vacunas para los mismos, seguido del desarrollo de antivirales. El desarrollo de una vacuna para CoVs humanos patógenos, diseñada en nuestro laboratorio, se basa en la construcción de replicones de RNA derivados de genomas de CoV. Estas vacunas se basan en un replicón RNA altamente seguro (no se puede propagar de una célula a otra), autoamplificable y que expresa varias proteínas del virus. El replicón RNA construido se administró por vía intranasal para promover la inmunidad en las mucosas respiratorias, la vía de entrada del virus. Las vacunas candidatas resultantes indujeron inmunidad esterilizante (que elimina el virus de una infección posterior) en ratones transgénicos humanizados susceptibles a la infección por el virus. Este tipo de RNAs auto-replicativos se construyeron en nuestro laboratorio primero para MERS-CoV, y luego este concepto se aplicó al SARS-CoV-2, mediante la inserción de un conjunto de deleciones de genes en el genoma de este CoV, que fue significativamente distinto del eliminado para generar la vacuna para el MERS-CoV. Estos replicones se han evaluado positivamente en ratones transgénicos susceptibles a estos virus, también proporcionan una inmunidad esterilizante frente a reinfecciones por el SARS-CoV-2.

Así mismo, nuestro laboratorio ha identificado un conjunto de antivirales para el SARS-CoV-2 que rebajan la inducción de edema pulmonar, una de las principales causas de muerte de las personas y los animales, protegiendo de la muerte a más del 80% de los ratones infectados por el virus virulento, algo que resumiremos durante la presentación. La identificación se basó en el descubrimiento del regulador de la conductancia de la transmembrana en la fibrosis cística (CFTR) de un motivo de virulencia en la proteína E del virus y el restablecimiento de los niveles de CFTR reducidos por la infección viral, lo que redujo el edema pulmonar.

***CURSO DE CONFERENCIAS
RASC-FUNDACIÓN AYESA
Horizontes, Ciencia, Tecnología e Ingeniería
para el futuro de la humanidad***

DE UTILIDAD A VENTAJA CUÁNTICA

*Resumen de la conferencia pronunciada por el
profesor D. Antonio Córcoles,
el día 11 de octubre de 2024*



La conferencia completa se puede ver en:

[HORIZONTE Computación Cuántica. De la física teórica a la aplicación empresarial.](#)

En la última década, la computación cuántica ha pasado de ser un campo puramente experimental a permitir que una comunidad de científicos explore y desarrolle algoritmos y aplicaciones cuánticas. Con la madurez creciente de los sistemas cuánticos, su integración en centros de datos de alto rendimiento (HPC) se ha vuelto más común, marcando un primer paso hacia una supercomputación centrada en lo cuántico: recursos cuánticos y clásicos trabajando en paralelo para resolver problemas antes inaccesibles.

En esta presentación compartiré algunos de nuestros avances hacia esa visión, incluyendo desarrollos en hardware y software que permiten flujos de trabajo híbridos cuánticos y clásicos. Mostraré cómo esta integración amplía el alcance computacional en sistemas heterogéneos, y cómo la supercomputación puede habilitar cálculos cuánticos considerados hasta ahora posibles solo con corrección de errores cuánticos.

Estos avances abren un camino prometedor para obtener beneficios prácticos de los computadores cuánticos antes de que dicha corrección madure por completo. También discutiré cómo la computación cuántica puede definir la próxima evolución de la supercomputación y cómo los desarrolladores clásicos ya pueden participar en flujos de trabajo integrados que combinan ambos tipos de recursos.

AGUA Y ENERGÍA: EL ALMACENAMIENTO HIDRÁULICO DE ENERGÍA EN LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

*Resumen de la conferencia pronunciada por el
profesor D. Tomás Ángel Sancho Marco,
el día 23 de octubre de 2024*



La conferencia completa se puede ver en:
[HORIZONTE Agua y Energía. Almacenamiento energético / Red Hidráulica Española - RHE.](#)

España se encuentra inmersa en un proceso de transición energética en el que partiendo de un modelo de producción basado en combustibles fósiles, se alcance un modelo basado en fuentes de generación renovable.

El modelo de producción resultante de la transición energética requiere del desarrollo de nuevas instalaciones de almacenamiento de energía para posibilitar la integración masiva de fuentes de generación de energía renovable no gestionable (ERNNG), principalmente eólica y solar fotovoltaica. Este hecho objetivo, que hasta hace algunos años, era una mera previsión, es hoy en día una realidad que se hace patente en la cada vez mayor participación de las instalaciones de almacenamiento existentes en el sistema eléctrico, o en el curtailment. En este contexto, el desarrollo de nuevas instalaciones de almacenamiento hidráulico de energía –y en especial, de aquellas que utilicen infraestructuras existentes– cobra especial relevancia por sus características específicas, entre las que cabe destacar; su capacidad unitaria, su madurez tecnológica, su contribución a la estabilidad, operación eficiente y flexibilidad del sistema eléctrico, o su polivalencia y versatilidad más allá de dicha operación.

La actualización del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima para el periodo 2023-2030, contempla, precisamente, el impulso de las energías renovables y del almacenamiento para la mejora de su gestión, incrementándose la potencia instalada prevista de eólica y fotovoltaica, así como de la potencia de almacenamiento, introduciéndose una medida específica encaminada al desarrollo de nueva capacidad de almacenamiento hidroeléctrico (medida 1.9), especialmente utilizando embalses existentes. La utilización de embalses existentes tiene múltiples beneficios; en primer lugar, el relativo a la menor inversión necesaria en comparación con una instalación greenfield, en segundo

lugar, el tiempo de desarrollo, que se prevé inferior a los 10 años, y finalmente, el relativo al impacto ambiental.

En línea con los objetivos anteriores, desde la Dirección General del Agua se ha elaborado un marco general para el desarrollo de nuevas instalaciones de almacenamiento en centrales de bombeo utilizando embalses de titularidad estatal, que se ha denominado “Programa Nacional de Almacenamiento Hidráulico de Energía” (PNAHE).

ROBÓTICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL: DE LA INVESTIGACIÓN A LAS APLICACIONES

*Resumen de la conferencia pronunciada por el
profesor D. Anibal Ollero Baturone,
el día 13 de noviembre de 2024*



La conferencia completa se puede ver en:

[Robótica e Inteligencia Artificial en Europa: de la investigación a las aplicaciones.](#)

En la primera parte se puso de manifiesto que la Robótica involucra interacción física, integrando funciones de control de un sistema mecánico, percepción y planificación, mientras que la Inteligencia Artificial trata sobre programas para procesamiento de información involucrándose capacidades cognitivas y de aprendizaje. Se abordó la Inteligencia Artificial Generativa y el empleo de modelos grandes de lenguaje, poniendo manifiesto el interés de combinar modelos físicos con el entrenamiento mediante datos.

A continuación, se trató el empleo de equipos robots, y en particular la aplicación conjunta de distintos tipos de robots manipuladores, humanoides y robots aéreos, presentándose experimentos de la red europea de Excelencia en Robótica e Inteligencia Artificial euROBIN de la que forma parte el laboratorio de Robótica GRVC de la Universidad de Sevilla.

La parte siguiente estuvo dedicada a introducir los robots “soft” (blandos o deformables) y la bio-inspiración como tendencias para hacer más segura la interacción con las personas y se presentaron robots aéreos bio-inspirados, de ala batiente.

Finalmente, se presentó la robótica aérea de manipulación para realizar trabajos en altura, sin riesgo para las personas, y se introdujeron algunas aplicaciones incluyendo la inspección y mantenimiento de infraestructuras tales como puentes, viaductos y líneas eléctricas.

Se concluyó introduciendo propuestas recientes para aplicar Inteligencia Artificial Generativa en robótica y métodos de aprendizaje de los robots, incluyendo aprendizaje basado en la observación y medida de movimientos de seres vivos, tales como pájaros, para la planificación y el control de los mencionados robots aéreos de ala batiente.

CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUA EN ESPAÑA: NECESIDAD DE ADAPTACIÓN

*Resumen de la conferencia pronunciada por el
profesor D. Jorge Olcina Cantos,
el día 20 de noviembre de 2024*



La conferencia completa se puede ver en:
[Medio Ambiente. Ecología y Sostenibilidad del Planeta. Tecnologías para la sostenibilidad.](#)

El proceso actual de cambio climático por efecto invernadero de causa antrópica es una evidencia científica preocupante. La Tierra, sus tierras y sus mares, es en la actualidad más cálida que hace cuatro décadas. Y ese calentamiento se ha producido de forma rápida desde 1980, resultando muy notable ese incremento térmico desde 2010. El clima terrestre tiende a ser en las próximas décadas un clima térmicamente menos confortable, con alteraciones regionales de las precipitaciones y con desarrollo más frecuente de episodios meteorológicos extremos, porque en una atmósfera más cálida los movimientos de las masas de aire para intentar encontrar un equilibrio en el balance energético del planeta son más rápidos e intensos. En España, el litoral mediterráneo es la región que manifiesta de forma más evidente los efectos del proceso de calentamiento climático. Los cambios principales en los elementos climáticos que ya se registran en esta parte de España se pueden sintetizar en un incremento térmico en las máximas y mínimas y unas variaciones estacionales y de intensificación horaria de las precipitaciones. La planificación y gestión del agua en España se está viendo afectada por los efectos registrados del proceso actual de cambio climático. El paradigma tradicional basado en una política de continua oferta de agua ya no se ajusta a las previsiones de disminución de caudales que señala la modelización climática e hidrológica. La garantía de la seguridad hídrica, principio rector de la planificación, como señala la Ley de Cambio Climático de 2021, requiere de la incorporación de nuevos recursos hídricos que permitan hacer menos dependiente la propia gestión del agua de las precipitaciones. La eficaz gestión de la demanda, la incorporación de aguas regeneradas con alto nivel de depuración, la inclusión de las aguas pluviales para usos urbanos y de ocio y el uso de aguas desaladas en zonas de litoral con finalidad principal de abastecimiento se presentan como alternativas viables frente al desarrollo de grandes obras públicas hidráulicas que se demuestran poco eficaces en condiciones de sequía.

***ENTREGA DE LOS PREMIOS A INVESTIGADORES
JÓVENES CORRESPONDIENTES AL AÑO 2023***

***Acto celebrado en el salón de actos de la
Real Maestranza de Caballería de Sevilla,
el día 12 de junio de 2024***

***PALABRAS DEL PRESIDENTE
DE LA ACADEMIA EXCMO. SR.
D. MIGUEL ÁNGEL DE LA ROSA***



*En el acto de entrega de los
PREMIOS A INVESTIGADORES JÓVENES 2023,
celebrado en la Real Maestranza de Caballería de Sevilla
el 12 de junio de 2024*

Excmo. Sr. D. Santiago de León y Domecq, Teniente de Hermano Mayor de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla, Excmo. Sr. D. José Carlos Gómez Villamandos, Consejero de Universidad, Investigación e Innovación de la Junta de Andalucía, Autoridades, académicos, premiados, señoras y señores:

El premio a los Jóvenes Investigadores sevillanos que hoy entregamos es, sin duda, una manifestación ejemplar de la colaboración entre dos instituciones emblemáticas de la ciudad, como son la Real Maestranza de Caballería de Sevilla y la Real Academia Sevillana de Ciencias. Ambas entidades, cuyas responsabilidades incluyen el fomento y el desarrollo de la cultura –ya sea mediante la promoción del arte, en el caso de la Maestranza, ya sea mediante el avance de la ciencia, en el caso de la Academia–, son depositarias y representativas de una tradición bien arraigada en la ciudad –ya sea a lo largo de varios siglos, en el caso de la Maestranza, ya sea a lo largo de apenas cuatro décadas, en el caso de la Academia–.

En efecto, la Maestranza acredita un legado centenario frente al recorrido histórico mucho más breve de la Academia, pero ambas pueden presumir con orgullo de su enorme respeto social, fruto inequívoco de los muchos logros y aciertos que con paciencia atesoraron los tenientes de hermano mayor y presidentes que nos precedieron en la gestión. Aprovecho para anunciar que el próximo año, 2025, se cumple el cuadragésimo aniversario de la fundación de la Real Academia Sevillana de Ciencias, y para invitar al Teniente de Hermano Mayor y al Consejero, queridos Santiago y José Carlos, que hoy nos acompañan en la mesa, que nos acompañéis asimismo en la celebración de la efeméride.

Ambas instituciones lucen el término “real” como primer vocablo de su nombre respectivo –Real Maestranza, Real Academia–, subrayando con ello el reconocimiento de la Casa Real no solo al prestigio y reputación de las mismas, sino también al compromiso de servicio a la sociedad sevillana. Ambas entidades son ejemplos elocuentes de la importancia de la colaboración entre tradición y vanguardia, entre el pasado y el presente, en la promoción del conocimiento y el enriquecimiento cultural.

Me gustaría destacar aquí hoy, en esta casa que con tanto cariño nos acoge cada año, los indudables aspectos distintivos de ambas instituciones, pero haciendo emerger sobre ellos un punto clave de convergencia, hoy simbolizado por los premios. La Maestranza de Caballería, por un lado, se sitúa entre las instituciones que defienden y promueven una forma particular de arte tan arraigada en la tradición española como es la tauromaquia. Es innegable que la tauromaquia constituye una manifestación artística y épica sin igual, una pieza esencial en el rico puzzle del patrimonio cultural de España, llegando a ser reconocida con todo merecimiento como la Fiesta Nacional.

Dos de los más grandes maestros de la pintura española, Francisco de Goya y Pablo Picasso, recogieron en sus obras la fascinación por la fiesta de los toros. El primero, Goya, se centra en la fuerza expresiva del animal en diversas escenas de corridas en la serie de grabados *Los Toros de Burdeos*, en tanto el aspecto más lúdico parece dominar en la serie de grabados *La Tauromaquia*. Picasso, por su parte, veía en los toros, además de las posibilidades plásticas de la corrida, una manifestación de españolidad. La crudeza del enfrentamiento animal, entre el toro y el caballo, sobresale en su obra *Corrida de Toros*. El año pasado, 2023, el Museo Goya de Castres (Francia) organizó una exposición titulada “Goya en la mirada de Picasso” con objeto de resaltar los vínculos que unen la obra de los dos grandes maestros del arte español, y, más concretamente, la influencia que tuvo Goya en la producción de Picasso.

Federico García Lorca, el renombrado poeta y dramaturgo español, también exploró el tema de la tauromaquia en su obra poética. Para Lorca, la tauromaquia representa un evento cultural al tiempo que simboliza aspectos más profundos, como las tensiones entre la tradición y la modernidad. En su poesía, Lorca utiliza metáforas y simbolismo taurino para explorar temas como la pasión, la tragedia y la identidad española. Su interés en la tauromaquia se manifiesta en poemas como *Llanto por Ignacio Sánchez Mejías*, una elegía dedicada al torero que murió en la plaza de toros como símbolo de la lucha del hombre contra las fuerzas de la vida y la muerte. La imagen del torero en la arena, enfrentándose al toro, se convierte en una metáfora poderosa de la existencia humana y la inevitabilidad de la muerte. A través de su poesía, Lorca captura la intensidad emocional y la belleza trágica de la tauromaquia, al tiempo que reflexiona sobre su significado más profundo en la cultura española.

La Academia de Ciencias, por otro lado, tiene como objetivo fundacional el fomento y desarrollo de las ciencias en todas sus disciplinas, abarcando un amplio espectro del conocimiento humano. Su labor, el cultivo de la ciencia y sus aplicaciones, refleja así el afán de la Academia por el progreso intelectual y la búsqueda del saber en todas las ramas del árbol de las ciencias.

A pesar de las diferencias entre ambas instituciones en cuanto a enfoque y área de interés, es precisamente en actos como este donde se encuentran y refuerzan en uno los dos ámbitos del saber: el arte y la ciencia. Este acto de entrega de premios científicos en la Maestranza representa una celebración de la diversidad cultural y del conocimiento humano en todas sus manifestaciones, subrayando la necesidad de ambos para el avance equilibrado de la civilización y la convivencia en sociedad.

De particular interés es el reconocimiento de que tanto el arte como la ciencia comparten un elemento fundamental inherente a ambas: la creatividad. Dicha conexión es el origen de la palabra “científico”, como algunos me habéis oído recientemente, acuñada por el británico William Whewell a mediados del siglo XIX. Para referir la labor de aquellos dedicados a observar la naturaleza y realizar experimentos, Whewell eligió el término “científico” (en inglés, scientist) por analogía con “artista” (en inglés, artist), destacando así la importancia de la creatividad en ambas disciplinas. Tanto el artista como el científico se distinguen por su capacidad de generar nuevas ideas, de explorar lo desconocido y de reinterpretar el mundo que les rodea. La creatividad es el motor que impulsa tanto la expresión artística como el avance científico, siendo un elemento esencial en la labor de ambos. El nexo entre la Maestranza y la Academia, entre el arte de la tauromaquia y el cultivo de las ciencias, emerge, por tanto, de esta noción compartida de la creatividad como elemento único y esencial en el trabajo de artistas y científicos.

En este contexto, permitidme un breve inciso para reseñar en corto un proyecto que actualmente estamos desarrollando desde la Academia en colaboración con la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Sevilla, sobre todo hoy que nos acompaña su decano. El artista trabaja sobre la naturaleza visible, pinta o esculpe al dictado de lo que tiene delante de sus ojos tras pasar por el filtro interpretativo de la mente, ya sea realista, poético o fantasioso. El científico, sin embargo, puede operar sobre la naturaleza fuera del alcance del ojo desnudo, mas recurriendo a instrumentos de alta sofisticación para hacer visible lo invisible. Y aquí es donde surge un punto de encuentro apasionante, cuando el científico, con sus microscopios y telescopios, facilita al artista la revelación de lo infinitamente pequeño o infinitamente grande, de lo que hasta entonces quedaba inaccesible a su reflexión. En particular, el reto que lanzamos a los artistas en este proyecto, a profesores y alumnos, es cómo interpretar la naturaleza ignota que la ciencia revela y torna asequible. El tema de este año es la muerte programada de las células, que se sacrifican y auto-inmolan en pro de la comunidad para evitar el crecimiento desmesurado del cuerpo. Las obras se expondrán en julio-septiembre en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología de la Coruña, coincidiendo con el Congreso de la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular, principal patrocinador del proyecto. Gracias, Daniel.

Arte y ciencia comparten un impulso común hacia la exploración, la innovación y la búsqueda de la verdad. Es el mensaje principal que quisiera transmitir a los jóvenes científicos que hoy premiamos: “Al entrar cada día en el laboratorio, no os dejéis abatir por la rutina de la cadena de montaje en una fábrica de coches. Antes al contrario, cultivad la creatividad y la imaginación, el entusiasmo y la alegría del artista en vuestro diario devenir entre reactivos y balanzas, probetas y pipetas”.

Hoy reconocemos los éxitos de tres jóvenes que han realizado la mayor parte de su labor investigadora en Sevilla. Son Laura Pastor, Sara Bachiller y Francisco Baena. La primera, Laura, con el Premio de la Academia; los otros dos, Sara y Francisco, con los premios de la Maestranza. A los tres mis felicitaciones, que hago extensivas a vuestros respectivos grupos de investigación, a sus directores, y a la Universidad de Sevilla, a la que los tres pertenecéis.

Como hemos oído, las investigaciones de Laura, Sara y Francisco están dirigidas, respectivamente, al desarrollo de procesos catalíticos novedosos para la producción de compuestos de interés energético en el ámbito de una economía sostenible, al estudio del sistema nervioso central y su papel clave en las respuestas inflamatorias y enfermedades como el alzheimer, y al avance de nuevas tecnologías de remediación ambiental, como la captura de dióxido de carbono o la eliminación de residuos en minería.

Permitidme, para finalizar, animaros a continuar vuestra exitosa carrera científica, y a ponerlos como meta el pertenecer algún día a la Real Academia Sevillana de Ciencias. Así lo hicieron muchos de los jóvenes premiados en ediciones anteriores. Actualmente, nueve de los treinta y dos académicos numerarios que componen la institución fueron distinguidos con el premio que hoy vosotros estáis recibiendo. ¡Es vuestro reto; la Maestranza y la Academia siempre estarán con vosotros!

Muchas gracias.