

EDITORIAL

La competitividad

En nuestro anterior editorial hicimos hincapié en la relación de interdependencia existente entre la innovación tecnológica y la competitividad. No nos arrepentimos de haberlo hecho, pero tampoco quisiéramos dejar sin señalar algunos matices que contribuyen a un inducto y falso reduccionismo cuando se plantea la competitividad como la gran legitimadora del gasto dinerario en innovación tecnológica y hasta en la misma investigación científica. Para justificar los gastos en I+D resulta argumento fácil y convincente señalar la riqueza que a los países desarrollados proporciona su investigación científica y tecnológica. O dicho de otra forma, la relación existente entre la innovación tecnológica y la competitividad.

Dos observaciones conviene echar por delante:

1ª la I+D no tiene su más fundamental legitimación en los aumentos de renta y de mercado exterior. Más importante que eso es el hecho de que la ciencia pertenece con singular vinculación a la cultura colectiva de un país, y es además la garantía de la existencia de unos niveles facultativos en los estudios superiores que nos permiten entrar tranquilos en un quirófano o atravesar un puente seguros de que no habrá de hundirse a nuestro paso.

2ª la relación entre la innovación tecnológica y la competitividad tampoco es tan exclusiva como se viene proclamando obsesivamente desde los años ochenta en cientos de libros y miles de artículos. Fue la respuesta a los cambios producidos en el ámbito empresarial durante los años setenta, pero han pasado ya varias décadas y seguimos en lo que algunos llaman la "locura innovadora" con una verdadera invasión de libros y artículos sobre gestión de la innovación. La competitividad es una dimensión productiva que desborda ampliamente a la mera inversión tecnológica. No se trata de gastar más, ni siquiera de gastar mejor en I+D+i. Sencillamente hay aspectos de la competitividad que no tienen nada que ver con gasto en innovación.

Conviene profundizar en esta segunda observación porque aquí también la expresión latina *Ne quid nimis* (nunca demasiado) tiene especial aplicación. Los excesos y las obsesiones en este terreno pueden generar no sólo una falsa cultura empresarial, sino hasta una cierta perversión de la cultura en general. Afortunadamente los que escriben y teorizan sobre estas cosas hace ya tiempo que insisten en que la competitividad empresarial tiene como fundamento primordial la inmersión en una cultura de la innovación que permite detectar los cambios en la sociedad y en las condiciones del sistema productivo. La innovación tiene como aspiración explotar las oportunidades que ofrecen los cambios. Todo esto supone que la cultura en general y la cultura empresarial en particular, en signo anterior al de la mera tecnología, tiene un importante papel que cumplir en la identificación del cambio social y en la observación de lo que sucede en el sistema productivo.

Todo esto indica también que la competitividad es un término de una suposición muy plural. Queremos decir que no existe un único protagonista-tipo de la competitividad, lo que significa que tampoco existe un modelo urbano y universitario de "competidor". Hay diferentes tipos de protagonistas, aunque a decir verdad, algunos son más trascendentes que otros.

En efecto, la palma del género se la lleva el "emprendedor" con base científico-tecnológica y con producto de gran valor añadido. Con frecuencia es joven, con recursos modestos, perspectivas futuristas y crea una empresa que recuerda al evangélico grano de mostaza que llega a ser árbol frondoso. Silicon Valley no ha sido una historia casual e irrepetible. Pero tampoco podemos tipificar las características del fenómeno. ¿De dónde salen esta clase de protagonistas? ¿De la Universidad? ¿De las escuelas de maestría? ¿Del *know-how* de una empresa avanzada en la que se ha trabajado? ¿Es estudiable el fenómeno?

Porque pasan cosas raras en este país nuestro. Por ejemplo, las empresas demoscópicas parecen detectar en

los jóvenes españoles un porcentaje en torno al 70% que tienen como máxima aspiración el ser funcionarios de las Administraciones Públicas. Tienen todo el derecho; tan sólo tratamos de constatar que la masa crítica necesaria para generar la correspondiente proporción de emprendedores es en España bastante exigua. Y sin embargo resulta que el Instituto de Crédito Oficial (ICO) ha tenido que aumentar sus créditos de 3.000 millones de euros en 2005 a 7.300 en 2007. Y ha financiado a 120.000 nuevos empresarios, sobre todo jóvenes, en ese tiempo. Algo semejante viene haciendo La Caixa aunque más orientada a emprendedores tecnológicos.

Otra clase de innovadores, también importante, es la de los "incrementales", es decir, la de los pertenecientes a empresas asentadas que han de programar mejoras en los productos ya introducidos en el mercado. Su formación y habilidad puede ser más varia y desarreglada, pues muchas de las mejoras son con frecuencia de mero diseño o de manejabilidad del producto. Pueden tener una relación mínima con la ciencia y la tecnología.

Los innovadores "de negocio" tampoco tienen cosa que ver con la ciencia y la tecnología como no sea un uso notable de la inteligencia y de la creatividad. Sus hallazgos se refieren a la distribución de un producto, a la financiación de su venta, a las formas de pago, a la mejora en la asistencia técnica, a la localización de mercados remotos, a la identificación de necesidades todavía no satisfechas o a la sugerencia de necesidades nuevas... En España es en esta clase de innovación donde se producen los casos más notables de genialidad. Y de osadía. De osadía geográfica, por ejemplo, como es el caso de una señora levantina, sin calificación especial, que viaja a una remotísima aldea de las montañas chinas para encargarse de porcelanas de una determinada dinastía cuyo oficio sólo allí se conserva. Antes de regresar lo ha vendido todo en la propia Asia. Y lo hace desde los tiempos en que China no se había abierto todavía. Hay que tener un cierto sentido del mundo, que no todo el mundo tiene.

Y hay una innovación "de invención" que tampoco tiene que ver con el descubrimiento científico o tecnológico ni surge de los centros de investigación públicos o privados. Este apartado puede tener su importancia, pues no en vano suelen ser españoles los ganadores del Salón de Inventores de Ginebra. A veces se trata de ingenios o artefactos meramente curiosos sin proyección fungible, pero otras veces se trata de hallazgos susceptibles de producción en serie y del consiguiente aumento de bienes de consumo. El éxito en este terreno puede ser espectacular. En España tenemos los dos casos notables que todo el mundo conoce y admira: la fregona y el chupa-chups.

A decir verdad parece advertirse en este terreno una desproporción entre los hallazgos de invención y los

logros empresariales. En el supuesto de que esta clase de competitividad pasa en buena medida por la creación de pequeñas empresas, es preciso advertir que en España el papeleo administrativo para la creación de una nueva empresa es abrumador: dos licencias municipales; tres Registros (mercantil, propiedad inmobiliaria, industrial); tres trámites en materia fiscal (impuesto sobre bienes inmuebles, impuesto de actividades económicas, declaración censal); cinco trámites en materia laboral (afiliación y alta en el registro de trabajadores, inscripción de la empresa en la seguridad social, afiliación y alta en el Régimen General de la Seguridad Social, comunicación de apertura del centro, comunicación de las contrataciones al INEM). Estas son las generales, pero quedan otras todavía más especiales. Sinceramente creemos que las actuales administraciones estatales, autonómicas y municipales están seriamente preocupadas por el fomento de la competitividad. En ese supuesto respetuoso rogamus a todas ellas que se tomen en serio el alivio del futuro emprendedor. Que pregunten cuánto tiene que hacer un norteamericano para abrir una empresa.

De todo este escrito sólo queremos sacar dos conclusiones:

1ª El tema de la competitividad no es incumbencia exclusiva del científico y del tecnólogo, aunque lo parece, a juzgar por la frecuencia con que se justifican las aplicaciones presupuestarias para I+D en razón de los retornos económicos de una futura exportación. Científicos y tecnólogos parecen los responsables de la balanza de pagos. Y en cierto modo es verdad, siempre que se admita que los científicos o tecnólogos principalmente culpables son los que no existen, los que todavía faltan en el exiguo sistema de I+D español.

2ª La cultura de la innovación como base de la competitividad constituye un término o un concepto que puede estar manoseándose en exceso, mitificándose al emprendedor como producto de un nuevo humanismo y planteándose reformas de educación cuya supuesta necesidad choca con la realidad. Si la cultura de la innovación debe aplicarse a la observación del cambio social y del cambio en las condiciones de la producción, así como a la evolución del fenómeno humano, no parece que la docencia y la didáctica de nuestra futura Universidad o de las otras enseñanzas deban ser muy diferentes de las que hemos tenido. Por supuesto, mejoras cualitativas todas y bienvenidas. Por supuesto habrá que saber inglés e informática, y mucho más de matemáticas. Pero lo de las matemáticas ya nos lo exigían los hombres ilustrados de finales del XVIII. La realidad es que nuestros genios emprendedores, en nuestra España, no salen de nuestros centros de enseñanza, sino de su padre y de su madre. ■



Gas Experis[®], pureza asegurada hasta la última molécula



Mark Sistem, científico responsable de investigación y desarrollo, examina las macro características de una botella con una sonda de fibra óptica para garantizar que las mezclas Experis sean los gases de calibración más estables que existen.

Las mezclas de calibración de la línea de gases de alta pureza Experis[®] son las más estables del mercado. Investigadores como Mark Sistem, que combinan conocimientos de metalurgia, química y física de superficies, contribuyen a garantizar estos altos niveles de estabilización.

Cada mezcla de gases Experis posee su propio y exclusivo tratamiento superficial para asegurar la estabilidad de la mezcla y así prolongar su fecha de caducidad. Si bien el tratamiento perfecto aún no existe, Mark nos ayuda a inventarlo. "Sólo puedes tener verdadera confianza en tus resultados si puedes confiar en la fiabilidad de tu gas de calibración" comenta Mark. Es una pasión por el éxito ampliamente reconocida. Los gases Experis ya son utilizados

en siete centros de investigación de la Unión Europea y en cinco de los principales fabricantes de equipos analíticos.

Para dotar a sus análisis de un alto nivel de confianza, llámenos al 93 290 26 00.

Disfrute de la tranquilidad que le ofrece Carbueros Metálicos – Grupo Air Products – visite nuestra web www.carbueros.com/estabilidad y regístrese para entrar en el sorteo de uno de los 50 MP3.

 **CARBUEROS METÁLICOS**
Grupo Air Products

Director: Jesús Martín Tejedor

Editor: Enrique Ruiz-Ayúcar

Consejo Editorial: Antonio Bello Pérez, Luis Guasch, María Arias Delgado, Ismael Buño Borde.



Junta de Gobierno de la Asociación Española de Científicos (AEC).

Presidente: Jesús Martín Tejedor

Vicepresidente: Ismael Buño Borde

Secretario General: Enrique Ruiz-Ayúcar

Vocales: María Arias Delgado, Antonio Bello Pérez, José Luis Díez Martín, Pascual Balsalobre, Fernando García Carcedo, Armando González-Posada, Sebastián Medina, Felipe Orgaz Orgaz, Jesús María Rincón, Jaime Sánchez-Montero, Alfredo Tiemblo, Antonio Cortés Ruiz, Luis Guasch Pereira, José María Gómez de Salazar, Marcial García Rojo, Celia de la Cuadra.

Edita: Asociación Española de Científicos. Apartado de correos 36500. 28080 Madrid.

ISSN: 1575-7951. Depósito legal: M-42493-1999. Imprime: Gráficas Mafra

Esta revista no se hace responsable de las opiniones emitidas por nuestros colaboradores.

Sitio en la Red: www.aecientificos.es

Correo electrónico: aecientificos@aecientificos.es

ÍNDICE

¿Es la Agricultura Ecológica una moda o responde a una necesidad?

JAVIER TELLO MARQUINA

5

Los sistemas no lineales complejos y el futuro de la Física. El conflicto entre herramientas y conceptos. ANTONIO RUIZ DE ELVIRA

7

Agricultura, medio ambiente y desarrollo social. Un proyecto agroenergético integrador en Uruguay. ANA PIEDRA BUENA, ANTONIO BELLO

10

Nanotubos y nanofibras de carbono.

JOSÉ MARÍA GÓMEZ DE SALAZAR,

MARÍA ISABEL BARRENA PÉREZ

14

Nanocompuestos: oportunidades y retos.

BUSTERO I., MARKAIDE N., GARMENDIA N.,

GARCÍA A., BARCENA J., OBIETA I.

20

En el centenario del Nobel a Cajal: el mérito y la vigencia de una trascendental obra científica. ADOLFO TOLEDANO,

MARÍA ISABEL ÁLVAREZ, ADOLFO TOLEDANO-DÍAZ

24

Trasplante celular y terapia regenerativa con células madre. FELIPE PRÓSPER

32

Acto de entrega de las placas de honor de la Asociación. 17. XI. 2006.

• Federico de Isidro Gordejuela

• Gerardo Delgado Barrio

• Álvaro López Ruiz

• HISPALYT

• Arte, Ciencia y Naturaleza

JESÚS MARTÍN TEJEDOR

41

¿Es la Agricultura Ecológica una moda o responde a una necesidad?

AUTOR: JAVIER TELLO MARQUINA

En algunos tratados de Agricultura se restringen los escritos antiguos a un capítulo introductorio y poco más. Parece, cuando no se indica expresamente, que los libros antiguos sobre Agricultura están más que superados. Aparentemente esto es así. Y sólo es una apariencia, puesto que, por ejemplo, muchas prácticas agrícolas actuales no han variado desde que Junio Moderato Columela, en el siglo I D. d. C., las describió. Tal es el caso del cultivo de cereales de secano en nuestro país.

Se ha escrito que todos los conocimientos sobre los seres vivos, acumulados desde los albores del hombre hasta el Siglo de las Luces –cuando comienza la ciencia experimental– proceden del saber campesino, que generó la producción de alimentos, de fibras vegetales y animales, madera y un largo etcétera. Y fueron los modos de cultivar los que permitieron acumular conocimiento y experiencia. Así, entre otros, podrían señalarse: los ciclos de las plantas; la relación de los cultivos y sus diferentes fases con el suelo, el agua o el abono; las herramientas adecuadas para cada labor; la conservación de la cosecha; la transformación de los productos vegetales (harina de las semillas, por ejemplo); la domesticación de animales y sus utilidades (carne, leche, lana, transporte, etc.). ¿Podría imaginarse el gran paso que supuso la selección de semillas para una mayor y mejor producción? Difícilmente se piensa en estas cosas en las sociedades de países más desarrollados. Se ha tachado de conservadoras a las sociedades agrícolas, y no precisamente en el sentido más positivo del término.

Cuando tales afirmaciones se hacen pública o privadamente no se tiene en cuenta que pese a todo el progreso que se ha acumulado en el siglo pasado, el labrador sigue siendo consciente de que sus cosechas dependen más del clima o del “tiempo” que de su propio trabajo. Por eso vivieron siempre mirando al cielo y observando la dirección del viento. Los cambios en Agricultura son muy lentos, tanto para que los agricultores los acepten como para mantenerlos con su utilidad. Piénsese a tal efecto en la humilde y simple azada: ¿Cuántos milenios tiene de uso sin variar sustancialmente ni su forma ni sus funciones? ¿Es prescindible su uso incluso por los urbanitas que descubren las delicias de un jardín propio? ¿Es, entonces, la azada un símbolo de progreso? Es conveniente meditar sobre estos hechos para intentar com-

prender la que significa la vida campesina y tener presente que el “principio de precaución” es algo estrechamente unido al carácter de las gentes del campo. Y no en vano. Actividad agraria que una parte de la sociedad a la que, sin gratificación compensatoria, se le exige que mantenga la belleza y la paz del campo, usando para ello los detritus orgánicos, más o menos transformados, de las ciudades. Y es cierto que los modelos económicos al uso no tienen en cuenta costos como los que podrían desprenderse de la belleza y la paz del campo, ni tampoco de aquellos otros que señalan a las plantas como sumideros de los contaminantes ambientales o de los detritus urbanos.

De alguna manera, la Agricultura Ecológica promueve y hace suyas muchas de las actividades campesinas antiguas que una orientación reciente –no más de 70 años– llevó a la agricultura a escorarse en una dirección: producir más, sin tener como premisa fundamental que la agricultura es un sistema y hay que tratar cualquier cambio con sentido holístico. En otras palabras mantener, por generaciones, la fertilidad de los campos. Y nadie pone en duda que esto sirvió para incrementar el bienestar de las sociedades occidentales, siendo en España donde este proceso incrementó la dieta calórica por habitante de manera considerable y rápida.

¿Cómo y por qué empezaron a aparecer movimientos ciudadanos que reclamaban un equilibrio entre la actividad agrícola, su entorno y la sociedad humana consumidora? Lo que, en esencia, sirve de estandarte a las diferentes denominaciones que aquí se han recogido como Agricultura Ecológica. El famoso libro de Raquel Karson, la “Primavera silenciosa”, reflexionaba sobre lo que se había perdido de belleza en los campos y se había ganado en incertidumbre sobre la seguridad alimentaria de los productos agrícolas. Un cuarto de siglo después, otra impresionante obra, “Nuestro futuro robado”, daba base científica y técnica a reflexiones, casi poéticas, de Karson.

Conviene repasar con algunos aspectos agronómicos la justificación de estas tendencias agrícolas en boga. Desde que Liebig realizó sus experimentos con abonos químicos de síntesis a principios del siglo XX, se fue abandonando el uso de la materia orgánica en los campos. Y el sistema agrícola comenzó a desequilibrarse. La materia orgánica es la base de la fertilidad de los suelos.

El sistema ha llegado al extremo de sustituir el suelo por las técnicas que se denominan como “cultivos hidropónicos” o “cultivos sin suelo”. Es decir, sobre sustratos inertes se cultivan las plantas que son alimentadas con soluciones nutritivas elaboradas a base de abonos de síntesis. Independientemente de otras consideraciones agronómicas, el primer problema que esto plantea es la gestión de esos residuos agrícolas, sean inertes u orgánicos. Gestión que en algunos casos están sin resolver, con las consecuencias sobre el entorno que puede imaginar el lector.

Especialmente delicado es el problema en aquella agricultura intensiva (cultivos bajo abrigo, por ejemplo) donde los compradores del producto final exigen limpieza del campo o de la dinámica de los parásitos que enferman a las plantas que hacen necesaria la eliminación de residuos de cosecha. Un ejemplo: la limpieza de las 25.000 ha de invernadero de Almería le costaron al contribuyente en torno a los 15 millones de euros hace más de un lustro. Con poco que se piense, todos los años es necesario limpiar el campo. Son, en este caso, los ayuntamientos de los pueblos de Almería quienes han puesto en marcha un sistema de gestión de residuos, que, excepción hecha de los sustratos inertes tienen una utilidad secundaria, que no pasa en su totalidad por donde debía pasar, si se piensa desde un punto de vista holístico y agronómico, y restituir al suelo los restos vegetales de cosecha. Es decir, materia orgánica.

Abordemos ahora la naturaleza holística de la agricultura desde el punto de vista de los pesticidas. En 1947, Müller recibió el premio Nobel por haber descubierto en 1939 las propiedades insecticidas del diclorodifenil tricloretano (DDT). Muchas vidas se salvaron con el primer insecticida de síntesis, al poder disminuir drásticamente las poblaciones de insectos transmisores de enfermedades, tales como el paludismo. Notable fue, igualmente, su papel en el control de plagas de los cultivos. Se inauguraba así la predominancia de pesticidas de síntesis abriendo una esperanza soñada por el hombre desde, posiblemente, los albores de la historia: controlar las plagas de los cultivos.

Las expectativas alcanzaron hasta acariciar la idea de la erradicación de los parásitos. No fue así. Pronto surgieron dos hechos que han marcado a los pesticidas: la aparición de resistencias por parte de los parásitos a los químicos y la emergencia de plagas anteriormente no conocidas, por un lado; y, por otro, las perniciosas derivaciones sobre la vida, incluyendo la salud de los seres humanos. Salud que no se ciñe a la producción de enfermedades, si no que alcanza hasta modificación del comportamiento hormonal, hecho este último que empezó a aparecer en los textos científicos más de 40 años después del uso masivo del DDT, cuando el insecticida

llevaba más de 15 años prohibido en algunos países, donde todavía se detectaban ínfimas cantidades en las aguas. Este comportamiento de las moléculas químicas despertó en las sociedades desarrolladas una preocupación que no ha dejado de crecer, exigiendo con contundencia creciente una limitación de uso que garantizase una seguridad alimentaria. Es notorio como una modificación masiva del sistema agrario ha propiciado un desequilibrio que ahora trata de corregir. Y este es un punto en el que la Agricultura Ecológica incide, pero sería deseable que no lo abanderase como una moda.

Si se aborda el sistema agrario desde el punto de vista de otro de sus componentes, la manipulación del material vegetal, el análisis de los últimos 60 años pone de manifiesto como las metas pretendidas no se alcanzaron. Otro premio Nobel en 1970, concedido en esta ocasión a Borlaug, realizaba la propuesta de acabar con el hambre en el mundo en base a las nuevas variedades de cereales, mucho más productiva cuando se modificaba la forma de cultivar (abonados, maquinaria agrícola, etc.).

La uniformización del material vegetal en amplísimas zonas cerealistas del planeta conllevó la desaparición de numerosas selecciones de plantas, realizadas por los agricultores durante milenios de agricultura. Como contrapartida, los campesinos comenzaron a perder la propiedad de las semillas, factor primario de producción que les correspondía por derecho propio. Pero con todo, fueron las plagas y enfermedades las que se encargaron de poner de manifiesto que la gigantesca uniformización no los había tenido en cuenta, y ello se tradujo en potentes epidemias donde antes no se habían expresado mediante sus indeseables daños.

En el primer tercio del siglo XX algunos científicos sugerían que con los genes de resistencia a los patógenos en las plantas cultivadas se alcanzaría la inmunidad. Los años han puesto en evidencia la capacidad de cambio de los patógenos, que parece ilimitada. Hoy, las plantas transgénicas se sustentan en el mismo principio, únicamente las técnicas científicas les permiten manipular genes muy alejados de la especie vegetal que pretenden mejorar incorporándolos a su genoma. De nuevo, un principio de precaución debería permitir reflexionar sobre nuevas modificaciones, pero la realidad vivida es tozuda y la evaluación en el tiempo parece, ahora más que antes, necesaria.

En este punto, la Agricultura Ecológica tampoco debería ser una moda, impulsada desde ámbitos más o menos interesados. Quizás debería, para encontrar satisfacción a sus principios de buenas prácticas agrícolas iniciar una búsqueda histórica que sirva de partida para sus planteamientos. ■

Los sistemas no lineales complejos y el futuro de la Física. El conflicto entre herramientas y conceptos

AUTOR: ANTONIO RUIZ DE ELVIRA
Universidad de Alcalá

La Física se ha caracterizado tanto tiempo por su estructura reduccionista y su insistencia en los sistemas simples y lineales, que hay escuelas en ella que rechazan que se pueda ocupar de sistemas más complicados. Ya en 1969, un conocido profesor de la universidad de Göttingen, Friedrich Hund, en un libro sobre "Los conceptos en la base de la Física", se pregunta cómo es posible ésta, y responde que sólo es posible si se limita al estudio de sistemas simples. La razón que da es la incapacidad del aparato matemático al uso para proporcionar soluciones a sistemas más complejos que dos partículas (sean éstas elementales o planetas y soles) en interacción. Confunde este profesor herramientas con conceptos.

La Física es el estudio de la naturaleza y la naturaleza no son sistemas simples. De hecho ni siquiera el sistema planetario, el más sencillo de todos los que podemos estudiar, es un sistema simple y su análisis correcto exigiría un desarrollo matemático del cual tenemos aún hoy, en 2006, escasas nociones.

La Física más tradicional enfocó, de manera tentativa, el estudio de la naturaleza mediante el aislamiento del resto del mundo de sus entidades constituyentes. Así, cuando Einstein analiza el efecto fotoeléctrico, considera -un- fotón que incide sobre -un- átomo. Estas dos entelequias son imposibles ni siquiera de concebir, salvo en la mente de un matemático alejado profesionalmente de la realidad. Es hoy posible enviar lo que se supone son fotones individuales sobre una muestra de átomos, (fotones embebidos en otros campos electromagnéticos que llenan todo el espacio), pero es imposible concebir un átomo aislado, puesto que por lejos que lo pongamos en medio del espacio interestelar, siempre estará sometido a los campos electromagnéticos siempre variables de las incontables estrellas del Universo.

La teoría cuántica, revolucionaria en los años 20 del siglo XX, y hoy ya tan tradicional como el electromagnetismo o la termodinámica, insiste, como base de su formalismo, en la naturaleza como un espacio lineal, postulando el principio de superposición como parte esencial de su hermenéutica matemática. Se ve, así, forzada a eliminar de sus

consideraciones aquellos casos (todos los reales) en los cuales los átomos en estudio (o sus elementos constituyentes) actúan sobre los átomos de los recipientes que los contienen, y estos a su vez sobre los primeros, en lazos de realimentación todo lo complejos que podamos suponer. Puesto que no hemos desarrollado las herramientas matemáticas necesarias para estas situaciones, elegimos dos caminos más o menos dudosos: Utilizamos esquemas de desarrollo en serie o perturbativos, o nos limitamos, según el "dictum" del Profesor Hund, a sistemas que son átomos idealmente aislados o sistemas planetarios de soles masivos y planetas minúsculos, o a interacciones que son exclusivamente choques binarios o ternarios entre entelequias no interactivas. Según este mismo profesor, el tratamiento de los sistemas reales corresponde a la Biología o a la Ingeniería, renunciando la Física, según él, al estudio de la realidad.

Debemos reconocer que carecemos de herramientas para abordar sistemas reales, es decir, sistemas complejos, átomos rodeados de otros 10^{23} congéneres, sistemas planetarios de masas similares o partículas clásicas moviéndose bajo interacciones electromagnéticas múltiples.

Pero carecer de herramientas no es lo mismo que carecer de ideas. Es evidente que sin taladros de acero al vanadio no podemos agujerear el hormigón y no podemos aserrar chapas de acero sin sierras de acero rápido. Pero eso no quiere decir que el hormigón no pueda ser agujereado, que nos tengamos que limitar a mirarlo como una superficie impenetrable. Eso lo único que quiere decir es que tenemos que crear las herramientas necesarias.

¿Cuales son las que necesitamos para la tarea? No lo sé, pero en ciencia, cuando uno no sabe una cosa, prueba sin parar hasta conseguirla. Hoy es difícil hacer esto. Hoy se ha convertido la ciencia en una factoría de *papers* exigidos por comisiones evaluadoras para proporcionar sustento a los posibles científicos. Si esta proletarización de la actividad intelectual tiene forzosamente que realizarse y es indispensable para poder comer el publicar un *paper* al mes, es evidente que nadie se va a plantear una búsqueda sin garantía de éxito de nuevas herramientas, sino que se intentará aserrar el "palo de hierro" tropical con sierras de hierro fundido, haciendo en el mismo pequeñas muescas, que los editores, complacientes, aceptan por el bien de los pobres científicos.

Necesitamos, pues, desarrollar nuevas herramientas matemáticas que substituyan al ya anciano sistema de desarrollos en serie de Taylor, que data de 1700, y sus derivados (desarrollos perturbativos) de múltiples formas. Solución no tengo para esta demanda, pero si interés en encontrarla. Qué es posible es evidente, puesto que los fenómenos de la naturaleza son limitados, de manera que el sistema de cálculo de la misma funciona sin necesidad de series infinitas. Que el sistema no es perturbativo es de la misma forma evidente, puesto que cuando un fluido se mueve no explora al moverse todo el espacio posible de soluciones.

¿Cómo podemos avanzar en esta investigación? La respuesta más evidente es elegir para nuestro estudio sistemas complejos que nos permitan hacer lo que siempre ha hecho la ciencia: Pincharlos por un lado y por otro para observar las respuestas hasta ir, lentamente, intuyendo las soluciones, o al menos intuyendo los problemas.

Sistemas complejos son todos los que nos rodean. Podemos elegir unos u otros. El sistema que algunos científicos hemos elegido es el sistema climático. Es éste un sistema complejo, no lineal, con realimentaciones positivas y múltiples escalas tanto espaciales como temporales. Su interés es científico: ¿Podemos entenderlo y predecir su evolución? Y es eminentemente práctico: Si no detenemos el alocado camino hacia un nuevo clima la civilización, tal y como la entendemos hoy, puede colapsar.

El sistema climático es el conjunto de fluidos sobre la superficie de una Tierra en rotación. Son dos fluidos de características distintas: El aire tiene una densidad que es una milésima parte y una capacidad calorífica 1/4 de la del agua. El aire circula sin fronteras laterales, mientras que el agua lo hace constreñida por la geografía de los continentes. Las propiedades térmicas del aire dependen de cantidades minúsculas de ciertos compuestos químicos que lo forman al mismo tiempo que el oxígeno y el nitrógeno, como son el CO₂, el metano y el ozono, que controlan los flujos radiativos (es decir, los flujos de radiación electromagnética, de los rayos infrarrojos que emite la superficie del planeta, y que no tiene nada que ver con la radio-actividad) y por tanto los únicos posibles intercambios de calor con el espacio exterior. La energía para el movimiento de ambos fluidos llega del Sol, con fluctuaciones derivadas de la actividad de éste, y de los cambios en los parámetros de la órbita de la Tierra. Uno de los gases de control, el metano, se almacena en los taludes continentales, de manera que cuando estos taludes quedan al descubierto al bajar el nivel de mar en las etapas glaciales, la emisión de metano dispara rápidamente una desglaciación. El hielo de los casquetes polares, o de grandes extensiones de la superficie en las épocas glaciales, actúa como un termostato, debido a su enorme capacidad de reflexión de la luz, que hace variar substancialmente el albedo del planeta. Las plantas de la superficie añaden complejidad al sistema, variando los flu-

jos de vapor de agua que controlan la precipitación de ésta sobre aquella superficie.

¿Cómo enfocar este problema? Tenemos ecuaciones para casi todos los procesos, salvo para uno, para las nubes, que aun no sabemos como se forman ni que es lo que las controla. Las ecuaciones son diferenciales, y además son no lineales. Son no lineales por el movimiento de los fluidos, pero lo son también por los procesos de realimentación del sistema. Así, si la Tierra comienza a cubrirse de hielo, parte de la energía que entra es reflejada directamente hacia el espacio, de manera que no queda disponible para la temperatura del planeta, y este se enfría, con lo cual hay más hielo que refleja más energía, que ..., una vez alcanzado un equilibrio la situación se mantiene estable, con aumento lento del hielo y bajada del nivel de mar (el agua se acumula en los casquetes en forma de hielo) hasta la liberación de metano. En ese momento comienza un deshielo que es muy rápido hasta alcanzar de nuevo otro equilibrio en una Tierra cálida.

Tenemos herramientas para resolver ecuaciones diferenciales lineales, siempre que éstas sean, digamos, pequeñas, es decir, sistemas de pocas ecuaciones. Pero desconocemos substancialmente cómo se comportan las ecuaciones diferenciales no lineales. Una biblioteca completa de matemáticas no contiene otras sugerencias que aproximar las soluciones por soluciones de ecuaciones lineales próximas a las originales. Así el esquema tradicional es el perturbativo: Empezar con una hipótesis simple, por ejemplo, que la atmósfera se mueve como un flujo laminar, e ir perturbando el sistema. Pero las perturbaciones crecen en los sistemas no lineales, de manera que al cabo de un cierto tiempo se hacen incontrolables y las soluciones numéricas al problema explotan.

Este problema de la predicción es un problema de fallo instrumental: No tenemos herramientas que permitan seguir los movimientos cuasi-caóticos o estocásticos de las líneas de flujo de aquellos fluidos. Las únicas ecuaciones de que disponemos son las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones diferenciales precisan para su resolución de condiciones de contorno, pero el caso es que las condiciones de contorno de los fluidos se ven constantemente modificadas por el propio flujo de los mismos. Carecemos de esquemas de solución de ecuaciones diferenciales en las cuales las condiciones de contorno evolucionan en el tiempo con el movimiento del propio fluido.

Y sin embargo las soluciones, aunque extrañas, no lo son tanto. El sistema evoluciona con fluctuaciones en escalas pequeñas de tiempo y de espacio, pero evoluciona de manera suave en escalas largas. Estudiar el clima es como estudiar el movimiento de un chorro de aire. Si nos pudiésemos reducir de tamaño hasta el de las moléculas, sólo observaríamos vuelos cortados y cambios bruscos de dirección como los que realiza un enjambre de golondrinas cuando

caza mosquitos. Al cambiar de escala los movimientos individuales de esas moléculas se pierden, y el chorro de aire se comporta de forma suave, salvo en su frontera.. De la misma manera, el tiempo atmosférico en una pequeña zona de la Tierra, en la ciudad de Madrid, por ejemplo, parece caótico, con cambios bruscos inexplicables. Pero el tiempo atmosférico sobre el hemisferio norte tiene un esquema razonablemente regular con sucesiones de frentes que se desplazan de oeste a este con escalas de 5-6 días, y de sur a norte con escalas de meses.

El clima varía en escalas de miles de años. Hace unos 15000 años el Sahara era una zona verde y boscosa. En la presente etapa geológica con la distribución de continentes de Sur a Norte, el sistema climático realiza una serie razonablemente estable de oscilaciones asimétricas, en las cuales hay etapas glaciales (intercaladas con bruscas subidas de temperatura) que duran unos 130.000 años, y etapas cálidas de unos 20.000 años de duración. El sistema está sometido a oscilaciones de los parámetros orbitales de escalas de tiempo de 100.000, 41.000 y 23.000 años, pero son unos movimientos orbitales que implican cambios muy pequeños en la energía recibida por el planeta. Al mismo tiempo el sistema está sometido a variaciones constantes en la emisión de energía al exterior, debida a cambios aleatorios de los parámetros radiativos. La circulación de las corrientes marinas, y en particular de una, de la corriente termosalina, y la cubierta de hielo del hemisferio norte presentan dos estados estables. En uno de ellos la corriente, uno de cuyos tramos se denomina "Corriente del Golfo", entra en el Mar Ártico, y mantiene la parte norte del Hemisferio Norte libre de hielo. En el otro, la corriente gira hacia el sur frente a las costas de Irlanda y esa parte norte se llena de hielo. El sistema contiene dos atractores. Si la intensidad del ruido, de los cambios aleatorios de los parámetros radiativos, es la adecuada, el sistema oscila entre estos dos atractores con escalas de tiempo propias. Para ello se necesitan estos dos atractores, un forzamiento periódico pequeño, una intensidad crítica de ruido, y las ecuaciones no lineales del sistema.

Estas ecuaciones no lineales tienen otros efectos, como son producir sincronía parcial en los movimientos de los fluidos que componen el sistema climático. Si comprendemos esta sincronía, podemos llegar a comprender otros muchos fenómenos colectivos, como son las olas extrañas o la superfluidez y superconductividad de alta temperatura.

¿Es el estudio del clima la panacea? Por supuesto que no. No tenemos soluciones, pero al menos vislumbramos los problemas. La ciencia no lineal se halla en estos momentos como la Física lineal se encontraba tras la obra de Galileo y Newton: Abriendo el camino a un nuevo mundo de conocimientos.

La ciencia del clima tiene tremendas imperfecciones, y sufre de la misma parálisis mental que el resto de las

disciplinas. Se le exigen resultados hoy, y forzada por estas exigencias, es incapaz de replantearse sus fundamentos. Sus herramientas son el cálculo numérico y los desarrollos perturbativos. No considera el problema de las condiciones de contorno variables ni la realimentación de esas condiciones de contorno, y reduce la dimensión dinámica de los fluidos a 2, eliminando los movimientos verticales de las ecuaciones de predicción. No es extraño que los resultados de los modelos numéricos de predicción climática, realizados por los más brillantes científicos y las máquinas de cálculo más potentes del mundo en cada instante, presenten dispersiones e incertidumbres notables, hasta el punto que sus predicciones más fiables coinciden con las realizadas con papel y lápiz hace 108 años por Svante Arrhenius: 4°C de subida global de temperatura cuando la concentración de CO₂ se doble en la atmósfera.

Podría pensarse que el cuadro que pinto es deprimente o pesimista. Al contrario, para mí es tremendamente positivo y optimista. No hay nada más deprimente que la muerte y la muerte deviene cuando ya se ha hecho todo lo posible en la vida. Reconocer que se nos abre un mundo infinito por delante, que no hay nada acabado, que las teorías que creemos finales no son más que puntos de partida para otras exploraciones, que las técnicas que utilizamos son defectuosas y que necesitamos otras y mejores herramientas, que podemos seguir investigando y descubriendo nuevos territorios, es la esencia de la juventud, de las ganas de vivir, del interés por lo nuevo.

Las herramientas que necesitamos nos son desconocidas. Tenemos que probar una y otra vez con todas las aleaciones posibles del acero hasta encontrar la correcta para tallar el hormigón. Necesitamos esencialmente ecuaciones para las condiciones de contorno de las ecuaciones diferenciales no lineales. Necesitamos poder manipular escalas temporales y espaciales muy alejadas entre sí de forma conjunta y simultánea, necesitamos métodos no perturbativos para la resolución de las ecuaciones. Necesitamos las técnicas para trabajar con los conjuntos en vez de con sus elementos, para analizar los flujos en vez de los movimientos de sus partes constituyentes.

He señalado los caminos. Son caminos difíciles, o más bien muy difíciles. La tradición fuerza a los jóvenes a hacer tesis por veredas ya trilladas, las agencias de financiación sólo financian proyectos con resultados garantizados, es decir, ya obtenidos; la sociedad no quiere experimentos.

Pero el ser humano, por serlo, (o al menos algunos seres humanos en cada generación) ha buscado siempre lo nuevo, lo distinto. Si no hubiera sido así, seguiríamos de carroñeros por las sabanas del África, por los bosques europeos. A pesar de la resistencia, se abre una nueva ciencia. Iniciemos el camino. ■

Agricultura, medio ambiente y desarrollo social. Un proyecto agroenergético integrador en Uruguay

AUTORES: ANA PIEDRA BUENA, ANTONIO BELLO
*Centro de Ciencias Medio Ambientales. CSIC.
Madrid*

El uso de combustibles fósiles, base del modelo energético mundial de las últimas décadas, presenta conocidos efectos negativos tanto desde el punto de vista ambiental, como es el deterioro ocasionado por los elevados volúmenes de CO₂ liberados en su combustión, como desde el punto de vista económico, con la creciente dependencia de los países importadores de petróleo con respecto a los países exportadores. La búsqueda de alternativas energéticas a los combustibles fósiles se ha visto impulsada por estos efectos negativos, junto al previsible descenso en sus reservas. Esto, por una parte, ha incrementado notablemente el precio del petróleo en los últimos años, ejerciendo una presión económica cada vez más intensa sobre sectores como la agricultura y el transporte, en especial en los países importadores. Por otra parte, ha puesto en evidencia la necesidad de encontrar una solución al posible agotamiento de estos recursos antes de que éste se produzca. Un tercer factor que ha intervenido, aunque con un menor peso con respecto a los imperativos de orden económico, ha sido la concienciación ciudadana acerca de la importancia de la protección del medio ambiente, con la consecuente presión que la sociedad civil ha comenzado a ejercer sobre los centros de decisión. Todos estos aspectos han influido en el cambio de modelo que se vislumbra en relación con la matriz energética futura, especialmente en los países desarrollados, como es la Política Energética Común (PEC) de la Unión Europea.

UN PROYECTO INNOVADOR

Dentro de las numerosas iniciativas que tratan de encontrar alternativas a los combustibles fósiles que se están llevando a cabo en todo el mundo, tanto a escala local como regional, destaca un proyecto de diversificación energética que actualmente está desarrollando la empresa Alcoholes del Uruguay (ALUR SA). Esta empresa pertenece en un 90% al grupo ANCAP (Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland) y en un 10% a la Corporación Nacional para el Desarrollo (CND). ANCAP es una empresa de carácter estatal, la cual se dedica principalmente a la refinación del petróleo que se importa de otros países para la obtención de gasóleo, gasolina y otros derivados, así como a su distribución en exclusividad en todo el territorio nacional. Es

la empresa de mayor facturación de Uruguay, rondando los 1.300 millones de US\$ anuales, que representa cerca del 10% del PIB del país (Sendic, 2006).

El proyecto impulsado por ALUR, denominado Proyecto Sucroalcoholero, consiste en una estrategia de diversificación de la matriz energética a partir de la sustitución progresiva de combustibles de origen fósil por agrocombustibles, como parte de un plan de protección a la soberanía energética y alimentaria del Uruguay. La particularidad de esta estrategia con respecto a modelos similares en países del Primer Mundo, es su amplia base, puesto que se sustenta en tres pilares fundamentales: la energía, producción agrícola y la generación de empleo. Para ello el proyecto plantea poner en marcha una agroindustria generadora de energía que sea económicamente rentable, y a la vez capaz de reducir el gasto que significa la importación de petróleo para el país, promoviendo simultáneamente las actividades agrícola e industrial, que están en retroceso desde hace varias décadas, al mismo tiempo que se disminuye el impacto negativo sobre el ambiente y la salud humana producido por las emisiones de CO₂ que genera el consumo de combustibles de origen fósil (Sendic, 2006). Llegados a este punto, es de destacar que mientras en la Unión Europea el 7% de la energía consumida proviene de fuentes renovables (biomasa, eólica, hidráulica y solar) y se plantea como objetivo para el año 2020 que esta cifra alcance el 20% para disminuir en un 60% a 80% sus emisiones de CO₂ (Missé, 2007), en Uruguay ya en 1998 el 95,6% de la energía producida era renovable (hidroeléctrica) y sólo un 3,9% era generada a partir de fuentes fósiles (Wikipedia, 2007).

Posiblemente lo más interesante e innovador de este Proyecto sea el enfoque que le dan sus responsables, quienes ponen énfasis en aspectos no sólo económicos, como la eficiencia, el crecimiento y el ahorro de divisas, sino también en el esfuerzo conjunto, permanente y coordinado de los diferentes actores sociales, en una distribución equitativa del desarrollo logrado, así como en la integración de conceptos de responsabilidad y compromiso social, gestión participativa, seguridad laboral y valor agregado local (Presidencia ROU, 2006).

ANTECEDENTES

Las características que hacen que este modelo sea tan particular guardan una relación profunda con la historia del

cultivo de la caña de azúcar en el Uruguay, cuya zona de producción tradicional, condicionada por los requerimientos climáticos del cultivo, ha sido Bella Unión (Artigas, Norte del Uruguay) (Fig. 1). En esta zona el cultivo de caña de azúcar estaba integrado verticalmente con la industria azucarera y actuaba como motor de la economía local, de modo que en el momento de máxima actividad se contaba con cerca de 10.000 ha plantadas con caña de azúcar, 2.000 trabajadores en el campo y 700 trabajadores en el ingenio durante un período de siete meses al año. Sin embargo, a partir del año 1992 comenzó una crisis que llevó al paulatino abandono

del cultivo por falta de competitividad del azúcar refinado uruguayo con el producido por países vecinos, especialmente Brasil, con la consecuente pérdida de empleo e incremento de los niveles de pobreza de la población de la zona. Así, en los últimos años apenas se alcanzaban las 2.000 ha de cultivo, con 900 trabajadores en el campo y 480 en la industria, que estaban en actividad solamente durante dos meses al año. Al mismo tiempo, se produjo un desmantelamiento de las infraestructuras industriales y la maquinaria agrícola. En este marco desalentador, el factor determinante para que no desapareciera totalmente el cultivo fue la movilización social generada a su alrededor, que ya contaba con una trayectoria histórica de defensa de la caña de azúcar y de la mejora de las condiciones de trabajo en las plantaciones y la industria (Presidencia ROU, 2006).

PRIMERA ETAPA DEL PROYECTO

El Proyecto Sucroalcoholero comenzó a ponerse en marcha en Uruguay a fines de enero del año 2006, año en el que se ha desarrollado la primera de las dos etapas en que éste está estructurado. En esta primera etapa se ha empezado por fomentar el retorno al cultivo de caña de azúcar en Bella Unión para la producción de azúcar y bioetanol, como cuestión prioritaria del Proyecto Sucroalcoholero. El azúcar producido se destina al abastecimiento del mercado interno, mientras que el bioetanol (que se producirá a partir de la segunda etapa del proyecto) será utilizado para mezclar con el gasóleo que produce la empresa ANCAP, con el doble objetivo de disminuir el volumen y gasto de las importaciones de petróleo, que en parte sería sustituido por el bioetanol, y de disponer de un combustible menos contaminante de la atmósfera que los que se están utilizando actualmente.



Figura 1. Localización de Bella Unión.

El impulso brindado tanto al sector agrícola como industrial en esta primera etapa ha logrado la generación de unos 2.750 puestos de trabajo directos, lo cual representa un 37% de incremento con respecto a la mano de obra ocupada en la zona (MGAP, 2000; Sendic, 2006). Por otra parte, se ha logrado un incremento de la superficie en producción, pasando de 3.000 a 4.800 ha de caña de azúcar, con dos temporadas de producción (otoño y primavera), un tamaño promedio de 17 ha por agricultor y un rendimiento de unos 5.800 kg de azúcar por hectárea. Además, se han destinado superficies a semillero para las próximas campañas. En el ámbito industrial, se han recuperado

infraestructuras en desuso, rehabilitándolas, de modo que el 28 de junio de 2006 pudo ser re-inaugurado el ingenio azucarero Alfredo Mones Quintela en Bella Unión, departamento de Artigas. En estas instalaciones, durante esta primera etapa, se ha procedido a la elaboración de azúcar refinado, azúcar rubio y melaza, destinados principalmente al mercado nacional (Sendic, 2006).

Para que esto fuese posible se han aunado esfuerzos desde diferentes sectores. En primer lugar, la existencia de organizaciones locales de pequeños agricultores y de trabajadores cortadores de caña de azúcar de larga experiencia en la zona ha favorecido las negociaciones entre los diferentes actores que intervienen en el proyecto. Esto se refleja en varios aspectos, como por ejemplo, el modelo de gestión, innovador, en el que trabajan de forma conjunta representantes de ANCAP, el Sindicato de Trabajadores de la Industria, el Sindicato de Trabajadores Rurales, la Asociación de Cortadores de Caña de Azúcar, la Corporación Nacional para el Desarrollo (CND), el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) y el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM). Este grupo de trabajo se reúne mensualmente para realizar el seguimiento del proyecto, analizando su marcha, evolución y las posibles dificultades que se presentan (Sendic, 2006).

En segundo lugar, ha sido fundamental la participación coordinada de diversas instituciones nacionales tales como el Banco de la República Oriental del Uruguay (BROU), el Banco de Previsión Social (BPS), el Instituto Nacional de Colonización (INC), CND, MIEM, MGAP y ANCAP. Esta coordinación ha permitido poner en marcha iniciativas como la creación de un fondo agrícola por parte de ALUR y BROU para financiar de la plantación de otoño y las actividades de mantenimiento de los culti-

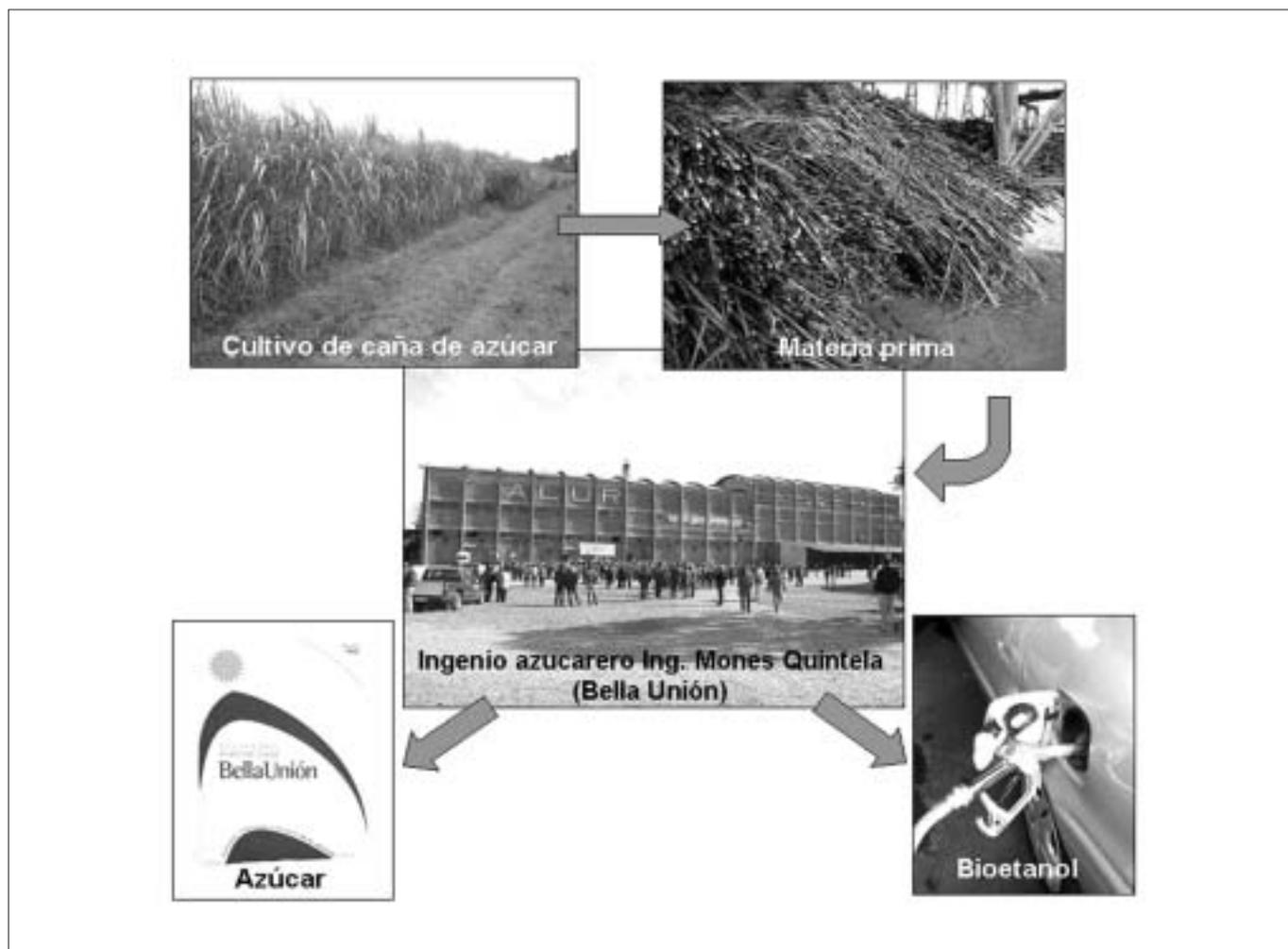


Figura 2. Cadena agroindustrial de la caña de azúcar.

vos, la concesión de 1.000 ha de tierras y maquinaria en préstamo a pequeños productores y trabajadores dentro del marco del Proyecto Uruguay Rural, que coordinan ALUR, INC y MGAP, así como la existencia de un contrato que garantiza la compra y compromete la venta de la cosecha, lo que en su conjunto han permitido alcanzar la estabilidad y confianza necesarias para que los agricultores se recuperaran el cultivo de la caña de azúcar. Finalmente, pero no de menor importancia, ha sido el apoyo económico de países vecinos con los cuales se han firmado acuerdos de colaboración en materia energética (Presidencia ROU, 2006).

Además de los aspectos anteriores, cabe mencionar que paralelamente se ha trabajado en las áreas de investigación agronómica (recursos genéticos y técnicas de manejo) y de capacitación de los trabajadores (potencial humano). En el ámbito de la investigación agronómica, se han llevado a cabo ensayos de campo con el doble objetivo de evaluar técnicas de manejo y de determinar cuáles eran los cultivares de caña de azúcar que estaban mejor adaptados a las condiciones ambientales locales, presentando mayores rendimientos y/o calidad de producto, a fin de alcanzar los in-

crementos de rendimiento previstos y seleccionar prácticas de manejo respetuosas con el medio ambiente. En estas experiencias se ha contado con la participación de técnicos de la Universidad de la República (UDELAR), del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), así como técnicos independientes. A largo plazo se plantea profundizar tanto en la investigación de los aspectos agronómicos como de los industriales, con la instalación en Bella Unión de un Centro de Investigación en Energías Alternativas, dedicado exclusivamente a este tipo de estudios. Por otra parte, en el área de capacitación para los trabajadores del ámbito industrial se han dictado cursos de especialización en soldadura, seguridad industrial y seguridad ambiental (Presidencia ROU, 2006).

Finalmente, la idea del valor agregado local se ha visto plasmada en las iniciativas de auto-empleo para la creación de servicios locales que fueran capaces de cubrir las necesidades generadas en torno a esta industria. Así, han surgido cooperativas para la fabricación de uniformes de los empleados de la fábrica, para el lavado y mantenimiento de envases, para la provisión de insumos, entre otras. De este modo ha sido posible acrecentar el impacto social del pro-

yecto en cuanto a generación de puestos de trabajo y mejora del nivel de vida de la población de Bella Unión (Presidencia ROU, 2006).

LA PRÓXIMA ETAPA

En la segunda etapa, que ha comenzado en el presente año 2007, se plantea iniciar la diversificación industrial. Así, por una parte, además de elaborar azúcares y melaza, se comenzará a producir alcohol a partir de la caña de azúcar para mezclarlo con gasolina y obtener bioetanol (Fig. 2). Para ello se han realizado inversiones en la remodelación y modernización de infraestructuras industriales existentes, así como en el montaje de nuevas instalaciones. Un ejemplo es la planta deshidratadora que se ha instalado junto a la destilería central de ANCAP en el sur del país, en la cual el alcohol hidratado producido en Bella Unión se deshidratará y mezclará con gasolina. Se prevé que la puesta en marcha de esta planta tendrá un impacto en la generación de 3.500 nuevos empleos directos en el sector industrial. Además, se están estableciendo contactos con pequeñas empresas del sector privado para instalar industrias anexas que trabajen con diversos derivados de la industria de la caña de azúcar para la producción, por ejemplo, de fertilizantes o para la utilización de la melaza. En el ámbito agrícola, se espera alcanzar las 10.000 ha de cultivo de caña de azúcar en producción en 2007, que era el máximo histórico de superficie plantada de este cultivo, y las 12.000 ha en 2008. Asimismo, se pretende que la selección de cultivares mejor adaptados a las condiciones locales y el uso de técnicas de manejo agronómico que permitan un incremento de los rendimientos por unidad de superficie hasta 8.000 kg de caña (Sendic, 2006). En relación al bioetanol, se plantea también una diversificación de la base agrícola a través de la realización de otros cultivos como sorgo dulce, remolacha azucarera y utilizando la paja de arroz, siendo esta última un subproducto del sector agroindustrial con el que se cuenta en abundancia y que hasta el momento no tenía aprovechamiento energético.

Por su parte, la diversificación industrial se complementará con la obtención de aceites a partir de cultivos oleaginosos para su mezcla con gasóleo (biodiesel). Los cultivos oleaginosos propuestos son girasol y colza, previniéndose además a largo plazo el posible aprovechamiento de grasas animales provenientes de la industria cárnica. La superficie necesaria de girasol y colza para alcanzar los objetivos energéticos previstos es de 60.000 ha, que se localizarían en un radio de 90 km en torno a las plantas procesadoras. En relación a esta extensión se debe destacar que, del mismo modo que con el cultivo de la caña de azúcar, no son realizados por grandes propietarios en extensos monocultivos, sino por pequeños agricultores en fincas cultivadas bajo criterios agroecológicos. Asimismo, se resalta el hecho de que no se está sustituyendo la superficie de cul-

tivos destinados a alimentos por cultivos bioenergéticos, sino que se están recuperando áreas de producción agrícola que habían sido abandonadas a causa de la coyuntura económica regional de los últimos años. Por ello, se espera que esta diversificación agro-industrial tenga un efecto de reactivación socioeconómica en la mitad Sur del país, tanto en el entorno de las plantas procesadoras en los departamentos de Canelones, San José y Montevideo, como en el de las plantas distribuidoras de Paysandú, Treinta y Tres, Durazno y Juan Lacaze (Sendic, 2006).

Además el proyecto prevé que estas agroindustrias generen unos 10 MW·h⁻¹ de energía eléctrica, que se integraría a la red nacional actual (9.057 GW·h⁻¹), la cual es gestionada por el ente estatal UTE (Usinas y Teléfonos del Estado) (Wikipedia, 2007). En cuanto al ahorro de divisas esperado, se pretende alcanzar una reducción del gasto de importación de petróleo cercana al 4%, apoyado en la previsión de que se apruebe el proyecto de ley (actualmente en Cámaras) que propone que para el año 2008 el 2% del gasoil producido por ANCAP sea biodiesel (Sendic, 2006).

Los resultados obtenidos hasta el momento por el Proyecto Sucroalcoholero de ALUR en Uruguay permiten predecir que, a través de su modelo de diversificación de la matriz energética del país, será posible alcanzar los objetivos de soberanía energética y alimentaria, reactivación de los sectores productivos agrícola e industrial, además de una disminución del impacto negativo sobre el ambiente, en un marco de rentabilidad, eficiencia, promoción del valor agregado y de las organizaciones locales, innovación, capacitación, gestión participativa y equidad social. ■

REFERENCIAS

- MGAP. 2000. Censo General Agropecuario 2000. Consultado: 7/03/2007.
http://www.mgap.gub.uy/Diea/CENSO2000/ResultadosDefinitivosVol_1/data/37.htm
- Missé, A. 2007. Berlín insiste en imponer en la UE un 20% de energías renovables en 2020. *El País* 5/03/2007.
- Presidencia República Oriental del Uruguay. 2006. *Artigas: piedra fundamental del Uruguay Productivo*. Consultado: 26/01/2007.
http://www.presidencia.gub.uy/_web/noticias/2006/06/2006062805.htm
- Sendic, R. 2006. Conferencia "Políticas agroenergéticas en Uruguay en el marco del Uruguay Productivo", 23 de noviembre de 2006, Centro de Ciencias Medioambientales-CSIC, Madrid.
- Wikipedia. 2007. *Economy of Uruguay*. Consultado: 7/03/2007.
http://en.wikipedia.org/wiki/Economy_of_Uruguay

Nanotubos y nanofibras de carbono

AUTORES: JOSÉ MARÍA GÓMEZ DE SALAZAR
MARÍA ISABEL BARRENA PÉREZ
*Departamento de Ciencia de Materiales
Facultad de Ciencias Químicas
Universidad Complutense de Madrid*

ANTECEDENTES Y APLICACIONES

Desde el descubrimiento por Kroto et al. (Nature 318 (1985) 162.) del C60, muchos han sido los estudios realizados sobre este nuevo material. Fue Iijima (Nature 354 (1991) L107) cuando en 1991, descubrió, que estos materiales podrían poseer una estructura en forma de tubo, pudiendo existir nanotubos de una sola pared o de varias, dependiendo del proceso de fabricación. Si el proceso es modificado, incluso, pueden ser obtenidas nanofibras de carbono.

Es desde entonces cuando se desarrolla toda una ciencia y tecnología de estos materiales. Siendo numerosos investigadores, los que están desarrollando nuevos procesos de obtención de nanotubos y nanofibras, a través de los diferentes métodos de obtención, como pueden ser:

PLV (Ablación Laser), Descarga de Arco, Descomposición gaseosa, CVD (deposición química fase vapor), Pirolysis, Descomposición en hornos solar, Crecimiento epitásico en sustratos (zeolitas), etc.

Por otro lado, no debemos olvidarnos, de la numerosa actividad científica y tecnológica que está siendo realizada por investigadores y empresas, para la aplicación de estos nuevos materiales compuestos, por citar señalaremos algunas de las aplicaciones que están siendo actualmente desarrolladas: Como dispositivos electrónicos (transistores), Técnicas microscópicas (TEM, microscopía óptica de transmisión, SFAM, microscopía de fuerzas atómicas). Emisores de Campo, Baterías de Li⁺, Pilas de Combustible, Altas Energías, Supercondensadores, Sensores y Biosensores, Nanodispositivos, Textil, Materiales Compuestos, tan-

to de matriz polimérica como metálica, Recubrimientos antifricción, Pinturas Conductoras, almacén de circuitos en electrónica (Packaging boxes), placas soporte de semiconductores, Piezas ligeras estructurales, palas de aerogeneradores, etc. y todas aquellas aplicaciones en donde puedan ser utilizados estos nuevos materiales compuestos.

MATERIALES COMPUESTOS

DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS

CON NANOTUBOS O NANOFIBRAS

DE CARBONO

Es bien conocida la fabricación y utilización de materiales compuestos de matriz polimérica, bien reforzados con fibras de vidrio, carbono o aramida, en industrias tan importantes como la aeronáutica, naval, automoción. Sin embargo es desde hace tan solo 2 años (2002), cuando viene investigándose en la obtención de materiales compuestos de matrices poliméricas, metálicas o cerámicas, reforzados con nanofibras o nanotubos de carbono (1-12).

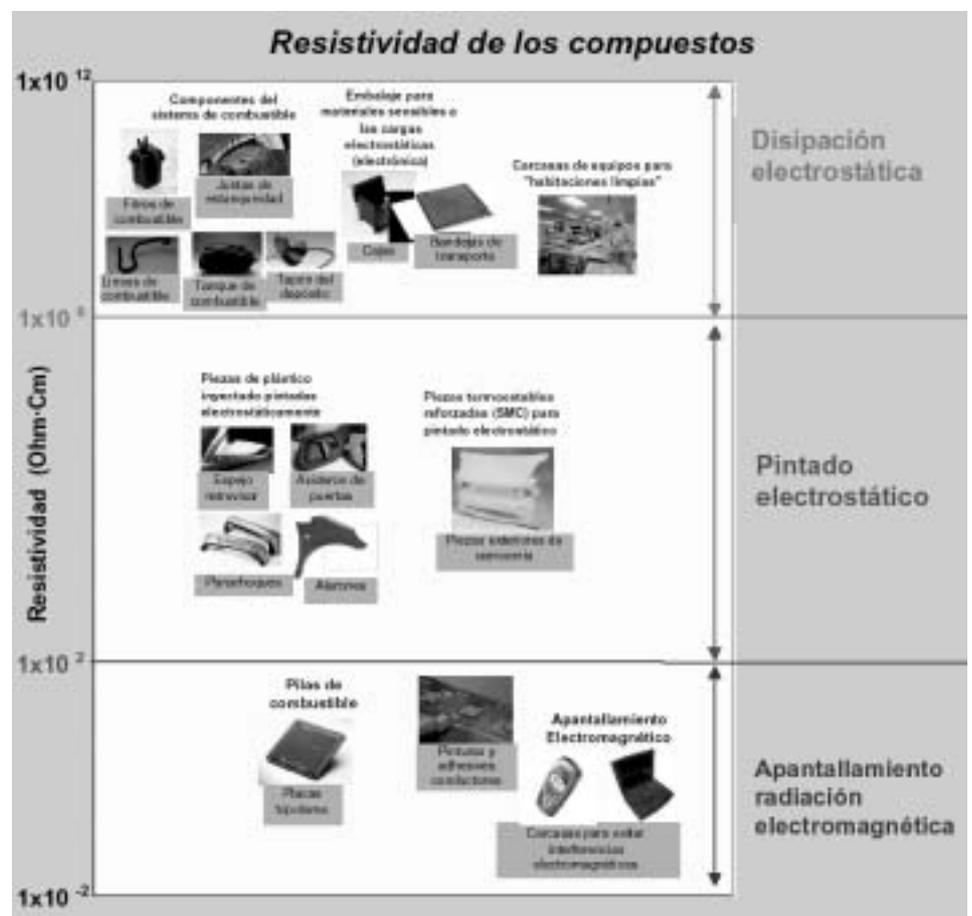


Figura 1. Aplicaciones en función de la conductividad eléctrica.

PROPIEDADES DE NANOCOMPOSITES	SECTOR INDUSTRIAL
• Incremento de rigidez a baja densidad.	Automóvil, aeronáutico, doméstico, deportivo, defensa, marina
• Incremento de resistencia a tracción a baja densidad	Automóvil, aeronáutico, doméstico, deportivo, defensa, marina
• Incremento de la temperatura de distorsión térmica a baja densidad	Automóvil, aeronáutico, doméstico, electrónico, industria de componentes de procesos industriales
• Estabilidad dimensional a cargas bajas	Automóvil, aeronáutico, eléctrico
• Apantallamiento electromagnético con cargas, densidades y precio bajos	Eléctrico, automóvil, aeronáutico, defensa, telecomunicaciones
• Reciclabilidad mejorada (cargas bajas, sin fibra de vidrio ni carbonatos)	Todos
• Miniaturización (micromoldeado)	Eléctrico, médico, defensa, equipos de precisión.
• Materiales con propiedades de transporte térmico diferentes a las de los materiales convencionales	Eléctrico, doméstico, piezas sometidas a rozamiento
• Resistencia al desgaste	Transporte, maquinaria industrial
• Absorción de ondas de radar	Defensa, turbinas de energía eólica
• Propiedades eléctricas a cargas bajas (pintado electrostático, disipación de cargas estáticas)	Automóvil, aeronáutico, doméstico, electrónico
• Mejora de la calidad superficial en comparación con polímeros tradicionales	Automóvil, marina, doméstico, muebles
• Mejora de la eficiencia en RTM (moldeo por transferencia de resina)	Aeronáutica, energía eólica, defensa
• Reducción del desgaste de equipos de procesado	Procesadores de polímeros

Tabla I.- Propiedades SWNF/MWNF vs aplicaciones

Los MWNT (nanofibras de carbono multipared) o SWNT (nanofibras de carbono de pared simple) adicionados a matrices poliméricas, a la vez que incrementan las propiedades ingenieriles, permiten el aumento de la conductividad eléctrica, lo cual hace que estos nuevos materiales compuestos, puedan ser utilizados como partes pintables, o como depósitos de combustible en la industria del transporte (Automoción), aplicables en la obtención de supercondensadores o pilas de ión Li. Sin embargo, para la obtención de estas buenas propiedades, es necesario previamente una buena funcionalización o activación superficial, que permitirá un incremento en la energía de adhesión, o lo que es lo mismo en una mejora de la mojabilidad entre las resinas y las nanofibras/nanotubos, a la vez que una excelente dispersión en las matrices poliméricas que van a reforzar. Tanto uno como otro aspecto, vienen de la mano de procesos físico-químicos descrito por algunos autores (13-26).

Si concretamos en lo referente al incremento de las propiedades ingenieriles, la adición de tan solo un 5% de nanotubos a resinas termoestables de tipo epoxi, permiten subir hasta un 90% la resistencia a la tracción, y hasta un 340% la conductividad eléctrica, la incorporación de 0.1% en peso a resinas de tipo epoxi, incrementan la tenacidad de las mismas en torno al 15%, y si la adición es de 1% en peso, el incremento de la rigidez oscila entre el 36% y el 42%. Si esta adición es a matrices termo-

plásticas como el PMMA (polimetil metacrilato), el incremento de la resistencia a la tracción es superior al 25%. Desde el punto de vista de propiedades funcionales, la adición de MWNT o SWNT en matrices poliméricas (termoestables o termoplásticas) beneficiaría la disipación de cargas estáticas, y mejoraría las propiedades frente a interferencias magnéticas (EMI) y a las interferencias por radio frecuencias (EFI) (figura 1).

En la tabla I se muestran algunas aplicaciones de estos nanomateriales, principalmente en el sector del transporte:

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ

METÁLICA MEJORA CON NANOTUBOS

O NANOFIBRAS DE CARBONO,

DE ELVADAS CONDUCTIVIDADES

ELÉCTRICA Y TÉRMICA

En la actualidad existe una mejora en el desarrollo de nuevos materiales compuestos para aplicaciones electrónicas en los medios de transporte, la mayoría de ellos, buscan una mejora en las propiedades ingenieriles (resistencia) como funcionales (disipación térmica) y elevada conductividad eléctrica, para aplicaciones como soportes de los nuevos semiconductores, o como sistemas de almacenaje de nuevos cir-

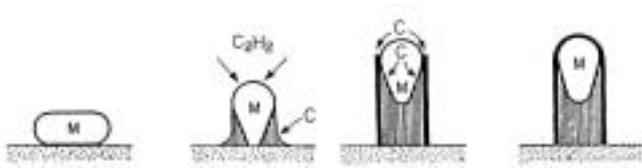


Figura 2. Modelo de crecimiento de filamentos de carbono sobre partículas catalíticas metálicas propuesto por Baker.

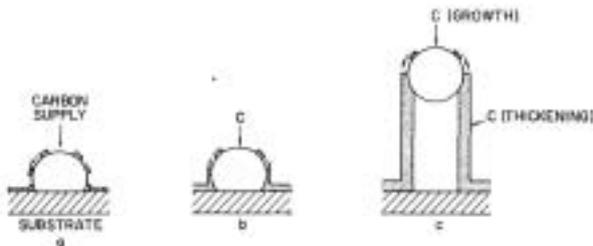


Figura 3. Modelo de crecimiento y engrosamiento de filamentos de carbono sobre partículas catalíticas metálicas propuesto por Oberlin.

cuitos electrónicos de tipo híbrido. Actualmente como disipadores térmicos viene usándose aleaciones Al/Si o aleaciones W/Cu y W/Cu/Ni, o Mo/Cu, otros materiales aptos son Cu/invar./Cu o Cu/Mo/Cu. En relación a materiales compuestos se están buscando sustitutos de los compuestos Al/SiC (50-70% SiC). Igualmente se están utilizando para más bajas temperaturas materiales compuestos de matriz polimérica (epoxi), que llevan un elevado contenido de negro de carbono, para obtener altos coeficientes de disipación térmica, y tener conductividad eléctrica media-alta.

Sin embargo, actualmente, se están desarrollando nuevos materiales compuestos a base de Cu/NFC-NTC, que no sólo mejoren las capacidades de eliminación de calor, aumenten la conductividad eléctrica, sino que aumenten las propiedades ingenieriles (resistencia mecánica, coeficiente de expansión térmica, etc.)

En este punto, para fabricar estos nuevos materiales compuestos, es necesario poner en contacto dos materiales de

PROPIEDAD CARACTERIZADA	UNIDADES	VALOR OBTENIDO
Diámetro	nm	50 - 400
Longitud	mm	> 80
Densidad real	g/cm ³	1.94 - 1.97
Densidad aparente	g/cm ³	~ 0.025
Area superficial específica	m ² /g	5 - 10
Resistencia a tracción (teórico)	GPa	2.7
Módulo de Young (teórico)	GPa	230
Grado de orden estructural	%	25
Resistividad eléctrica	W·m	~ 1·10 ⁻³

Tabla II. Propiedades de los MWNF.

naturaleza muy diferente, como Sn el Cu, o Al, con NFC/NTC, siendo por ello, necesario recurrir a técnicas de recubrimiento de las NFC/NTC mediante técnicas como son la reducción autocatalítica (Electroless), o técnicas de deposición en fase vapor (MOCVD). Una vez obtenido los polvos y las NFC/NTB recubiertos se pasa a la obtención de la pieza en verde tras un proceso de compactación bajo presión, y finalmente al proceso de fabricación final o sinterización, la cual se puede realizar sin o bajo presión (Hot-Press). El desarrollo de estos nuevos materiales, no solo permite obtener piezas 3D, sino láminas (2D), que pueden ser utilizados tanto para almacenar circuitos electrónicos de tipo híbrido, como ser utilizados como soportes de elevada disipación térmica en nuevos campos de la electrónica (Semiconductores), al ser aplicados nuevos semiconductores de tipo GaN

En relación con la fabricación de Materiales Compuestos de Matriz Metálica, básicamente los estudios se están llevando a cabo en campos de la aplicación de los nanotubos y nanofibras de carbono, desde el punto de vista del incremento de la resistencia a la abrasión, y elevación de propiedades ingenieriles y funcionales, tanto en materiales con matriz metálica, Ni, Co, Al, etc., como en cerametales WC-Co, e incluso en nanocomposites cerámicos. Las técnicas de introducir nanotubos y nanofibras de C en metales reactivos, como puedan ser Al y Mg, pasan por la vía previa de preservar al C frente al Al y el Mg, pues a elevadas temperaturas se provocan reacciones de descomposición, como es la formación de Carburos de Al y/o Mg si las matrices utilizadas son estas. Este proceso de inhibición, es de tipo químico, mediante el recubrimiento sin corriente (electroless) de los nanotubos y nanofibras de C con Cu, Co, o Ni. Sin el cual sería imposible el fabricar estos materiales compuestos (32-34, y asociada).

LOS NUEVOS NANOMATERIALES

DE C EN LA UCM

El Grupo de Investigación de la Universidad Complutense (UCM 910069) "Tecnologías de Unión, Materiales Avanzados y Ecotecnologías". Se encuentra desarrollando investigaciones en el campo de estos nuevos materiales como son las Nanofibras/Nanotubos de carbono. Estos nanomateriales son obtenidos a partir de un proceso pirolítico de semilla flotante por la empresa Grupo Antolín Ingeniería S.A, que financia el proyecto a través de un artículo 83 de la LOU. El proceso de obtención del Grupo Antolín, se basa en una reacción de descomposición pirolítica, en donde son introducidos en un horno un metal disuelto en un soporte adecuado. Dentro del horno se produce una reacción, en donde este metal pasa a su forma reducida (metálica), y en forma de nano gotas (fase líquida), los demás componentes, como hidrocarburos, azufre, hidrógeno, se encargan de producir carbono, que se deposita sobre estas minúsculas gotitas del catalizador, provocando que la reacción de formación de este carbono, en for-

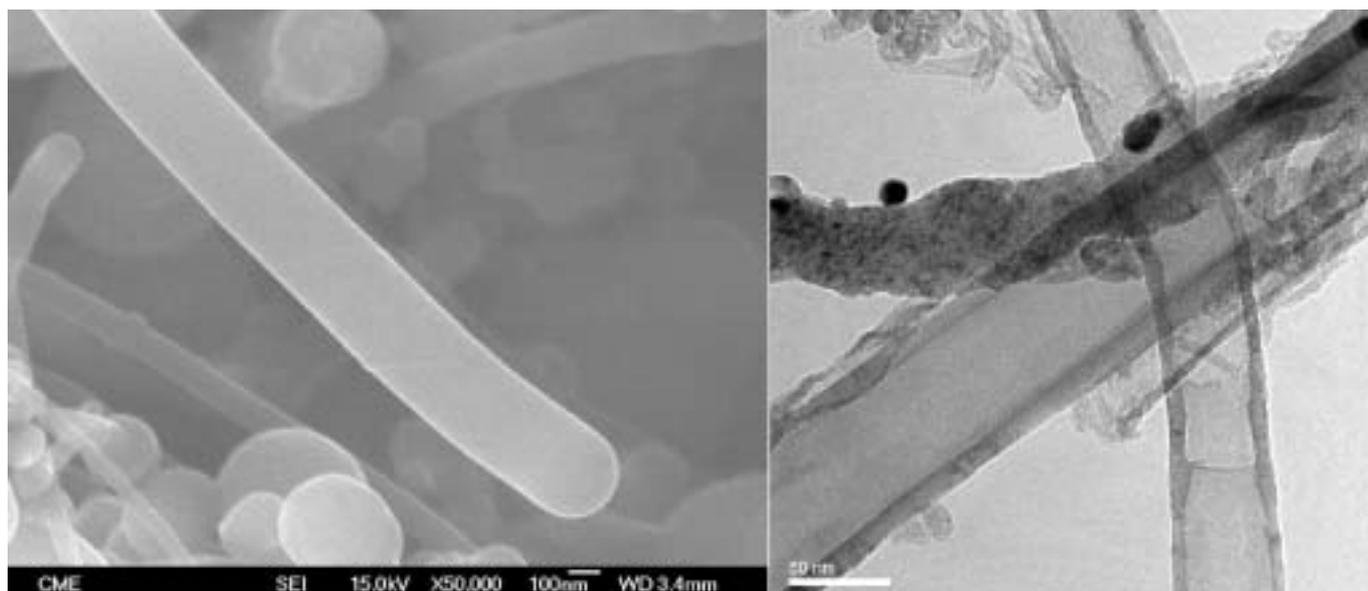


Figura 4. Nanofibras de C y Nanotubos de C, obtenidos mediante proceso pirolítico de la semilla flotante. Imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido y de Transmisión (obtenidas por el Prof. Gómez de Salazar).

ma de nanotubo (SWNF) o nanofibra (MWNF) tenga lugar. En las figuras 2 y 3, se muestran esquemáticamente estos procesos de obtención. Estudios realizados por el grupo de investigación, han permitido determinar la calidad del material obtenido por el Grupo Antolín (figura 4).

En la tabla II, se muestran algunas propiedades de este material.

Las investigaciones que se están realizando conjuntamente con el Grupo Antolín Ingeniería, concretamente con su división de nanofibras es la de obtener materiales compuestos de matriz polimérica (termoestable), o metálica (Cu).

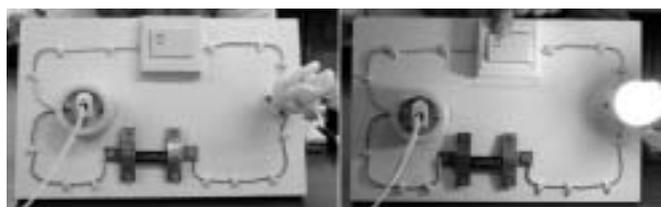


Figura 5. Material compuesto conductor (polímero 5% MWNF).

Los materiales nanocompuestos de matriz polimérica, se están fabricando con un polímero termoestable, en este caso se ha elegido la resina Crystic 199 (Scot Bader), pues la Empresa Plastiform S.A., colabora con el Grupo, ce-

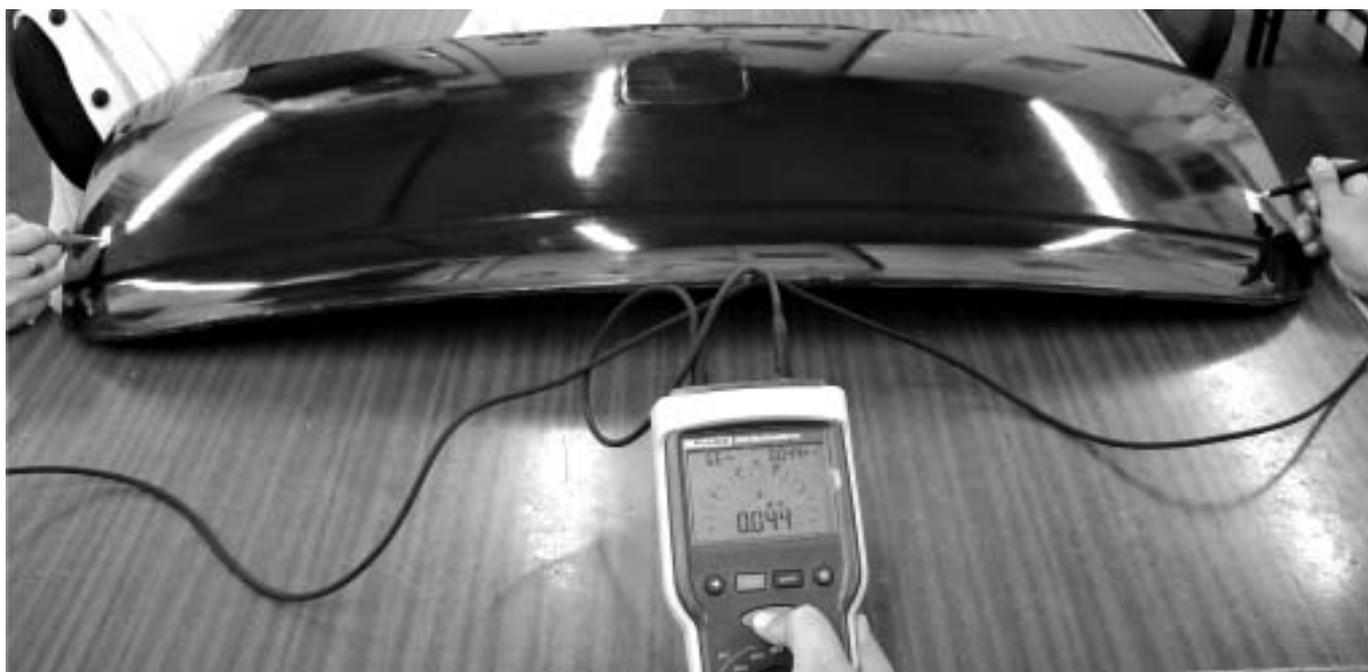


Figura 6. Portón trasero de vehículo (material compuesto conductor).



Figura 7.
Parte delantera
de una carcasa
de aislamiento
electromagnético
(terminación
con Gel Coat de
color verde).

diendo este material. Y nanofibras/nanotubos de carbono, con la adición o no de fibra de vidrio en el polímero que mejora las propiedades ingenieriles (rigidez, módulo elástico, resistencia y tenacidad), y las tribológicas como el

aumento de la resistencia al desgaste abrasivo y/o erosivo. Igualmente se están desarrollando pinturas conductoras en base a este tipo de resinas y en base a pinturas convencionales.

Un ejemplo de estas aplicaciones es la fabricación de materiales poliméricos conductores. En la figura 5, se puede observar como al apretar un interruptor, pasa la corriente eléctrica a través de este material y se enciende una bombilla. Esta es una aplicación que puede ser utilizada para obtener recubrimientos conductores tipo Gel Coat, tanto para la industria del transporte, que permitirían fabricar piezas con una superficie conductora.

Se pueden fabricar depósitos de combustible que permiten la disipación de la corriente electrostática, lo que evitaría posibles explosiones por descargas eléctricas electrostáticas.

Otro importante ejemplo, el mostrado en la figura 6, en ella se observa un portón trasero de un vehículo, construido mediante la técnica de laminado manual. Se trata de un material compuesto de poliéster-fibra de vidrio-nanofibra de carbono. La superficie exterior es conductiva, pudiendo ser pintada mediante pintado electrostático. También y dadas las características conductoras de este material, otra posibilidad sería la de carcasas para apantallamiento electromagnético destinados a la industria aeronáutica (figura 7).

Los materiales nanocompuestos de matriz metálica que se están fabricando estarán formados por una matriz metálica que puede ser de Cu, Ni, u otro metal de elevada conductividad eléctrica y térmica, y nanofibras/nanotubos de carbono recubiertas mediante procesos de reducción autocatalítica (electroless) con Cu, o Ni, así como la fabricación *in situ* de nanocompuestos formados por nanopartículas y nanofibras de C, mediante este procedimiento. Con ello, se mejorarán las propiedades ingenieriles (rigidez, módulo elástico, resistencia y tenacidad), las tribológicas, así como las conductividades eléctrica y térmica del material compuesto, sin descartar la mejora en el coeficiente de expansión térmico.

Para metalizar las MWNFC, es necesario previamente realizar una serie de operaciones, como las de funcionalización de la superficie de la nanofibra, posteriormente, se realiza una sensibilización con iones Ni^{2+} , una activación con KBH_4 , o con $PdCl_2$, según el caso. La metalización de Cu y de Ni se realiza con baños de formulación específica desarrollados en colaboración UCM-Grupo Antolín. Con este procedimiento se puede realizar una deposición controlada de estos metales Cu y Ni sobre las MWNFC como se puede observar en las figuras 8 y 9.

Por este procedimiento pueden ser obtenidos materiales compuestos *in situ*, constituidos por MWNFC recubiertas con Cu o Ni-P, y nanopartículas de Cu o de Ni-P (figura 10).

Este material, es sometido en un molde (matriz) a una presión elevada ($>500MPa$) para compactarlo, formar la pastilla en verde, para posteriormente realizar un proceso de sinterización a temperatura media alta ($750^{\circ}C-850^{\circ}C$), que daría lugar a un material consolidado (figura 11). Dependiendo del % de MWNFC el nanomaterial compuesto tendrá unas propiedades u otras en función de la aplicación que se desee, disipador térmico, o conducción eléctrica.

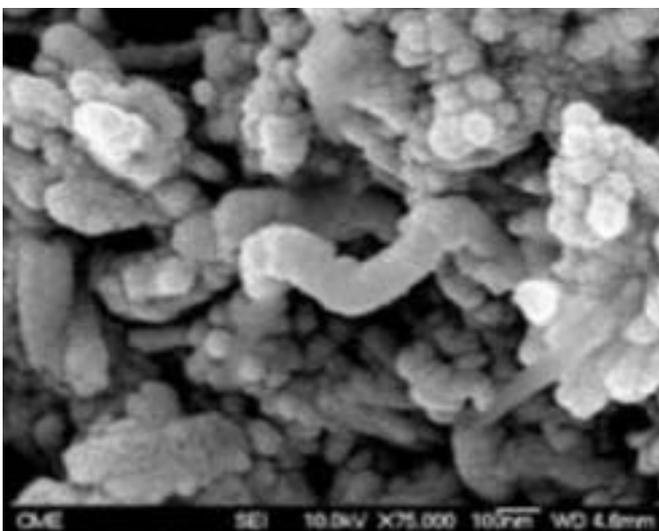


Figura 8. MWNFC metalizadas con Cu por electroless.



Figura 9.- MWNFC metalizadas con Ni-P mediante electroless.

CONCLUSIONES

1. Se han obtenido nanofibras de carbono (nanotubos de C, multi pared), en horno vertical, mediante el procedimiento CVD de catalizador flotante.
2. Mediante la adición de NFC a matrices de poliéster o vinilester, se han obtenido materiales compuestos conductores. El índice de percolación calculado mediante la determinación de la resistividad superficial es del 0,25% en peso de NFC. Esto permite fabricar materiales tipo Gel-Coat, para aplicaciones diversas, como la fabricación de depósitos de combustible, que permiten disipar corrientes electrostáticas.
3. Mediante la adición de NFC a materiales compuestos de matriz polimérica y refuerzo de fibra de vidrio (tejido o mat (distribución aleatoria de fibras largas)), se han podido fabricar piezas destinadas a la industria del transporte, que presentan una elevada conductividad, y que pueden ser pintados mediante procedimientos electrostáticos. Igualmente, estos nuevos materiales compuestos conductores, pueden ser utilizados para sistemas de apantallamiento electromagnético y de radio frecuencia.
4. Se han obtenido pinturas conductoras en base a poliuretano, mediante la adición de NFC, desde el 1 al 5% en peso.
5. La adición de un 2% en peso de NFC a materiales compuestos fabricados con resinas de poliéster y fibra de vidrio en forma de mat o tejido, incrementa los valores de resistencia mecánica en torno a un 18%. ■

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M.Y. Chen, Z. Bai, S.C. Tan, M.R. Unroe. *Wear* 252 (2002) 625-634.
2. R. Kamalakaran, F. Lupo, N. Grobert, T. Scheu, N.Y. Jin, M. Rühle. *Carbon* 42 (2002); 1-4.
3. Y. Morisada, Y. Miyamoto, *Mater. Sci. Engineer. A* 381 (2004) 57-61.
4. C.L. Xu, B.Q. Wei, R.Z. Ma, J. Liang, X.K. Ma, D.H. Wu, *Carbon* 37 (1999) 855-858.
5. S.J. Park, K.R. Lee, D.H. Ko, K.Y. Eun, *Diamond and Related Materials* 11 (2002) 1747-1752.
6. J. Nie, J.C. Jiang, L. D. Tung, L. Spinu, E.I. Meletis, *Thin Solid Films* (2002) 211-218.
7. F. Zhang, J. Shen, J. Sun, *Mater. Sci. Engineer.A* 381 (2004) 86-91.
8. E. T. Thosteson, Z. Ren, T.W. Chou, *Composites Science and Technology* 61 (2001) 1899-1912.
9. P. Ciselli, O. Regev, C. Koning, M. Baxendale, T. Peijs, 11th. European conference on Composite Materials, May31-June3-2004. Rhdes, Greece.
10. F. H. Gojny, H.G. Wichmann, B. Fiedler, K. Schulte., 11th. European conference on Composite Materials, May31-June3-2004. Rhdes, Greece.
11. Haque, A. Ramasetty, 11th. European conference on Composite Materials, May31-June3-2004. Rhdes, Greece.
12. F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, U. Köpke, B. Fiedler, K. Schulte,
13. *Composite Science and Technology*, 64, 15 (2004) 2363-2371.
14. M.K. Seo, S.J. Park, *Chemical Physical Letters* 395 (2004) 44-48.
15. E. Kymakis, G.A.J. Amaratunga, *Synthetic Metals* 142 (2004) 161-167
16. P. Pötschke, A. R. Bhattacharyya, A. Janke, *Carbon* 42 (2004), 965-969.
17. Kevin P. Ryan et al. *Chemical Physics Letters* 391 (2004) 329-333.
18. B. Muruyama, K. Alam (SAMPE Journal, Vol.38 No3 (2002) 59-70.
19. R.A. Vaia, T. Benson Tolle, G.F. Schmitt, D. Imeson, R.J. Jones. *SAMPE Journal*, vol.37, No.6 (2001) 24-31.
20. M.J. O'Connell et al., *Chemical Physics Letters*, Vol. 342 (2001) 265-271.
21. P.V. Lakshminarayanan, H. Toghiani, C.U. Pitman Jr., *Carbon* (2004) 2433-2442.
22. S. Yoon, S. Lim, Y. Song, Y. Ota, W. Qiao, A. Tanaka, I. Mochida, *Carbon* 42 (2004) 1723-1729.
23. F. Zhang, J. Shen, J. Sun. *Materials Science and Engineering A381* (2004) 86-91
24. S.J. Park et al. *Diamond and Related Materials* 11 (2002) 1747-1752.
25. Baker R.T.K., Barber M.A., Feates F.S., Harris P.S., White R. J., *Journal of Catalysis* 26, 51 (1972).
26. Oberlin A., Endo M., Koyama T. *Journal of Crystal Growth* 32, 335 (1976).

Nanocompuestos: oportunidades y retos

AUTORES: BUSTERO I., MARKAIDE N., GARMENDIA N., GARCÍA A., BARCENA J., OBIETA I.
INASMET-Tecnalia,
Pº Mikeletegi 2, 20009 San Sebastián, España
iobieta@inasmnet.es

1. INTRODUCCIÓN

Las nanotecnologías están considerando en todo el mundo como las tecnologías clave del S. XXI. Los nanoproducidos y nanoprocesadores poseen un potencial económico enorme para los mercados del futuro. La creación de productos aún más pequeños, más rápidos y más eficaces con una relación calidad precio aceptable se ha convertido en un factor de éxito cada vez más importante en la competición internacional de muchos sectores.

En el sector del automotor también se presenta un gran potencial para las aplicaciones nanotecnológicas con varios productos que ya están en el mercado. Se prevé que la nanotecnología y las tecnologías afines afecten de forma drástica a la industria del automotor en los próximos 10 años [1].

Algunos de los retos para la industria automotora general están relacionados con las *emisiones contaminantes, el consumo de combustible, la fiabilidad, la seguridad o peso de las estructuras de los coches*. La ligereza, una mayor fuerza y materiales estables térmicamente hablando son deseables en varios dominios de la industria automotora como el chasis y partes del mismo, motores y trenes eléctricos, pinturas y revestidos, así como sistemas de suspensión y freno. Se pueden encontrar soluciones revolucionarias con nanomateriales avanzados como nanocompuestos de fuerza superior o nanoestructuras adaptables y activas.

En todo caso, todas estas oportunidades serán posibles si estas nuevas tecnologías pueden superar los retos implícitos:

a) Retos técnicos: la manipulación y observación de los materiales y sistemas de tamaño nanoscópico no son obvias. La fiabilidad, reproducibilidad, etc... ha de estar dirigida a la obtención de productos reales

b) Regulaciones y normas: son otros aspectos importantes en estas nuevas tecnologías ya que están surgiendo preocupaciones relacionadas con el impacto toxicológico así como con la normalización de las especificaciones

c) Coste y cantidades: puede ser otro tema aunque estos materiales están en subdesarrollo ya que ningún fabricante a gran escala está dispuesto a producir grandes cantidades, por lo que el precio no puede ser más bajo.

Los **nanocompuestos** son uno de los nanomateriales más versátiles para conseguir las características demandadas por este sector [1]. Se pueden incorporar diferentes nanoestructuras a una matriz para formar un nanocompuesto. En este documento sólo se describen los nanocompuestos que incorporan **nanotubos de carbono** como parte de una gama completa de nanocompuestos desarrollados en Inasmnet.

2. NANOTUBOS DE CARBONO

El interés por los nanotubos de carbono (CNT) ha experimentando un gran crecimiento durante la última década. Sus interesantes propiedades físicas y químicas abren posibilidades atractivas en muchas áreas de aplicación. Estas propiedades dependen de las condiciones del proceso de síntesis y las consiguientes fases de funcionalidad. Hay que superar varios retos de procesamiento fundamental para que se dé el refuerzo aplicable por parte de los nanotubos o nanofibras. La superficie atómicamente lisa o la carencia de nexos interfaciales de los nanotubos de carbono limitan la transferencia de carga de la matriz a los nanotubos. Además, con las fuerzas intrínsecas de van der Waals, los nanotubos se mantienen unidos normalmente como haces y poseen una solubilidad muy baja en la mayoría de los disolventes. Cuando se mezclan en una matriz, los nanotubos tienden a salir como aglomerados enredados y no es fácil obtener dispersiones homogéneas.

Actualmente se están realizando experimentos centrados principalmente en la funcionalidad a medida del nanotubo con el fin de solucionar esos problemas, así como experimentos con diferentes técnicas de dispersión.

INASMET ha desarrollado procesos para la síntesis, la purificación y la dispersión de nanotubos de carbono y ha optimizado los parámetros más importantes mediante un diseño experimental [2, 3].

El catalizador utilizado en este trabajo es Ni con $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. La síntesis de los CNTs se realizó en un reactor



Imagen 1. Imagen AFM (Microscopio de Fuerzas Atómicas) de MWNT sintetizado por CVD y purificado mediante el proceso establecido.

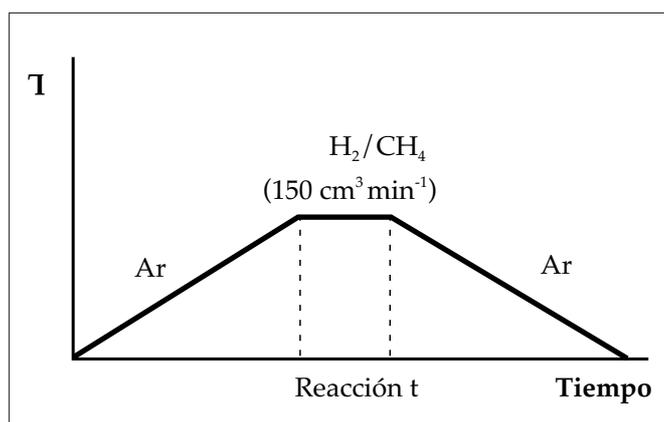


Figura 2 Ciclo de la temperatura del proceso de síntesis. La temperatura de reacción va desde los 850°C hasta los 1000 °C y el tiempo de reacción desde los 10 min. hasta los 20.

tubular de quartz situado en un horno horizontal con CH₄ (99,95%), H₂ (99,99%) y Ar (99,99%). El proceso de síntesis sigue el ciclo de la Figura 2.

Se ha estudiado el efecto de la temperatura, la masa del catalizador, el consumo de gas y el tiempo de reacción en el campo de los CNTs en el proceso de síntesis. Se han medido dos tipos de respuestas: el porcentaje de conversión del CH₄ en C y la cantidad de CNTs en la muestra producida.

Las mejores condiciones de síntesis para las dos respuestas estudiadas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de funcionamiento óptimas para la síntesis de CNTs mediante CVD.

CONDICIONES ÓPTIMAS	
Tiempo de reacción	10 min
Temperatura	1000°C
Masa catalizadora	0,5 g
Índice H ₂ /CH ₄	1

Los Nanotubos de Carbono Multipared obtenidos han sido caracterizados por Raman y TGA, así como mediante AFM.

Los nanotubos de carbono obtenidos en las condiciones de funcionamiento óptimas se purificaron tal y como se aprecia en la Fig. 1. Es necesaria una limpieza completa multietapa para obtener muestras purificadas. La composición química después de retirar las partículas de metal fue analizada mediante espectroscopía de Emisión en Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES). Los CNTs se funcionalizaron adjuntando grupos carboxílicos en sus superficies. Estos grupos funcionales mejoran la solubilidad de los CNTs en disolventes polares y en matrices de polímeros como el PMMA. Los CNTs funcionalizados se caracterizaron cualitativamente mediante una espectroscopía FTIR (espectroscopía infrarroja transformada de Fourier).

3. NANOCOMPUESTOS

En Inasmet se están investigando aplicaciones varias de los nanocompuestos, todas ellas relacionadas con el sector de series cortas automotrices con las características más demandadas en cuanto a material y necesidades más específicas. Las aplicaciones descritas en este documento están relacionadas con la utilización de nanotubos de carbono (CNTs) dentro de diferentes matrices.

Uno de los mayores inconvenientes en la manipulación y la mezcla de los CNTs con una matriz es la dispersión. Sin embargo, otras dificultades, como la ausencia de humectancia, solubilidad y reactividad entre el carbono y la matriz hace especialmente importante la fase de funcionalización y la modificación de la superficie de los CNTs. Para cada matriz se estudia una ruta diferente para obtener los mejores nanocompuestos en cuanto a humectancia y dispersión, lo que debería significar la obtención de las mejores propiedades.

Las tres matrices estudiadas en este documento son:

- Compuestos de la matriz de cobre para una conductividad térmica elevada y capacidad de encaje CTE especialmente interesantes en los paquetes electrónicos de componentes de potencia superior. La modificación de la superficie de los CNT se obtiene mediante el cultivo en placas de cobre sin electricidad.

- Los nanocompuestos de matrices cerámicas para utilizar como barrera térmica en el sistema exhausto donde es necesario un aislamiento térmico bueno y unas propiedades mecánicas mejoradas. La buena adhesión entre la cerámica y los CNTs se obtiene por síntesis directa de nanozirconio en las paredes de los CNTs.

- Nanocompuestos de matrices de polímero: búsqueda de requisitos eléctricos especiales que pudiesen suministrar funcionalidades nuevas en cuanto a monitorización de fallos y sensibilidad al gas. En este caso las modificaciones orgánicas están muy documentadas.

3.1 Nanocompuestos de matriz metálica

La eliminación eficaz del calor es la única forma de mejorar la potencia, fiabilidad y eficacia de los componentes electrónicos. La matriz utilizada para este fin es el cobre. En este trabajo, los CNTs fueron recubiertos con cobre mediante la técnica llamada cultivo en placas sin electricidad. El cultivo en placas sin electricidad se basa en la reacción química que da lugar a la deposición de los elementos metálicos en el sustrato.

Se ha realizado un estudio micro estructural completo mediante Microscopía Electrónica de Barrido y con más detalle por Microscopía Electrónica de Transmisión tanto de la pérdida de compuestos como del material aparente consolidado. Se midieron las propiedades termofísicas preliminares.

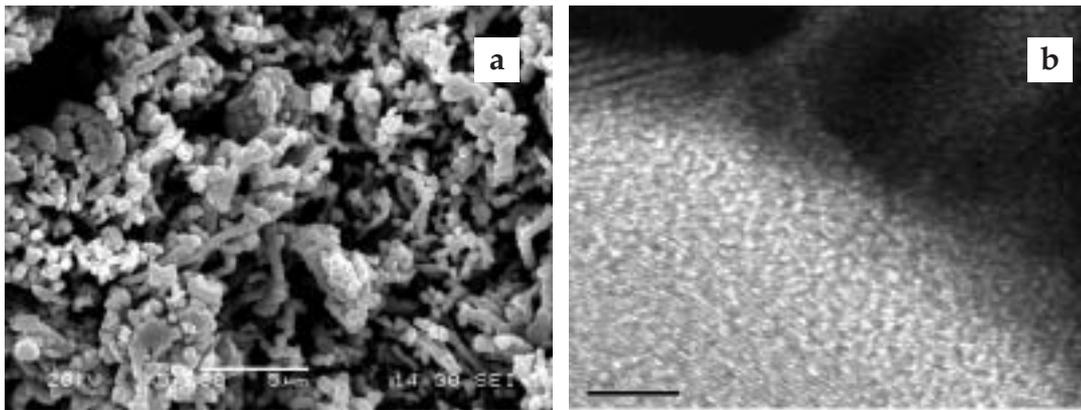


Fig. 3: Microestructura de muestras antes del aglomerado por calor: (a) imagen SEM de nanotubos cubiertos (20 vol. %), (b) interfaz Cu/CNTs .

La Fig 3a y b nos muestran algunas imágenes de las pérdidas de compuestos con nanotubos antes de aglomerarlas por calor. En la Fig. 3 A se recubre de forma homogénea y continua toda la superficie de fibra de los nanotubos. La Fig 3b ilustra la interfaz cobre-CNT que demuestra la buena interacción del cobre con los CNTs.

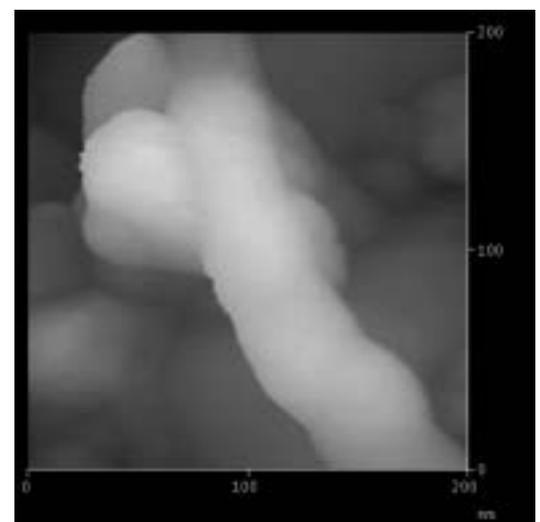
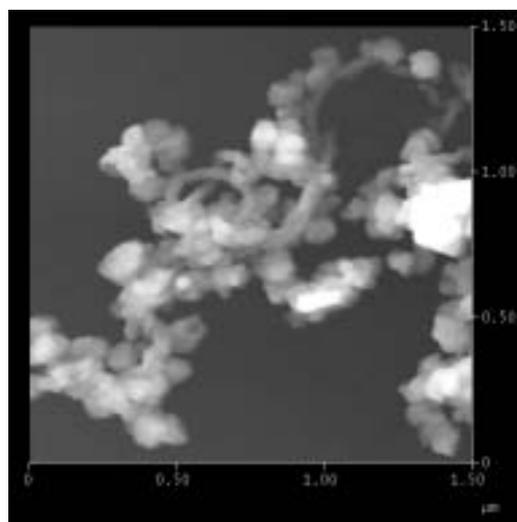
Se ha demostrado que 900 °C y 35 MPa son los parámetros adecuados para obtener buenas propiedades en cuanto a la distribución del refuerzo y la densidad.

3.2 Nanocompuestos de matriz cerámica

Actualmente las cerámicas de zirconio se utilizan mucho como barreras térmicas, pero aún no se solucionaron los problemas relacionados con la propagación de roturas en aplicaciones de fines generales [4]. En este trabajo, las harinas de nanocompuestos ZrO₂ mezcladas con MWNTs fueron fabricadas y caracterizadas mediante varias técnicas, asaber, XRD, FTIR, SEM, TGA, Raman y AFM.

La síntesis hidrotérmica se utilizó con Zr(OH)₄ en una solución acuosa MWNT en autoclave de teflon a 240° C. En la imagen AFM de la Fig. 4, podían observarse las nanopartículas ZrO₂ distribuidas en la pared de los MWNTs. La interfaz fue estudiada y comparada con otras técnicas.

Figura 4. Imágenes de Microscopio de Fuerzas Atómicas (AFM) de CNTs cubiertos por nanozirconio. La interfaz puede observarse con una resolución superior.



Los enlaces entre Zr y los CNTs han sido determinados por XPS. Los nanotubos cubiertos deberían ofrecer una humectancia mejor en la matriz cerámica y mejorar la dispersión de los CNTs para obtener el nuevo nanocompuesto cerámico deseado con una barrera térmica y propiedades mecánicas mejoras así como una mejor fiabilidad.

3.3. Nanocompuestos de matriz de polímeros

Los compuestos de nanopolímeros son los nanomateriales más ampliamente estudiados y ya se utilizan en la industria automotriz. La propiedad principal dirigida por estas aplicaciones es el buen comportamiento mecánico con materiales más ligeros. En los dos proyectos en los que Inasmet está trabajando, tienen como objetivo nuevas funcionalidades. La primera es la monitorización de las tensiones estructurales y, la segunda, las capacidades de sensibilización al gas con la mejora de la robustez utilizando nanotubos de carbono.

De nuevo, y como ya mencionamos, el reto es obtener una dispersión buena de los nanotubos dentro de la matriz y una interfaz perfecta entre el CNT y la misma. En la Fig. 5 podemos observar ambas dificultades, en la izquierda (5a) un nanotubo no humectante con la matriz epoxi y en la derecha (5b) un conglomerado de CNTs dentro de una matriz, en la que también se pueden observar CNTs muy bien dispersos.

Desde la primera aplicación, la respuesta electromecánica de los nanotubos de carbono es utilizada para la monitorización de cargas y tensiones en las estructuras de los componentes. La propiedad principal que ha de controlarse es la conductividad eléctrica del nanocompuesto. Se trabajó en la influencia del grado de dispersión con diferentes funcionalidades.

El control de una resistencia eléctrica en un compuesto está siendo estudiada como una propiedad que podría alertar de un fallo posible o de daños mecánicos de partes cruciales de coches o aviones [5].

La segunda aplicación tiene en cuenta el sentido del mecanismo de un nanocompuesto basado en la matriz PMMA con MWNTs cuando se expone a VOCs. Se está estudiando el efecto de la funcionalización sobre la mejora de dispersión, capacidad de absorción y reversibilidad del mecanismo.

La conductividad eléctrica de este compuesto PMMA se modifica radicalmente cuando se expone a varios disolventes como tolueno y acetona, demostrando que se podría utilizar como mecanismo sensible al gas, aunque debería comprobarse la reversibilidad y evaluarse el tiempo de respuesta [6].

4. OTROS RETOS

Los retos **técnicos** explicados como la manipulación de los nanomateriales deberían tenerse en cuenta a la hora de intentar establecer el **momento de comercialización** de todos estos productos. Muchos experimentos y financiaciones están dirigidas a estos aspectos.

El **coste** de los nanomateriales, en especial de los CNT, es un tema que evoluciona día a día y se estima que termine en un futuro próximo tan pronto como las grandes compañías empiecen a producir en serie este tipo de productos. Los proveedores pueden tener limitaciones de CNT mientras las carteras de **patentes** de algunas grandes compañías japonesas no se queden obsoletas.

La **carencia de especificaciones** relacionadas con la metrología de estos nanoproducidos es un reto que durará ya que algunas de las **mediciones** que se van a llevar a cabo para obtener las especificaciones dependen en gran medida de la propia comprobación de los materiales y de la dificultad de estandarización.

Los temas de **toxicidad** son especialmente relevantes cuando hablamos de industrialización de los nanoproducidos por lo que se están realizando gran cantidad de investigaciones en todo el mundo. La Comisión Europea, así como el NNI en Estados Unidos financia la investigación sobre la toxicidad de los nanomateriales, especialmente la de los nanotubos.

La inversión futura en experimentos e investigaciones va a continuar siendo crucial para obtener productos más re-

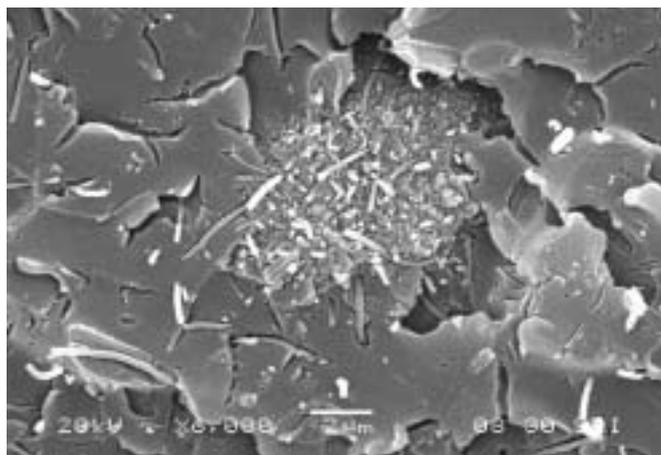


Fig 5. SEM de nanotubos carbono en epoxi. Problemas (a) adhesión, (b) dispersión.

producibles en el mercado. Las tecnologías disruptivas tardan más en llevarse a cabo.

5. CONCLUSIONES

El gran potencial de los nanomateriales en la industria automotriz ha sido revisado así como los retos principales que han de superarse para lanzar productos reales al mercado.

Los retos técnicos relacionados con el conocimiento, la manipulación y la caracterización de estos nanomateriales deberían estar dirigidos por la comunidad investigadora pero con la valoración de las industrias que se enfrentan día a día a los problemas y a los retos.

Se han descrito los tres nanocompuestos distintos basados en la incorporación de nanotubos de carbono y sus aplicaciones. Se han obtenido resultados halagüeños en todos los casos. ■

6. REFERENCIAS

- [1] J. Loeffler, U. Sutter, E. Jourdain, S. Kristiansen, *Roadmap Report Concerning the Use of Nanomaterials in the Automotive Sector*, Steinbeis-Europa-Zentrum of Germany, March 2006.
- [2] García A., Bustero I., Muñoz R., Goikotxea L., Obieta I. "Carbon Nanotubes for biological devices", *Physica Status Solidi (a)*, 203, 6, 1117-1123 (2006).
- [3] Bustero I., García A., Obieta I., Muñoz R., Rincón I., Arteché A., "Control of the Properties of Carbon Nanotubes Synthesized by CVD for Application in Electrochemical Biosensors" *Microchimica Acta*, 152, 239-247 (2006).
- [4] Yan Shan, Lian Gao: "Synthesis and characterization of phase controllable ZrO₂-carbon nanotube nanocomposites". *Nanotechnology* 16, 625-630 (2005).
- [5] J. Sanchis, *Building Smart Materials using Carbon Nanobutes*, 2002
- [6] J. Abraham, B. Philip, A. Witchurch, V. Varadan, C. Reddy, *A compact wireless gas sensor using a carbon nanotube / PMMA thin film chemiresistor*, *Smart Materials and Structures*, 13 (2004) 1045-1049.

En el centenario del Nobel a Cajal: el mérito y la vigencia de una trascendental obra científica

AUTORES: ADOLFO TOLEDANO¹, MARÍA ISABEL ÁLVAREZ¹, ADOLFO TOLEDANO-DÍAZ²
 1. Instituto Cajal, CSIC, Madrid
 2. Departamento Reproducción, INIA, Madrid

LOS MOTIVOS DEL NOBEL

Celebramos en 2006 el centenario de la concesión del Premio Nobel de Medicina y Fisiología a don Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) "en atención a sus meritorios trabajos sobre la estructura del sistema nervioso". Comparte el Nobel con Camilo Golgi, inmerecidamente premiado, a juicio de la historia. Este científico era totalmente contrario a la teoría neuronal de Cajal, tal como él mismo se encargó de poner de manifiesto, reiterada e inelegantemente, en su discurso de aceptación del premio, aunque nuestro galardonado, al día siguiente en el suyo, hizo una loa de todos y cada uno de los neurohistólogos europeos que se dedicaban al estudio del Sistema Nervioso, "obra maestra de la vida" como él lo denominaba, con especial ensalzamiento de la "técnica de Golgi". Este premio coronaba, por el momento, una fulgurante carrera científica que iba a ser de una trascendencia mucho mayor de lo que por aquel entonces podía suponerse. Aunque no puede negarse el interés de algunos trabajos de investigadores anteriores o coetáneos (Kolliker, Erlich, Golgi, etc.), Cajal es el indiscutible padre de todos los campos teóricos o aplicados de la Neurociencia: la neurología, la neurobiología, la neuropatología. El Nobel era un reconocimiento no sólo a una teoría sobre la base celular del Sistema Nervioso (la teoría neuronal), sino a una concepción citoarquitectónica funcional extremadamente precisa y delicada de cada una de las partes del Sistema Nervioso que estaban jerárquicamente interrelacionadas para cumplir todas sus funciones, desde las más simples a las más complejas. Cuando Cajal recibe su Nobel, además de haber publicado 150 trabajos sobre el Sistema Nervioso en revistas científicas (14 de ellas en revistas en lengua extranjera y 55 en las revistas fundadas por él para mostrar al mundo los resultados de sus investigaciones), ha recopilado sus investigaciones en un extenso compendio, "La Textura del Sistema Nervioso del hombre y de los vertebrados", publicado en castellano, en 3 volúmenes (1897, 1899, 1904), y dos extensas monografías en alemán sobre la corteza cerebral del hombre y los mamíferos (*Studien über die Hirnrinde des Menschen*, Leipzig, J. Barth, 1906) y sobre la retina de los vertebrados (*Die retine der Wirbelthiere*, Berlin, 1894). Después de 1906, Cajal continúa describiendo con sus técnicas todas las partes del



Arriba, Santiago Ramón y Cajal. Izquierda, anverso de la medalla del Premio Nobel.

Sistema Nervioso e inicia el estudio de las alteraciones del mismo. La dedicación a la Neurociencia se incrementa grandemente en todo el mundo, pero serán necesarias varias décadas para empezar a comprobar todas sus teorías sobre la conducción de impulsos, el envío de las señales de una a otra célula, la organización funcional de los circuitos, sus capacidades de adaptación y mantenimiento, y sus problemas patológicos. Hoy día, en la base de todo lo que se conoce, en la teoría y en la práctica clínica, está la obra de Cajal, pero también lo está en lo que se investiga en este momento y lo que se prevé hacer en el futuro. Con su ayuda llegaremos tanto a conocer el fundamento morfofuncional de muchas funciones cognitivas como a definir las aproximaciones terapéuticas más innovadoras (terapias celulares y génicas) que nos llevarán a prevenir o paliar las alteraciones de estas funciones cerebrales.

CAJAL, UNO DE LOS CIENTÍFICOS MÁS

GALARDONADOS DE LA HISTORIA

Sorprende bastante que en un país con muy poca dedicación a los estudios científicos en general, y a los de la biomedicina en particular, pueda surgir un genio e irrumpir en el mundo científico al más alto nivel, con ideas revolucionarias, arrasando los conceptos antiguos y consiguiendo la total aceptación de sus teorías.

Cajal puede colocarse a la cabeza de los científicos más galardonados de todos los tiempos. Desde la última década del siglo XIX, era ya admirado por sus descubrimientos y había recibido los más altos galardones científicos, como la invitación de la Royal Society inglesa a pronunciar la prestigiosa "Croonian Lecture" anual (1894), reservada al científico más relevante; el Premio Moscú (1900), a la mejor labor científica otorgado por el Congreso Mundial de Medicina de París, y la Medalla de Oro Helmholtz, de la Academia de Berlín (1905), premio más prestigioso que el Nobel y que sólo se concedía ante extraordinarios descubrimientos científicos. Después del Nobel recibiría más de trescientos premios y nombramientos nacionales e internacionales de Universidades y Centros científico-culturales de todo el mundo, la mayoría de cuyas acreditaciones se encuentran en el museo Cajal de Madrid.

SU OBRA CIENTÍFICA: DE LA TEORÍA

NEURONAL A LA DESCRIPCIÓN DE LOS

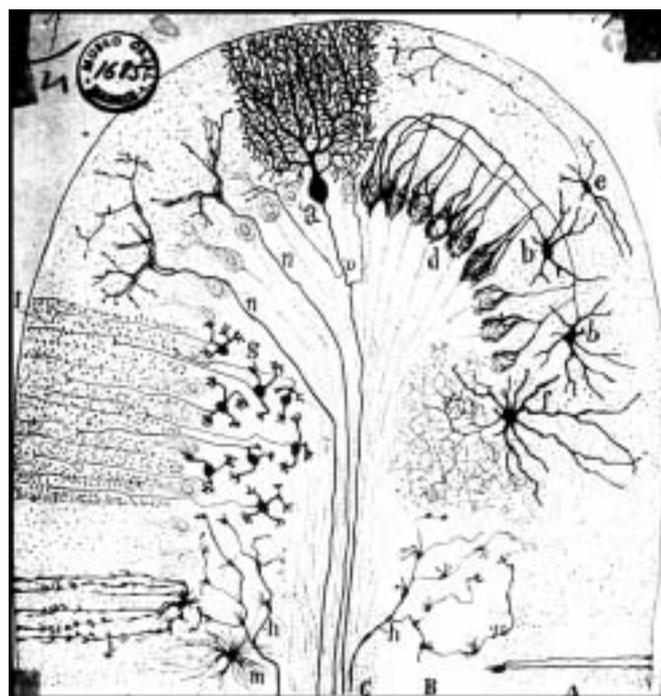
CIRCUITOS NEURONALES DEL CEREBRO

Todo lo que sabemos de Cajal, tanto de sus vivencias personales como de las vicisitudes de su labor científica (ideas y reflexiones; éxitos y fracasos; planificación de los experimentos y difusión de sus resultados) proviene de sus memorias, escritas bajo el título de "Recuerdos de mi vida" (primera edición, 1901; segunda edición, 1917; tercera edición, 1923; cuarta edición, 1932; cada una de ellas, lógicamente ampliada), que han servido como fuente de información para todos aquellos que han deseado escribir o hablar del maestro y de su obra. Buceando en ellas, leyendo sus trabajos y contemplando sus dibujos podemos seguir su trayectoria científica y comprender la trascendencia de su obra. En esta autobiografía Cajal considera que la labor científica realizada tiene tres etapas diferenciadas por sus objetivos y metodologías. La primera etapa ocupa el tiempo dedicado a la histología en general (1877-1887), desde que realiza su doctorado en Medicina hasta que se dedica de lleno al estudio del Sistema Nervioso. La segunda etapa comprende sus estudios sobre el Sistema Nervioso con el método de Golgi, que le llevan a enunciar la teoría neuronal y comenzar a estudiar los circuitos neuronales (1887-1903). La tercera etapa, que él considera que se inicia en 1903, y que nosotros podemos decir que continúa hasta su muerte, ya que nunca dejó de trabajar, se caracteriza por la consecución de nuevas técnicas de

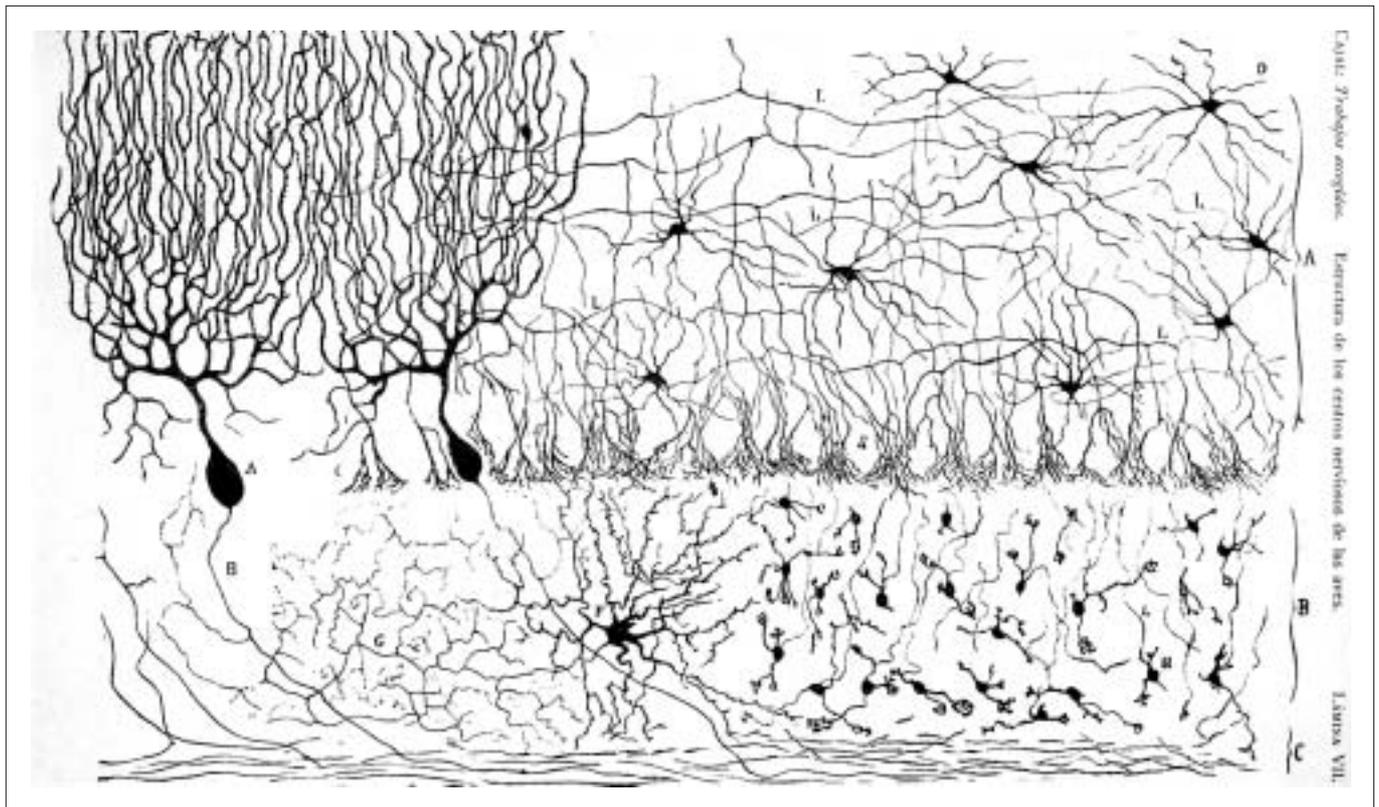
impregnación metálica (en especial la técnica de impregnación de plata) con las que le es posible estudiar todos los tipos de células neuronales, con sus conexiones, y gliales de la gran mayoría de las regiones del Sistema Nervioso, así como deducir muchas de sus propiedades.

Desde hace años, hemos considerado que existen cuatro momentos cruciales en su vida científica. Dos de ellos marcarán su absoluta dedicación al estudio del Sistema Nervioso, y otros dos que serán el inicio de sus éxitos y, al mismo tiempo, el nacimiento de la Neurociencia.

El descubrimiento de la histología tiene lugar de la mano del catedrático de esta asignatura de doctorado "Histología normal y patológica", Profesor Maestre de San Juan, cuando viene a Madrid para realizar su doctorado, que por aquel entonces sólo podía cursarse en la capital, y que le era necesario para obtener una cátedra. En este momento se da cuenta que los estudios microscópicos son el futuro de la investigación y decide comprarse un microscopio con sus pequeños ahorros de médico militar. También hay que señalar que se siente atraído por el Sistema Nervioso. El segundo momento crucial acaece cuando, tras obtener el doctorado y la cátedra de "Anatomía descriptiva y general" (1885) de Valencia, se prepara para opositar a las cátedras de "Histología normal y patológica", de nueva creación en la Licenciatura de Medicina, decide escribir un "Manual de histología normal y técnica micrográfica" como método más seguro para obtener una plaza (esta obra verá la luz, por primera vez, en 1889 en Valencia). Cajal dedica mucho tiempo a los estudios histológicos de diversos tejidos para su libro, llevados a cabo ahora con un microscopio Zeiss, lo mejor de su época, regalo de la Diputación de Aragón por sus trabajos sobre el diagnóstico y la



Esquema de laminilla cerebelosa, 1889.



Células del cerebelo de la gallina, 1888, donde por primera vez se describen las neuronas de forma independiente (teoría neuronal).

profilaxis en una epidemia de cólera que había asolado gran parte de España. Como le atrae especialmente el Sistema Nervioso, no deja de interesarse por todas las nuevas técnicas que producen mejores tinciones de sus células integrantes, y es en una visita a Madrid, con motivo de ser miembro de un tribunal de oposiciones a cátedra, cuando el Profesor Simarro, catedrático de psiquiatría y gran histólogo, le muestra a Cajal preparaciones realizadas con el método de Camilo Golgi (la "reazione nera") que acaba de traer de París. A Cajal "le impresiona la delicadeza de las fibras nerviosas" obtenidas con el método, pensando que deberían tener algún significado relacionado con su organización y su función. A partir de aquí, mejorando la técnica de Golgi, su obsesión es desentrañar la organización del Sistema Nervioso.

Las nuevas teorías sobre la estructura y función del Sistema Nervioso tienen dos momentos claves, en 1888 y en 1903, y están relacionadas con su genial capacidad de interpretación de las estructuras vistas al microscopio, donde ve lo que nadie percibe. En sus memorias, Cajal cuenta así estos dos momentos. El primero fue el descubrimiento de la teoría neuronal cuando ya estaba de catedrático en Barcelona: "1888 fue mi año cumbre, mi año de fortuna la nueva verdad [la teoría neuronal], laboriosamente buscada y tan esquiva durante dos años de vanos tanteos, surgió de repente en mi espíritu como una revelación. Las leyes que rigen la morfología y las conexiones de las células nerviosas en la substancia gris, patentes primeramente en mis estudios del cerebelo, confirmáronse en todos los órganos sucesivamente explorados". El segundo momento de inspiración clave para su obra ocurre en 1903 y marca el inicio de la tercera etapa que men-

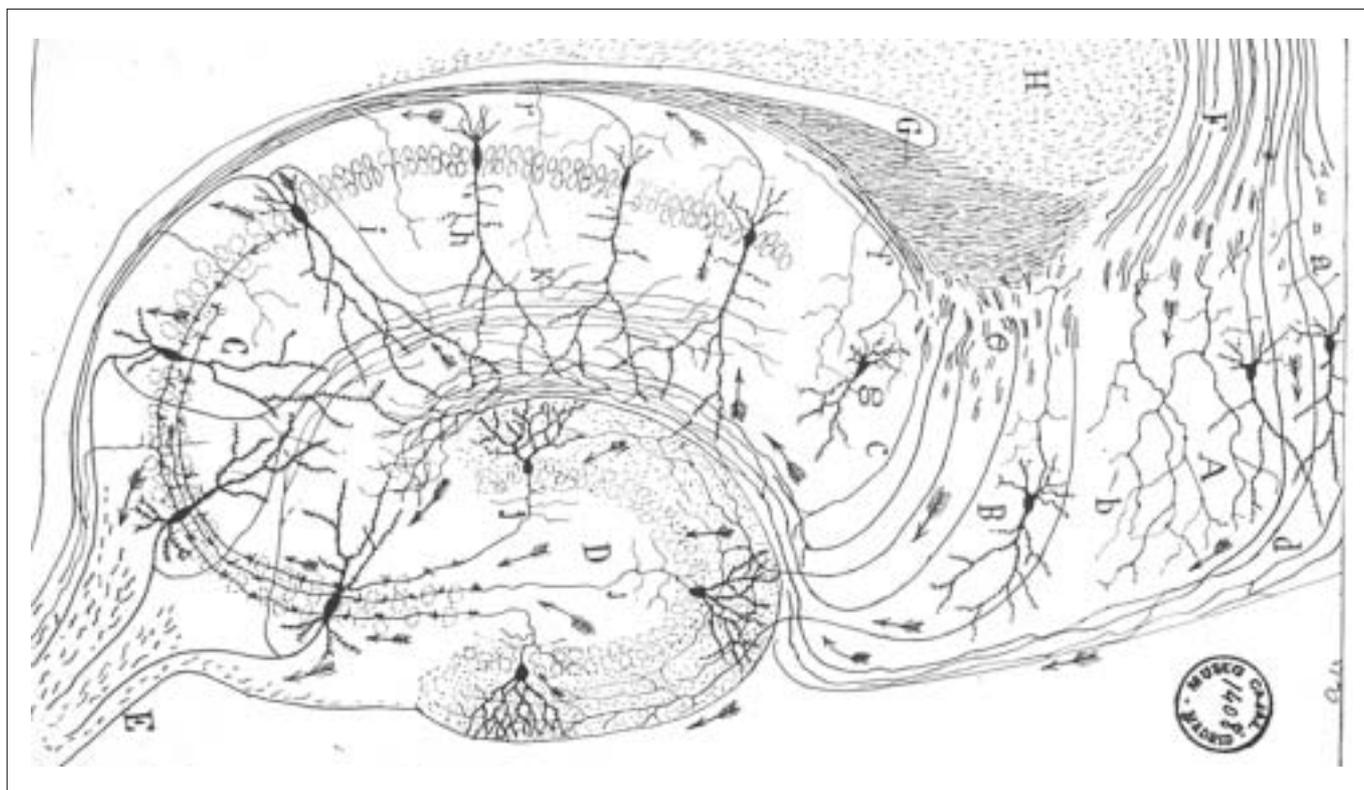
cionábamos antes cuando Cajal consigue nuevas técnicas para teñir ("impregnar") las neuronas y las células gliales que le son necesarias para descibir la estructura de los centros nerviosos, las conexiones neuronales y la funcionalidad previsible de los circuitos y sus modificaciones. Con su ímpetu habitual lo describe así: "Después de infructuosas tentativas... mis preparaciones no decían nada nuevo. Por aquel entonces (agosto 1903) y a guisa de sedante del cerebro sobreexcitado, emprendí viaje de placer por la seductora Italia. ...ya iniciado el viaje de regreso y vibrante el cerebro por el recio trepitar del tren, apoderase de mí, con la obsesión de la idea fija, cierta sencillísima hipótesis... la substancia enigmática generadora de la reacción neurofibrilar debe ser pura y sencillamente el nitrato de plata caliente... A mi llegada a Madrid caí sobre los animales experimentales... como el león sobre su presa... Y ensayé la fórmula imaginada, cuyos resultados fueron admirables".

Para entender la trascendencia de la teoría neuronal hay que tener en cuenta que, por entonces, se consideraba probado que los tejidos estaban compuestos por elementos independientes (teoría celular), pero que las células del Sistema Nervioso unían sus prolongaciones para establecer una red (teoría reticular) por la que circulaban, en todos los sentidos, los impulsos nerviosos que salían por algunas fibras terminales desde algunas células hasta los órganos internos o los músculos. La teoría neuronal supone tanto generalizar la teoría celular, acabando con su último reducto reticular, como iniciar una nueva era en la que hay que construir un nuevo concepto morfofuncional del Sistema Nervioso en el que las neuronas se deben organizar para hacer circular los impulsos nerviosos de una manera racional para cumplir funciones preci-

sas, desde los más elementales reflejos apreciables en los animales menos desarrollados hasta las superiores funciones cognitivas del hombre. Cajal resume la teoría neuronal más o menos de esta forma: las células nerviosas (neuronas) son totalmente independientes, poseen unas prolongaciones receptoras de impulsos (dendritas) y una prolongación por la que envían sus impulsos (cilindro eje o axón). En conclusión, la teoría celular se cumple también en el Sistema Nervioso y es la base de todo su funcionamiento; las neuronas se relacionan formando circuitos muy precisos y muy complejos. Ya jubilado, Cajal escribe un libro, “¿Neuronismo o Reticularismo?”, considerado como su testamento científico, en el que se recogen todos sus argumentos sobre esta teoría, ampliados durante más de treinta años por los resultados de más de 250 trabajos. Su arrolladora capacidad de persuasión hizo que prácticamente se aceptaran sus teorías en pocos años, aunque se tardarían varias décadas en demostrar, a escala de la Microscopía electrónica, que existía un espacio de dimensiones reducidísimas (la hendidura sináptica) a escala de las regiones celulares en donde se efectúa la transmisión del impulso, y de que éste se mediatizaba por moléculas químicas. Cajal señala que ha sido capital en el descubrimiento de su teoría el desarrollo de las técnicas adecuadas y la elección del material biológico, fundamentalmente cerebelo de animales muy jóvenes cuando se desarrollan las neuronas para alcanzar el estado adulto. Y totalmente relacionado con su empeño en disponer de técnicas que le permitan “ver” con claridad las estructuras, está el segundo momento que describimos y que le permite ascender a la gloria de la Ciencia, pues no es sólo la enunciación de la teoría neuronal lo que le lleva a la concesión del pre-

mio Nobel, sino, además, y más importante todavía, el inicio de una obra ingente, que no acabaría hasta su muerte, el estudio sistemático de los circuitos neuronales de prácticamente todo el Sistema Nervioso.

En 1888 Cajal se embarca en la tarea de dar salida a sus ideas y resultados hacia Europa, consciente de que sólo con el reconocimiento internacional puede contribuir a financiar sus investigaciones y hacer avanzar los conocimientos para producir un beneficio a la medicina clínica. Decide actuar en tres frentes (“yo deseaba persuadir a todo trance. Me sublevaba la idea de pasar por iluso o por farsante”), primero creando a sus expensas una revista para publicar sus trabajos, después intentando publicar traducciones de los más importantes en algunas revistas europeas y, finalmente, asistiendo a los más importantes congresos internacionales. La “Revista Trimestral de Histología Normal y Patológica” ve la luz en 1888, editando 60 ejemplares para envío a los más afamados histólogos, y publicando su nueva teoría en sus tres primeros números. Luego se refundará en Madrid, como “Revista Trimestral Micrográfica”, en 1896. Durante muchos años escribe Cajal casi todos los textos, dibuja todas las figuras y fabrica personalmente las planchas para imprimir los grabados. Como no obtiene respuestas a sus envíos, costea traducciones de tres trabajos y consigue tres publicaciones “internacionales”, pero el espaldarazo internacional lo recibe en su primera asistencia al congreso de Berlín de 1889. La fuerza demostrativa de sus preparaciones histológicas, especialmente bien recibida por Kolliker y otros importantes investigadores alemanes de renombre mundial le abren ya definitivamente las puertas de las



Esquema del hipocampo, 1902. Las flechas señalan la marcha de los impulsos nerviosos.

revistas internacionales y de ahí surgen las primeras invitaciones a las más importantes universidades europeas.

Cajal, magnífico dibujante y pintor, complementa sus descripciones histológicas con unos extraordinarios dibujos científicos, donde representa todos los elementos neuronales y gliales característicos de cada región y las precisas conexiones entre las neuronas. De los más de 4.000 dibujos de Cajal, se conservan 2.374 ejemplares en su museo del Instituto Cajal. Varios de ellos (el hipocampo humano, la laminilla cerebelosa, diversas regiones de la corteza cerebral, los ojos de los insectos, etc.) se cuentan entre los esquemas más reproducidos de la Biomedicina, y son sin ninguna duda lo más avanzado que se hizo nunca en investigación y lo más perdurable por su vigencia científica. La enorme amplitud y complejidad de su labor necesitó la ampliación de la revista que mencionamos, donde se recogen una parte muy importante y significativa de los 286 trabajos científicos que publicó, y la edición de su obra magna, la "Textura del Sistema Nervioso del hombre y los vertebrados" (Tomo I, 1897-99; Tomo II y III, 1904; adendas, 1905), que fue vuelta a escribir de forma más amplia y publicada en francés por Masson, Paris, bajo el título de "Histologie du Système Nerveux de l'homme et des vertébrés" (vol. I, 1909 y vol. II, 1911).

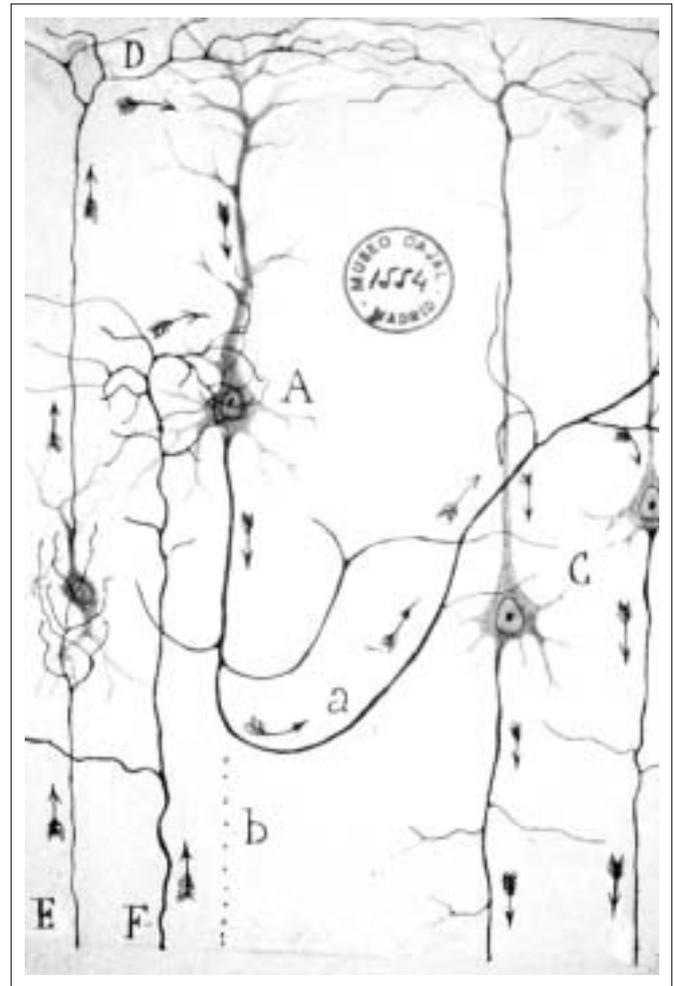
OTRAS TEORÍAS DE CAJAL

La polarización dinámica de la neurona. La génesis, degeneración y regeneración de los circuitos neuronales. El quimiotactismo neuronal. La adaptación neuronal.

El corolario funcional de la teoría neuronal es la denominada "ley de la polarización dinámica de la neurona", que precisa que los impulsos nerviosos se reciben en las dendritas y el soma, y que estos impulsos viajan hacia el axón para llegar a sus terminaciones, donde se transmiten a otra neurona o a otra célula no neuronal en el caso de los nervios periféricos. Las neuronas funcionando de ese modo forman circuitos muy precisos y los estímulos no viajan de una forma aleatoria.

Con la idea de la teoría neuronal, Cajal, absolutamente seguro de lo que observa se permite dar una interpretación funcional de lo que describe y dibuja. En un cierto número de sus figuras, especialmente aquellas que resumen la organización completa de centros cerebrales de especial interés (hipocampo, cerebelo, corteza cerebral, etc.) marca con flechas los flujos de los impulsos nerviosos. Estas minuciosas representaciones funcionales tardarán varias décadas en ser confirmadas punto por punto, con los modernos métodos de la microscopía electrónica, la bioquímica y la microscopía electrónica.

Una parte muy importante de sus trabajos los dedicó al estudio de las células acompañantes de las neuronas, las células gliales. A él se debe el desarrollo de técnicas específicas de tinción que le permitieron diferenciar los tipos y subtipos



Reestructuración de circuitos de la corteza cerebral tras la lesión axón.

de astrocitos y oligodendrocitos. Más tarde, su discípulo Pío del Río Hortega fue el descubridor del "tercer elemento", o microglía (célula de estirpe mesodérmica y no neuroectodérmica como el resto de la glía y todas las neuronas), que fue confirmado por Cajal. Con estas aportaciones ya se tuvo entonces un esquema completo de cada región del Sistema Nervioso y de las estrechas relaciones neuro-gliales, así como de las glío-vasculares. Los "pies chupadores" de los astrocitos dibujados por Cajal son la primera descripción morfofuncional de la glía, que forma una envoltura continua sobre los capilares sanguíneos, aislando totalmente al tejido nervioso del medio interno (la denominada con posterioridad "barrera hematoencefálica"). Este conjunto organizado de las diferentes células y vasos es la base actual para comprender la fisiología y la patología del Sistema Nervioso.

Cuando, a partir de 1903, Cajal ha descrito ya la citoarquitectura de los más importantes centros nerviosos, profundiza sobre la neurogénesis y la formación de los circuitos, así como sobre la involución y la capacidad de recuperación de las neuronas y los circuitos. Sus estudios sobre la neurogénesis y organogénesis del Sistema Nervioso son de permanente actualidad. El tubo neural embrionario forma una serie de células blásticas que derivarán en neuronas o en células gliales. Los

neuroblastos emigrarán hacia la parte periférica en oleadas sucesivas para estructurar diferentes tipos neuronales que se engarzarán de forma precisa para formar los circuitos neuronales del adulto. La constatación de que existe una “glía radial” que, fijada al tubo neural, crece hacia la periferia y es la guía en la emigración de las neuronas; la observación y descripción de que existe en las neuronas que se desarrollan un “cono de crecimiento” de características especiales para poder avanzar y configurar las prolongaciones de la neurona adulta, así como la presunción de que estas prolongaciones neuronales se dirigen a la zona precisa atraídas por factores químicos (“hipótesis quimiotáctica”, denominada posteriormente neurotropismo o neurobiotaxis), son todavía piezas fundamentales en el estudio actual del desarrollo normal y patológico del Sistema Nervioso. También en este momento tienen una gran importancia cuando las posibles terapias con las no muy apropiadamente denominadas “células madre” (que existen en el cerebro adulto), están siendo consideradas como la futura gran revolución en el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas. Sus dibujos y descripciones sobre la neurogénesis de la médula espinal y el cerebelo siguen figurando en todos los tratados e histologías de biología del mundo.

Desde el inicio de sus investigaciones, Cajal intuye que las neuronas tienen una gran capacidad de adaptación para formar los circuitos y mantenerlos, y emite diversas opiniones y teorías que actualmente son la base de lo que se conoce como “plasticidad neuronal”, es decir, la propiedad que tienen las neuronas para modificar sus características morfológicas y sus propiedades funcionales para cumplir óptimamente con sus funciones y responder a las agresiones. Quizás el fenómeno más conocido descrito por Cajal es el de la formación, crecimiento y modificación de las espinas dendríticas (cuya función de conexión axo-dendrítica acertadamente intuyó Cajal) en el desarrollo de circuitos durante el aprendizaje. Por otro lado, algunos autores llegaron a afirmar que la teoría neuronal llevaba implícita la incapacidad de recuperación de las neuronas y la degeneración de los circuitos neuronales cuando se lesionaba y moría uno de los eslabones neuronales en una cadena. Nada más incierto. Muchísimas experiencias sobre lesiones llevadas a cabo por Cajal en nervios periféricos, en el cerebro y en el cerebelo de diversas especies, recogidas en una monografía (“Estudios sobre la degeneración y regeneración del sistema nervioso”, vol. I y II, 1914) con más de 300 dibujos, son la base sobre la que se han desarrollado muchas de las investigaciones posteriores tendentes a lograr aprovechar las capacidades regenerativas del Sistema Nervioso en la lucha contra las lesiones cerebrales y las enfermedades neurodegenerativas. Si bien es cierto que las lesiones importantes, especialmente del axon, hacen degenerar la neurona, Cajal puso de relieve que existían fenómenos iniciales de reparación que podían llegar a tener éxito en el Sistema Nervioso Periférico y menos en el Central, pero que muchas adaptaciones de neuronas lesionadas, o de las neuronas supervivientes en una zona lesional, podrían tener importancia reparativa. Son muy interesantes sus descripciones de cómo axones colaterales pueden facilitar funciones

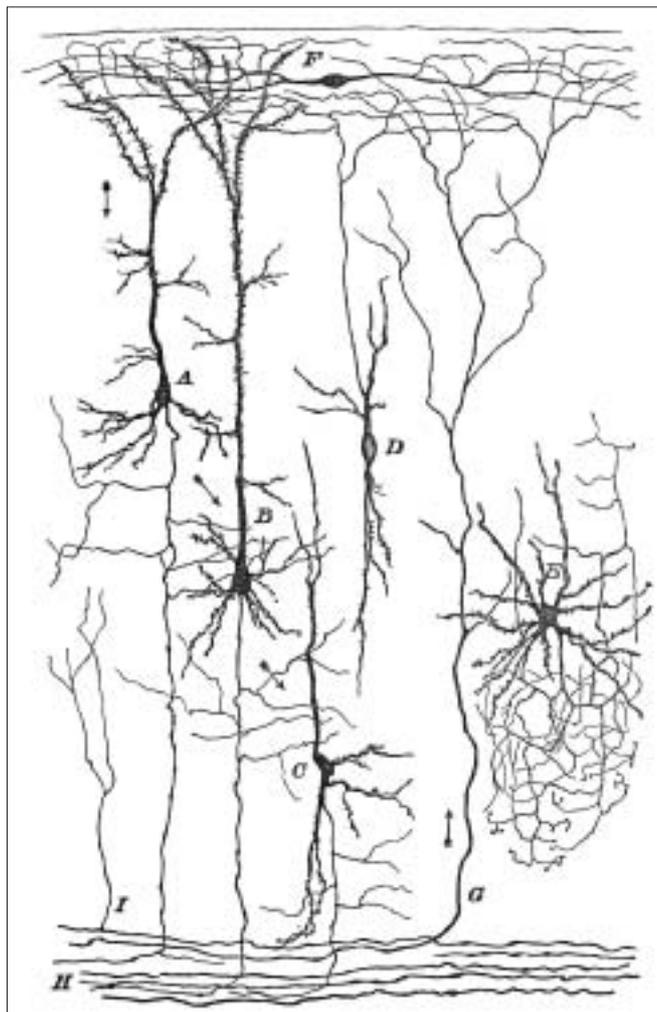
adaptativas en células vecinas no lesionadas (“conversión de neuronas de axon largo en neuronas de axon corto”).

REPERCUSIÓN DE LA OBRA

DE CAJAL EN ESPAÑA

La reforma de la Universidad y de la Investigación, el Instituto Cajal y la Junta para la Ampliación de Estudios

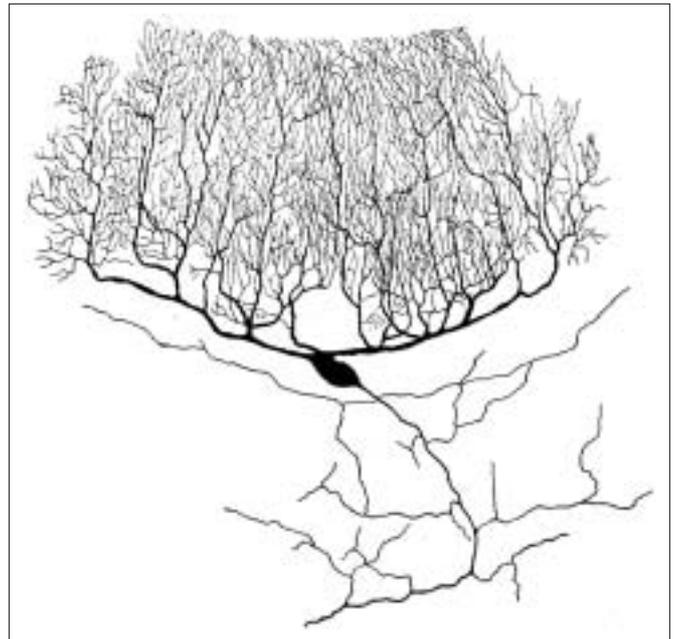
Si bien existe un consenso nacional e internacional sobre el hecho de que Cajal y su obra revolucionó la Ciencia y la Medicina como pocos galardonados con el Nobel lo han hecho, todavía se discute la repercusión que tuvo su obra en España. Muchas Instituciones, algunos discípulos, una nueva forma de concebir la enseñanza y la investigación, y una apertura de nuestra ciencia al mundo, son legados tanto del prestigio de Cajal como del desarrollo de su obra que podrían haber revolucionado la Ciencia y la Medicina en España. Pero como siempre, tras un periodo de grandes ideas y proyectos, las realizaciones nunca alcanzan las metas previstas, los personalismos priman sobre los ideales y las reformas nunca se completan.



Tipos de neuronas de la corteza cerebral.

Cajal obtiene la cátedra de “Histología normal y Anatomía patológica” de Madrid en 1892, tras los éxitos de su tratado de Histología y de sus trabajos llevados a cabo en Barcelona. El mundo universitario (decir científico y universitario en aquella época era decir lo mismo) comienza a conocerle, aunque costaba bastante conseguir el reconocimiento fuera de determinados círculos aun dentro de las mismas Facultades o actividades profesionales. Un ejemplo es demostrativo. Sus actividades universitarias investigadoras, su esfuerzo en crear un laboratorio de micrografía capaz para 300 alumnos, con salas de prácticas y departamentos para profesores e investigadores, sus viajes al extranjero y sus publicaciones, así como su participación en una famosa tertulia del café Suizo, le habían hecho líder de ciertos grupos que buscaban la modernización de la universidad y el impulso de la investigación, llevándole a ser nombrado miembro de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en 1897. También es propuesto para la Academia de Medicina en ese mismo año, pero como Cajal escribe en sus memorias, la “propuesta” de su nombramiento se debe al prestigioso anatómico Virchow, cuando le preguntó en Alemania a un ilustre académico de Medicina (cuyo nombre silencia el sabio) “¿en qué trabaja ahora el gran Cajal?” y éste no sabía de quien le hablaban, pero volvió resuelto a encumbrar a su desconocido (y de casi toda la Academia) competidor científico. Su discurso de ingreso en la Academia de Ciencias, “Reglas y Consejos sobre la Investigación Científica” (reeditado varias veces con el título de “Los tónicos de la voluntad”), tiene una gran repercusión en aquel momento. Cajal en él no sólo aconseja a los jóvenes atraídos por las ciencias cómo se deben dedicar a la investigación con constancia, aprendizaje y pulcra ejecución de las técnicas, sino que muestra su lucha por obtener no sólo un sosiego y unos medios adecuados para investigar para que exista una situación “en la que no se pierda ningún cerebro”. Lo que llamamos un clima para la ciencia. Por ello, aunque huye de nombramientos honoríficos, le son tan gratificantes sus reconocimientos, siempre que vayan acompañados de ayudas a sus trabajos o a los laboratorios que a partir de ahora desea montar, pues considera llegado su momento de formar discípulos. El laboratorio de su cátedra recibió una donación vitalicia del Marqués del Busto, catedrático de Obstetricia, consistente en sus gratificaciones como Director de Clínicas.

El Premio Moscú de 1900 se entiende en España como un gran reconocimiento internacional de nuestra ciencia y es seguido de la concesión de las grandes cruces de Isabel La Católica y de Alfonso X El Sabio. La Universidad y las Academias celebran este éxito con miras a una renovación interna (que nunca llegó), pero Cajal aprovecha la ocasión para que sea impulsada la creación de un Laboratorio de Investigación independiente. Éste fue creado, a instancias de Francisco Silvela, presidente del Consejo de Ministros, como Laboratorio de Investigaciones Biológicas, y se instaló provisionalmente junto al museo antropológico en la calle Ventura de la Vega. Con esta solicitud, prontamente atendida pero no llevada a la práctica nunca totalmente, Cajal parece variar en sus planteamientos investigadores; el laboratorio casero, con los mejores medios que



Neurona de Purkinje del cerebelo mostrando la riqueza de las arborizaciones de las dendritas y del axón.

puede pagarse o las ayudas personales que puede recibir, realizando en la soledad todo el proceso de sus investigaciones, desde la planificación del ensayo, la preparación de los reactivos, los cortes y las impregnaciones de los tejidos, hasta las largas horas de observación, dibujo, interpretación y redacción de los trabajos, parece cambiar a un trabajo en equipo. Esto no es totalmente cierto ya que, aunque desde ese momento contó con grupo pequeño pero escogido de colaboradores, y tuvo muchos alumnos nacionales y extranjeros que aprendieron con él la neurohistología, siguió trabajando en su casa con asiduidad casi diaria en sus investigaciones más importantes. Cerca de su jubilación, en 1922, se acuerda llevar a cabo este gran Instituto, que a propuesta de Alfonso XIII se denominará Instituto Cajal, pero no será inaugurado en su sede de la colina de San Blas, junto al Retiro de Madrid, hasta 1933. Los nombres más importantes de la escuela cajaliana son: del Río-Hortega y Achúcarro (además eminentes neuropatólogos), Tello (el colaborador más directo de Cajal, segundo Director del Instituto), Sánchez y Sánchez y su hermano Pedro (cuyas aportaciones al estudio del Sistema Nervioso de vertebrados inferiores e invertebrados son muy notorias), Estable, Gayarre, de Castro (cuyos estudios sobre la inervación del glomus carotídeus estuvieron a punto de obtener otro Nobel para nuestro país, siendo injustamente postergado ya que se le concedió al científico que hizo la comprobación fisiológica de lo descrito por él), Lorente de Nó (iniciador de la línea neurofisiológica de esta escuela), Calleja, Lavilla, Terrazas, Olóriz, Lafora (que desarrolló la neuropatología psiquiátrica), Górriz, Villaverde, Ortiz-Picón, Sanz Esponera, etc. Puede que no fueran muchos, pero sí muy importantes. Crearon una escuela internacional que no sólo difundió y amplió la neurociencia morfológica (en España y en el extranjero), sino que abrió los nuevos dominios de la neuropatología y la neurofisiología. Muchos de ellos fueron los Catedráticos de Histología y Anatomía Patológica más importantes de la primera mitad del

siglo XX, y en el Instituto Cajal se formaron la mayor proporción de catedráticos de estas asignaturas y de jefes de departamento de Anatomía Patológica de España y gran parte de Suramérica durante la segunda mitad de ese siglo. La historia del Instituto Cajal desde la finalización de la guerra española corre en paralelo con la del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, viviendo la penuria económica y organizativa que la ciencia experimental sufre durante décadas, con la desidia de los gobiernos y la sociedad, el enfrentamiento entre los estamentos universitarios, del CSIC y de los Centros sanitarios, aunque los investigadores del Instituto mantuvieran una estrecha colaboración con sus colegas de otras instituciones. Hasta la ampliación de 1978, en su sede del Retiro y desde 1952 en la calle Velázquez, destacan sus directores Sanz Ibáñez (neuropatólogo) y Carrato (el gran especialista en la Neuroanatomía Comparada), junto a algunos discípulos ya nombrados (de Castro, Lafora) y otros nuevos de segunda generación: Carda (dedicado a la oncología), Rodríguez Pérez, G. González y González Santander (que introdujeron la microscopía electrónica en la investigación del Sistema Nervioso), Valverde (experto en la corteza cerebral), Toledano Jiménez-Castellanos (que montó el primer laboratorio de química para estudios comparativos sobre la polio y el latitrismo), Martínez-Rodríguez (iniciador de la histoquímica en España), Rodrigo, B. Fernández y tantos otros. En el espíritu de apertura a la aplicación de las ciencias y a las relaciones internacionales, durante esta época se fundaron en el Instituto Cajal las Sociedades de Anatomía Patológica, Citología, Histoquímica (española e iberoamericana), Biología Celular (iberoamericana), se llevaron a cabo cursos universitarios, se tuvo muchos años una escuela de auxiliares de investigación y se organizaron cientos de congresos y seminarios. Hay que reseñar que, contra viento y marea, el Instituto Cajal ha crecido (a la muerte de Cajal y por legado suyo), mantenido y ampliado el tan repetidamente mencionado Museo Cajal. Actualmente el Instituto Cajal de Madrid, con nuevos departamentos de Biología del Desarrollo y Plasticidad Neuronal además del de Neuroanatomía y Biología Celular, y diversos Institutos de Neurociencias (Alicante, Sevilla, Madrid, Zaragoza) siguen la línea cajaliana en diversos campos, desde las ciencias morfológicas hasta la biología molecular, con equipos de investigación pequeños y no bien financiados, pero con capacidad para competir con los mejores en el ámbito internacional.

La llegada del Nobel otorga a Cajal una gran popularidad que quiere ser aprovechada por el gobierno para proponerle como Ministro de Instrucción Pública. Cajal rechaza la propuesta pero apoya y se implica en la creación de un Organismo que piensa que puede ser clave para la renovación de la Ciencia y la Universidad española: la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones científicas. El acta de constitución, fechada en 1907, de lo que luego sería el Consejo Superior de Investigaciones Científicas tras la guerra, recoge el nombramiento de Cajal como Presidente, cargo que ocupó hasta su muerte. Su actividad en la Junta le permite desarrollar muchos de sus proyectos para la creación de grandes y pequeños laboratorios de investigación fuera de los recintos universitarios como su pro-

pio Instituto, para la realización de investigación con una dedicación casi "exclusiva", formación post-graduada e investigación aplicada. Adquirieron bastante fama algunos de ellos como los laboratorios de patología, dirigido por Río-Hortega, y de fisiología, dirigido por Negrín, así como Institutos de mayor envergadura como el de Óptica y el de Física. Muchos de ellos siguen siendo modelos de nuestros actuales centros de investigación. La otra gran actuación para la reforma universitaria e investigadora fueron las ayudas para las estancias en Centros extranjeros de prestigio de profesores y estudiantes, que volverían con una moderna formación a España. Dentro de este capítulo se encuadra la creación de la Residencia de Estudiantes en Madrid, para acoger a todos aquellos estudiantes que debían trasladarse a la Universidad Central para completar estudios. En este apartado la labor de la Junta en el campo de las humanidades quizás tuvo mayor repercusión histórica al haber pasado por la Residencia, o haber recibido ayudas, diversos personajes imprescindibles de la cultura española (Dalí, Lorca, Alexandre, etc.). También es importante recordar su contribución a la creación y funcionamiento de Centros asistenciales sanitarios, como el Instituto de Higiene, obra en la que colaboró estrechamente y de la que fue director y donde pudo desarrollar "mi gran interés por la bacteriología". Su pasión por la fotografía fue inmensa, desarrollando un método de fotografía en color anterior al conocido de Lipman. Siendo un pionero de la fotografía en España y Europa, no utilizó ésta en sus trabajos porque pensaba, y con razón, que no eran las imágenes más demostrativas que sus dibujos.

VIGENCIA DE LA OBRA CAJALIANA

Cien años después de que la Academia sueca reconociera la trascendencia de los descubrimientos de Cajal, la Medicina y la Biología, en todos sus campos de investigación, clínica y docencia, siguen teniendo de referencia sus estudios y sus consejos. Su legado no sólo sigue teniendo el mismo valor científico de antaño, sino que se ha revalorizado tanto por los descubrimientos del siglo XX como por las posibilidades de desarrollo que aún tienen las ideas de Cajal en este nuevo siglo. Desgraciadamente, poco ha beneficiado la obra de Cajal a España si lo comparamos con lo que ha aportado al desarrollo de otros países. Ciertamente han existido discípulos en varias generaciones, se han formado muchos neurocientíficos en muchas ramas para beneficio de la ciencia, la universidad y la sanidad, y ha permanecido el Instituto Cajal; pero pensando en la altura y trascendencia del maestro que tuvimos, a lo largo de tantos años, han sido pocos los investigadores formados, y han recibido muy escasas ayudas para que su producción fuera lo importante que pudiera haber sido. Todos los problemas que denunciaba Cajal en la enseñanza preuniversitaria y universitaria, en la vida científica de la universidad, en las dificultades para investigar, en la falta de medios, en el aislamiento, etc., se han seguido manteniendo por años y años, hasta llegar al centenario. Esperamos en un futuro de mayor aprovechamiento de su obra y de un clima propicio para conseguir otros premios Nobel. ■

Trasplante celular y terapia regenerativa con células madre

AUTOR: FELIPE PRÓSPER
*Servicio de Hematología y Área de Terapia Celular.
Clínica Universitaria. Universidad de Navarra*

RESUMEN

Uno de los campos de la medicina que más expectativas ha levantado en los últimos años es la terapia celular con células madre. El aislamiento de células embrionarias humanas, la aparente e inesperada potencialidad de las células madre adultas y el desarrollo de la terapia génica nos llevan a imaginar un futuro esperanzador para un importante número de enfermedades actualmente incurables. A lo largo de las siguientes páginas vamos a tratar de dibujar el panorama de la investigación con células madre, describiendo los principales logros en este campo así como algunas de las preguntas pendientes de responder. A pesar de las grandes expectativas, es fundamental que mantengamos un espíritu crítico y realista a la hora de analizar los avances científicos en este área.

INTRODUCCIÓN

Las primeras evidencias científicas de que en el organismo adulto existen células madre provienen de experimentos realizados por Till y McCulloch a finales de los años 50 centrados en las células madre hematopoyéticas. Sin embargo, la capacidad de regenerar tejidos en organismos adultos, e incluso de regenerar organismos completos, como en el caso de planarias, se conoce desde mucho antes. Clínicamente, hemos explotado la potencialidad de las células madre adultas, concretamente de las células madre hematopoyéticas, desde hace más de 50 años, y podemos afirmar que gracias al trasplante de médula ósea (trasplante de células madre hematopoyéticas) miles de pacientes han podido ser curados de enfermedades incurables de otra forma. Aunque la forma más ampliamente utilizada de TC es el trasplante de progenitores hematopoyéticos, el término Terapia Celular (TC), en un sentido amplio incluye cualquier tipo de tratamiento que utiliza células como agente terapéutico.

El interés por la utilización de las células madre, sin embargo, ha crecido de forma exponencial en los últimos años a raíz de la identificación, caracterización y aislamiento de las células madre embrionarias humanas¹ y de las expectativas, de alguna forma prematuras, de que las

células madre podrían ser capaces de curar innumerables enfermedades (enfermedades neurodegenerativas, cardíacas, endocrinológicas, etc.) gracias a su enorme potencial de diferenciación. Desgraciadamente, el debate científico sobre las aplicaciones terapéuticas de las células madre, adultas o embrionarias, se ha transformado en un debate político y mediático, en detrimento del ambiente necesario que facilite el progreso científico. A lo largo de este artículo nos vamos a centrar en discutir algunos aspectos sobre las células madre adultas y sus posibles aplicaciones, actuales y futuras.

CÉLULAS MADRE EMBRIONARIAS

Las células madre embrionarias se han obtenido bien a partir de la masa celular interna del blastocisto en el estadio de embrión preimplantatorio¹ o bien de la cresta gonadal². Aunque las líneas de células embrionarias de ratón se utilizan desde hace más de 20 años³, hasta 1998 no fue posible obtener células embrionarias humanas^{1,2}. La posibilidad de obtener y utilizar terapéuticamente las células embrionarias humanas ha disparado, a nuestro juicio de forma desproporcionada, las expectativas de la terapia celular con células madre.

Las células madre embrionarias son pluripotenciales, es decir son capaces de proliferar de forma continua sin diferenciarse, siendo prácticamente inmortales, y además son capaces de diferenciarse a cualquier tejido del organismo, incluyendo tejidos somáticos (corazón, hígado, hueso, pulmón, cerebro, etc.), y células germinales (oocitos y espermatozoides) como se ha podido demostrar recientemente^{4,7}. Obviamente, la posibilidad de obtener cualquier tipo de tejido y sin limitaciones en cuanto a número de células ha abierto expectativas de tratamiento de enfermedades tradicionalmente incurables (infarto de miocardio, enfermedades neurodegenerativas, enfermedad de Parkinson, diabetes y otras muchas).

Sin embargo, las células madre embrionarias tienen, a día de hoy, importantes limitaciones que de momento han hecho que no exista ningún estudio clínico abierto en pacientes. Por una parte la misma capacidad proliferativa de estas células lleva a que en los distintos modelos animales en los que se han utilizado, se detecte de forma invariable la producción de tumores (teratomas y teratocarcinomas). Junto a este problema no despreciable, se encuentra el hecho de que el trasplante de células embrionarias se produciría entre dos sujetos inmunológicamente incompatibles,

lo cual exigiría la utilización de medicación inmunosupresora y los consiguientes efectos adversos. Aunque en este sentido, la clonación terapéutica al menos teóricamente, permitiría eludir el problema de histoincompatibilidad, desde el punto de vista económico e incluso científico no es una solución viable hoy en día.

CÉLULAS MADRE ADULTAS

Se conoce desde hace muchos años, que distintos tejidos del organismo tienen la capacidad de auto-regenerarse, gracias a la existencia de células madre residentes en dichos tejidos. Estas células madre obtenidas de tejidos adultos, poseen las dos características de auto-renovación y diferenciación que hemos mencionado anteriormente. Sin embargo, a diferencia de las células madre embrionarias, se considera que su capacidad proliferativa y su potencial de diferenciación es significativamente menor⁸. Se han identificado células madre adultas en la médula ósea, músculo esquelético, epidermis, intestino, testículo, hígado, y de forma más reciente en tejidos como el sistema nervioso central o el corazón.

Las células madre adultas se consideran multipotenciales, es decir capaces de diferenciarse a un número limitado de tejidos, principalmente en función de su origen embrionario (células de origen mesodérmico pueden diferenciarse a tejidos derivados mesodérmicos etc.). Sin embargo, cada vez parece más evidente que las células madre adultas, son capaces de generar células maduras de tejidos derivados de capas embrionarias distintas, siendo el caso más típico el de las células madre hematopoyéticas capaces de diferenciarse a hepatocitos, músculo cardíaco, endotelio o incluso a tejidos derivados de las tres capas embrionarias⁸⁻¹¹. Este fenómeno, denominado versatilidad o capacidad de transdiferenciación de las células madre adultas no está exento de controversia, ya que mientras algunos estudios lo apoyan, otros trabajos recientes cuestionan la existencia de esta capacidad de transdiferenciación de las células, justificando algunos de los hallazgos de versatilidad en función de fenómenos de fusión celular^{12,13} o incluso cuestionando abiertamente los resultados experimentales¹⁴.

TERAPIA CELULAR

CON CELULAS MADRE

A día de hoy las aplicaciones clínicas de la terapia celular se limitan a las células madre adultas por lo que de forma fundamental nos limitaremos a este tipo de células. Es posible que en el futuro las células madre embrionarias se apliquen de forma terapéutica, pero hoy en día las limitaciones que hemos mencionado anteriormente, hacen inviable su utilización. Existen ensayos clínicos con células madre embrionarias previstos en un futuro próximo y

dirigidos por una compañía de biotecnología que posee la patente de todas las líneas celulares embrionarias producidas hasta el momento.

Las aplicaciones de las células madre las podemos dividir en dos grupos principales: en primer lugar su potencial de diferenciación permitiría utilizarlas para regenerar tejidos destruidos o dañados, como es el caso de enfermedades neurodegenerativas, diabetes o patología cardíaca; en segundo lugar las células madre podrían ser empleadas como vehículo terapéutico de genes, como en el caso de enfermedades monogénicas como la hemofilia o incluso como vehículo de terapias antitumorales o antiangiogénicas. Nuevamente por cuestiones de espacio, describiremos algunas de las potenciales aplicaciones de las células madre en terapia regenerativa.

TERAPIA CELULAR

EN ENDOCRINOLOGÍA

La prevalencia de la diabetes mellitus se está incrementando hasta adquirir proporciones epidémicas en el mundo. Se estima que actualmente 100 millones de personas padecen la enfermedad, debido a la incapacidad de las células β del páncreas de secretar insulina, hormona fundamental para el control de la glucemia. En la actualidad no existe un tratamiento curativo de la diabetes sino que el pronóstico de los pacientes está supeditado al control de su glucemia mediante el tratamiento sustitutivo.

Recientemente, los resultados positivos obtenidos mediante el trasplante de islotes de páncreas en pacientes diabéticos ha incrementado el interés por utilizar células capaces de producir insulina. Mientras que el escaso número de islotes y la imposibilidad de expandir dichas células *in vitro*, impide que el trasplante de islotes de cadáver sea utilizable en un número importante de pacientes, la posibilidad de utilizar células madre con capacidad de diferenciarse en células productoras de insulina se plantearía como una estrategia mucho más atractiva¹⁵.

En modelos experimentales, se ha podido demostrar que las células madre embrionarias se pueden diferenciar a células secretoras de insulina y que cuando estas células se implantan en el bazo de ratones en los que previamente se ha inducido una diabetes mediante la inyección de estreptozotocina, son capaces de inducir una normalización de las cifras de glucosa. Uno de los principales problemas para la utilización de células embrionarias es que en el proceso de diferenciación, además de células productoras de insulina, se producen otros tipos celulares diferentes, que habría que eliminar de forma previa a su utilización¹⁶.

Aunque hasta el momento no ha sido posible caracterizar la célula madre pancreática, distintos estudios su-

gieren el potencial de células obtenidas a partir de hígado, conductos pancreáticos o islotes pancreáticos o incluso células de médula ósea para producir células secretoras de insulina^{17,18}. En cualquier caso, una de las principales limitaciones con cualquiera de los tipos celulares descritos es que el porcentaje de células secretoras de insulina que se pueden obtener es muy pequeño, lo cual limita su aplicación terapéutica. A pesar del enorme interés en esta área de investigación, no existe ningún estudio clínico publicado utilizando células madre en pacientes con diabetes tipo I aunque las expectativas sean enormes.

TERAPIA CELULAR EN

ENFERMEDADES NEUROLÓGICAS

Las células madre tienen un enorme potencial como células capaces de reconstruir las neuronas y estructuras dañadas en enfermedades como la enfermedad de Parkinson, esclerosis lateral amiotrófica, enfermedad de Alzheimer, esclerosis en placas, infartos cerebrales o las lesiones medulares por mencionar algunas. El sistema nervioso central añade una dificultad adicional a la terapia celular. Al ser un órgano con una sofisticada organización estructural, las células implantadas han de ser capaces no sólo de injertarse, sino asimismo de establecer nuevas conexiones sinápticas e integrarse con el resto del tejido circundante.

La enfermedad de Parkinson (EP) es una enfermedad neurodegenerativa que afecta a más del 2% de la población mayor de 65 años. Se caracteriza por una degeneración progresiva de las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra¹⁹ que origina la aparición de los signos y síntomas característicos de la enfermedad. A pesar del tratamiento farmacológico, la evolución de la enfermedad conlleva complicaciones motoras y psiquiátricas que disminuyen la calidad de vida de los pacientes y dificultan su manejo clínico. La utilización de células con capacidad de sintetizar y liberar dopamina y restablecer los circuitos neuronales dañados se perfilan como nuevas expectativas en el tratamiento de la EP²⁰. En la EP se han utilizado células de origen fetal en ensayos clínicos en humanos con resultados cuando menos controvertidos^{21,22}. Estudios *in vitro* e *in vivo* han demostrado que tanto las células madre embrionarias como las adultas (células madre de médula ósea, células madre neurales) son capaces de diferenciarse a neuronas dopaminérgicas. Sin embargo, no está claro hasta qué punto dichas células son capaces de restablecer los circuitos neuronales destruidos en la EP y por tanto eliminar los síntomas de la enfermedad.

Las lesiones medulares, principalmente secundarias a traumatismos, son una de las causas más frecuentes de patología neurológica en edades jóvenes. No existe un tratamiento curativo para esta enfermedad incapacitante,

por lo que la posibilidad de utilizar células madre para restablecer las conexiones axonales aparece como una estrategia especialmente atractiva. Estudios recientes sugieren que las células madre embrionarias poseen la capacidad de diferenciarse a neuronas motoras y facilitar la recuperación motora en animales con lesiones espinales^{23,24}. Sin embargo, parece que el mecanismo por el cual dichas células contribuyen a restablecer las neuronas motoras estaría relacionado con la liberación de factores de crecimiento que contribuirían al recrecimiento de los axones destruidos. Otros tipos celulares, como las células de la glía envolvente o las células mesenquimales (o estromales) de la médula ósea también han demostrado su capacidad para favorecer el recrecimiento de los axones tal como se ha demostrado en modelos animales²⁵⁻²⁷.

La esclerosis múltiple es una enfermedad neurodegenerativa caracterizada por la degeneración de las células productoras de mielina (oligodendrocitos) y que se manifiesta por una afectación tanto motora como sensitiva como consecuencia de la desmielinización de los axones. La posibilidad de favorecer la formación de mielina mediante la utilización de células madre capaces de diferenciarse a oligodendrocitos ha sido explorada en modelos animales. Un estudio reciente, ha podido demostrar en un modelo de esclerosis múltiple en ratón (más concretamente de encefalitis autoinmune experimental), que la inyección de neuroesferas (células madre neurales) tanto de forma intravenosa como intratecal promueve la remielinización multifocal. Indudablemente, estos resultados están muy lejos de justificar experimentos en pacientes, en una enfermedad, que aunque incapacitante, tiene una supervivencia prolongada²⁸.

Por la gran incidencia y el elevado coste económico y humano que generan, los accidentes cerebrovasculares son uno de los objetivos más atractivos para la terapia celular. Las evidencias recientes que indican la presencia de un proceso de neurogénesis tras producirse una isquemia cerebral han estimulado el interés por utilizar células madre para suplementar la regeneración autóloga que se produce espontáneamente^{29,30}. El beneficio de la terapia celular con células madres podría deberse al aporte exógeno de células con capacidad de neurogénesis o de angiogénesis, o debido a la modulación del microambiente, estimulando la supervivencia y diferenciación de las células residentes en el tejido dañado. El trasplante de células madre neurales en modelos de rata ha demostrado ciertos beneficios y de hecho se han realizado pequeños estudios en humanos utilizando neuronas obtenidas a partir de una línea celular de teratocarcinoma³¹⁻³³. Estudios realizados en animales sugieren que las células de médula ósea son reclutadas a las zonas de infarto cerebral y que contribuyen a la mejoría funcional cuando son inyectadas focalmente e incluso intravenosamente. La inyección de células se asocia con la formación de nuevos vasos, liberación de factores tróficos así como con la ex-

presión de marcadores neurales por parte de las células implantadas.

No son éstas las únicas enfermedades neurológicas susceptibles de beneficiarse de la terapia celular con células madre pero sí las más frecuentes o las que representan un paradigma, como es el caso de la enfermedad de Parkinson.

TERAPIA CELULAR EN

ENFERMEDADES CARDIOVASCULARES

La cardiopatía isquémica es una de las causas más importantes de mortalidad y morbilidad en el mundo occidental y un problema de salud pública. Dentro de ésta, el infarto de miocardio tiene una especial trascendencia ya que el músculo cardíaco posee una limitada capacidad de regenerarse, por lo que la necrosis de una región lleva a la formación de una cicatriz fibrosa. Dependiendo del área a la que afecte esta cicatriz, y debido a los mecanismos que condicionan el remodelado ventricular, el infarto puede llevar a una disminución progresiva e irreversible de la función cardíaca que conduce al síndrome de la insuficiencia cardíaca (IC). La prevalencia de la IC en la población general en EEUU o el Reino Unido es del orden del 1% y si nos fijamos en los mayores de 75 años oscila entre el 5 y 10%³⁴. En los últimos años se han desarrollado nuevos tratamientos para la fase aguda del infarto de miocardio (fibrinólisis, angioplastia primaria) que han tenido un gran impacto en el pronóstico de estos pacientes pero, que desgraciadamente no han conseguido detener la evolución de la enfermedad que prosigue hasta el desarrollo de la IC terminal. Para su tratamiento el único recurso real del que disponemos en la práctica clínica es el trasplante cardíaco, cuyas limitaciones más importantes son la desproporción entre el número de donantes y receptores potenciales, así como la necesidad de tratamiento inmunosupresor de por vida.

La posibilidad de utilizar células madre para regenerar el músculo cardíaco destruido ha abierto enormes esperanzas para un número muy importante de pacientes. Es probablemente en este campo, donde la experiencia clínica es mayor, habiéndose publicado en la actualidad más de 20 ensayos clínicos de terapia celular en pacientes con infarto de miocardio. Por limitaciones de espacio nos limitaremos a detallar los tipos de células empleadas y algunos aspectos concretos de los resultados obtenidos (se han publicado excelentes revisiones recientes en este sentido)³⁵⁻³⁹.

Diversos estudios, inicialmente en modelos experimentales y posteriormente en humanos han utilizado las células madre del músculo para regenerar el músculo cardíaco en pacientes con infarto de miocardio (mioblastos esqueléticos)⁴⁰. La plasticidad de las células de músculo esquelético junto con su capacidad de responder a es-

tímulos eléctricos sugieren la posibilidad de que células musculares individuales (mioblastos) puedan ser convertidos en fibras musculares capaces de producir trabajo cardíaco (cardiomioplastia celular)⁴¹. Los estudios iniciales con mioblastos obtenidos de músculo esquelético han permitido determinar que dichas células son capaces de injertar en el corazón de animales de experimentación y contribuir a mejorar la función contractil del corazón⁴² constituyendo la base de la aplicación de esta técnica en pacientes con infarto de miocardio.

El grupo de Menasche ha sido pionero en la utilización de mioblastos esqueléticos, realizando el primer implante de mioblastos autólogos en un paciente con un IM en junio del 2000⁴³. La estrategia diseñada por este grupo y posteriormente utilizada por otros grupos, consiste en la obtención de una biopsia muscular del propio paciente entre las 2-3 semanas previas a la cirugía de revascularización en pacientes con IM antiguo. Durante la cirugía se procede al implante por inyección intramiocárdica de las células cultivadas *in vitro* en la región peri-infarto. Los estudios realizados por el grupo de Menasche y por nuestro grupo han permitido demostrar la seguridad del procedimiento y su eficacia^{44,45}. Otros grupos, de forma muy reciente han utilizado una vía de administración percutánea, evitando por tanto la necesidad de la cirugía⁴⁶. Tanto los estudios en modelos experimentales como los estudios clínicos indican la capacidad de los mioblastos para implantarse y diferenciarse a células musculares esqueléticas, Sin embargo no se ha podido demostrar que las células originadas a partir de los mioblastos sean capaces de transmitir las señales electromecánicas derivadas de las células musculares cardíacas o de transdiferenciarse a células musculares cardíacas.

Estudios recientes apoyan la existencia de diferentes poblaciones celulares en la médula ósea (MO) con capacidad de diferenciarse a fibras musculares cardíacas, así como a células endoteliales, contribuyendo a la angiogénesis o vasculogénesis⁴⁷⁻⁵². En la mayoría de estos estudios los investigadores han utilizado poblaciones celulares heterogéneas, lo que limita de forma importante las conclusiones, ya que no es posible determinar cuáles son exactamente las células responsables del beneficio terapéutico. Frente a estudios en los que se han utilizado células mononucleadas de MO⁴⁷, el grupo de Anversa y Orlic han utilizado poblaciones seleccionadas de células madre hematopoyéticas de MO (Lin-Kit+) demostrando la capacidad de dichas células de injertarse, diferenciarse a células musculares cardíacas y endoteliales, y contribuir a la mejoría de la función cardíaca.

Además de las células madre hematopoyéticas, en la médula ósea existen progenitores y células madre angioblásticas, identificables por la presencia de una serie de marcadores y antígenos celulares como CD34, AC133 o el receptor de VEGF tipo 2, expresados a su vez en células madre hematopoyéticas⁵²⁻⁵⁶. Estudios realizados en modelos

animales de isquemia periférica e IM indican que en la MO existen células madre endoteliales con capacidad de contribuir a la neo-angiogénesis, favoreciendo la regeneración miocárdica^{48,52,57,58}. Estas células madre endoteliales pueden ser movilizadas a sangre periférica y contribuir también a la angiogénesis en extremidades isquémicas⁵⁸.

Las células madre mesenquimales (MSC) son capaces de diferenciarse a tejidos mesodérmicos como osteoblastos, condrocitos, adipocitos o músculo esquelético⁵⁹ pero a su vez, estudios recientes indican que las MSC son capaces de diferenciarse tanto *in vitro* como *in vivo* a cardiomiocitos^{47,60}. *In vitro*, el cultivo de MSC en presencia del agente desmetilante 5-azacitidina induce diferenciación hacia células con características fenotípicas y electrofisiológicas de músculo cardíaco⁶¹. Utilizando modelos animales de IM, varios grupos han demostrado que las células madre mesenquimales inyectadas en la cicatriz miocárdica no sólo son capaces de injertarse, sino que adquieren características de cardiomiocitos y, lo que es más importante, contribuyen a mejorar la función cardíaca^{47,62}.

A pesar del número de incógnitas existentes, la acumulación de resultados derivados de los estudios preclínicos en los últimos cinco años ha impulsado el desarrollo de los primeros ensayos clínicos de factibilidad y seguridad de regeneración cardíaca con células madre. Tales ensayos hasta el momento no han estado desprovistos de cierto grado de controversia, derivado de la opinión de distintos investigadores cuyo argumento es la falta de suficientes evidencias que apoyen el inicio de la investigación clínica. No vamos a detenernos en argumentar las distintas posturas, sino en poner en perspectiva los esfuerzos clínicos realizados. Hasta el momento se han publicado al menos 20 estudios clínicos en los que se han utilizado las vías percutánea, intracavitaria o intramiocárdica, se han implantado células mononucleadas de médula ósea, células enriquecidas en progenitores hematopoyéticos o endoteliales o mioblastos, y los resultados se han monitorizado mediante técnicas de imagen y función como resonancia, ecocardiografía o tomografía con positrones. Algunos estudios han utilizado pacientes controles con los que comparar los resultados entre los pacientes que han recibido células y los que no, pero en cualquier caso todos los pacientes han recibido además de las células tratamientos adicionales. La acumulación de estos resultados, apoyan la continuidad de los estudios en marcha y el desarrollo de nuevos ensayos clínicos.

TERAPIA CELULAR EN OFTALMOLOGÍA

La visión junto con los otros sentidos provee la relación con el mundo exterior, y es de gran valor para la supervivencia de muchas especies animales y tiene un gran valor para los hombres. A pesar de su importancia sólo en algunas especies de anfibios se conserva una capacidad de regeneración importante de los tejidos del ojo. Es por tanto, de

gran valor conocer en profundidad los distintos tipos de células madre del ojo y sus mecanismos de renovación y regeneración, para intentar terapias capaces de recuperar los distintos tejidos oculares que se pueden dañar. Las estructuras que tienen más interés desde el punto de vista de la medicina regenerativa son el epitelio corneal, el epitelio conjuntival y la retina.

La fuente de células del epitelio corneal son las células madre que se encuentran en la región del limbo corneal. Estas células, que se encuentran en la zona de transición entre la córnea y la esclera, tienen todas las características de las células madre, ya que poseen una gran capacidad de renovación, que se mantiene a lo largo de la vida y son capaces de originar células hijas que pueden sufrir un proceso de diferenciación terminal a células especializadas⁶³. Sin embargo, no se ha podido demostrar que estas células sean pluripotentes y parece que sólo dan lugar a células del epitelio corneal y conjuntival. Actualmente no existe un marcador biológico definitivo de las células madre del limbo corneal, aunque se ha propuesto varios, como la alfa-eno-lasa, y más recientemente, el factor de transcripción p63 aunque ciertamente estos antígenos pueden aparecer en otras células⁶⁴.

En condiciones fisiológicas, las células madre del limbo corneal son capaces de suplir la necesidad de renovación de la córnea. Sin embargo, en algunas situaciones patológicas, como traumatismos, quemaduras, sustancias químicas, síndrome de Stevens Johnson o penfigoide ocular, la capacidad de regeneración de las células limbocorneales se ve desbordada (o se produce una disminución o ausencia de éstas) y se origina un daño corneal permanente⁶⁵. Aunque el trasplante de córnea es una opción, no es eficaz en los casos donde es necesario restaurar el epitelio corneal. Kenyon y Tseng en 1989 fueron los primeros en llevar a cabo un autotrasplante de limbo conjuntival⁶⁶. Posteriormente, tras el conocimiento de las células madre corneales, Kinoshita modificó la técnica para transplantar células madre del limbo corneal en conejos.

Actualmente el trasplante de limbo corneal es una práctica reconocida, usándose células del ojo contralateral cuando el daño es en un solo ojo, y células de un donante cuando el daño es bilateral. Se pueden usar células histocompatibles de un donante vivo, o células no compatibles de donantes cadáver. La posibilidad de expandir *ex vivo* estas células puede reducir el riesgo de deficiencia de células del limbo del ojo sano o del donante⁶⁷. La combinación de células del limbo con membrana amniótica, se usa con éxito para promover una rápida reepitelización de la córnea. En España al menos dos grupos de investigación (Vall d'Hebron y Clínica Universitaria) han implantado células madre limbocorneales con éxito en pacientes con insuficiencia limbocorneal completa resultando en la re-epitelización de la cornea con mejoría de la agudeza visual de los pacientes.

La retina neural y el epitelio pigmentario de la retina se desarrollan durante el periodo postnatal temprano, y no hay evidencia de regeneración en la edad adulta. Ha sido ampliamente documentada la presencia de células madre en la retina de peces y anfibios. Sin embargo hasta el año 2000 no se habían identificado células progenitoras de la retina en mamíferos. Estas células se encuentran en muy baja frecuencia en la zona ciliar marginal y tienen muchas propiedades asociadas con las células madre: son capaces de proliferar y expresan el marcador neuroectodérmico *nestina*, son multipotentes y pueden autorrenovarse. La identificación de células progenitoras de la retina abre la posibilidad de su uso para tratamiento en degeneraciones retinianas como la retinitis pigmentosa, el glaucoma y la degeneración macular. El éxito del uso de células madre retinianas para la regeneración de la retina depende de la posibilidad de restaurar los complejos circuitos establecidos en la retina, ya que aunque el entendimiento actual de las conexiones dentro de la retina es muy importante, se conoce menos como se controla el proceso que lleva a estas conexiones entre las células.

Además se están llevando a cabo estudios experimentales con otros tipos de células madre, como células madre neurales, células madre embrionarias, células madre derivadas de la médula ósea, etc., que tratan de confirmar el potencial del trasplante de células madre en este contexto, y contribuyen al conocimiento de los mecanismos de diferenciación y de integración de las células transplantadas en la retina, que conduzca a un adecuado procesamiento visual.

TERAPIA CELULAR EN DERMATOLOGÍA

La epidermis es un epitelio estratificado compuesto por queratinocitos, una célula especializada que es, entre otras cosas, responsable de la renovación epidérmica. Debido a su situación como capa más externa del cuerpo, la epidermis está sometida a constantes agresiones y por tanto está en un proceso de renovación continuo. Este proceso de renovación es posible por la existencia de células madre epidérmicas distribuidas en la capa basal y sobre todo en los folículos pilosos. Como ocurre en otros tejidos, y a pesar del intenso trabajo realizado, tampoco se conoce un marcador definitivo de las células madre epidérmicas, aunque estas células expresan niveles altos de integrinas b1 y a6 y niveles bajos de CD71, pero estas características no son exclusivas de las células madre epidérmicas. Otros marcadores propuestos, como la keratina 15, AC133-2 (una isoforma de CD133) y el factor de transcripción p63 no parecen ser exclusivos de estas células.

Algo que sí está claro es la capacidad de cultivar células madre epidérmicas que forman colonias, las cuales pueden ser cultivadas en serie en condiciones apropiadas, y alcanzar una enorme expansión de su población hasta generar un epitelio. Esto ha permitido desde hace años generar

cantidades suficientes de epitelio cultivado para trasplantar a pacientes con grandes quemaduras.

TERAPIA CELULAR EN

ENFERMEDADES MUSCULARES

El músculo ha sido reconocido recientemente como otra importante fuente de células madre adultas. Las células progenitoras musculares más importantes son las células satélites, que no sólo contribuyen a la regeneración de miofibras, sino que se han demostrado capaces de diferenciarse en otras líneas celulares como osteoblastos, condrocitos y adipocitos. Si embargo, además de las células satélite, existen otras poblaciones de células madre en el músculo con un mayor potencial de diferenciación. El origen de estas células, bien existentes en el músculo⁶⁸ o procedentes de otros órganos como la médula ósea⁶⁹ se desconoce con precisión, pero en cualquier caso estas células serían las progenitoras de las propias células satélites.

La mayoría de las lesiones musculares son reparadas espontáneamente, sin que quede deterioro funcional, pero en algunas circunstancias, debido a la importancia de la herida, ésta no cura completamente y se forma tejido cicatricial que impide la recuperación funcional completa. En estos casos la curación de la lesión podría ser mejorada aumentando la regeneración de fibras musculares e inhibiendo la fibrosis. El trasplante de células progenitoras musculares podría curar esas importantes lesiones. Muchos de los esfuerzos de los investigadores que trabajan en patología muscular, se centran en determinar la forma de corregir miopatías congénitas tales como la distrofia muscular de Duchenne, enfermedad caracterizada por la ausencia de expresión de distrofina, una proteína de membrana imprescindible para mantener la integridad estructural de las miofibras. A lo largo de la vida del enfermo se produce una destrucción crónica del tejido muscular y aunque inicialmente, las células satélites son capaces de regenerar el músculo, progresivamente van agotando su capacidad de proliferar. El objetivo del tratamiento sería conseguir células musculares con genoma normal capaces de formar miofibras que se injerten y regeneren el músculo atrofiado.

Se han utilizado modelos experimentales de enfermedad de Duchenne, más concretamente en ratones *mdx1* (ratones transgénicos deficientes en distrofina) para determinar la capacidad de distintos tipos de células madre de contribuir a regenerar el músculo esquelético. De forma análoga a la regeneración cardíaca, los primeros estudios en modelos de distrofia muscular se realizaron con mioblastos esqueléticos, es decir células progenitoras musculares. Aunque los resultados iniciales en los años 90 no fueron positivos, permitieron determinar una serie de aspectos como la importancia de la inmunosupresión y la forma de administración de células que posteriormente han sido de gran utilidad a la hora de dise-

ñar estudios nuevos⁷⁰. De forma más reciente, distintos grupos han utilizado otras fuentes de células madre con la esperanza de poder utilizar una vía sistémica de administración^{71,72}. En estos estudios se ha podido demostrar que utilizando células obtenidas de médula ósea de ratones, un pequeño número de células contribuyen a formar fibras musculares con expresión de distrofina. A pesar de intentos posteriores, el grado de contribución de las células de médula ósea que se ha observado en los distintos estudios hasta el día de hoy es muy escaso (menor del 1%). Una de las principales limitaciones para el éxito de la terapia celular en pacientes con distrofias musculares es la escasa supervivencia de las células una vez implantadas a pesar de que el implante se realice directamente en el músculo⁷³, así como el hecho de que el tratamiento se tendría que realizar entre un donante y un receptor no idénticos y por tanto supeditado a problemas de rechazo inmunológico.

TERAPIA CELULAR EN TRAUMATOLOGÍA

El organismo tiene una importante capacidad de reconstruir los huesos, cartílagos y tendones dañados, gracias a la capacidad regenerativa de las células progenitoras presentes en las estructuras lesionadas. Por ahora estamos lejos de conocer el origen y características fenotípicas de estas células progenitoras y los factores que gobiernan la formación y remodelación de los huesos. A pesar de este desconocimiento, ha sido posible la utilización de células maduras como forma de contribuir a la regeneración de tejidos óseos y cartilagosos, y concretamente la utilización de células de cartílago cultivadas es un ejemplo de cómo el autotrasplante de células maduras puede ser un tratamiento eficaz para la reparación de la superficie articular⁷⁴.

Más atractiva resulta la posibilidad de utilizar células madre con capacidad de diferenciarse hacia tejidos de estirpe mesenquimal como el hueso o el cartílago. Las células madre mesenquimales (MSC) se pueden obtener a partir de médula ósea pero también de grasa e incluso otros tejidos. Son capaces, *in vitro*, de autorrenovarse y proliferar extensamente, sin perder su capacidad de diferenciarse hacia osteoblasto, condrocitos, adipocitos o incluso músculo esquelético según las condiciones en las que se cultivan. Estas cualidades han permitido su utilización para la reparación de lesiones óseas extensas normalmente utilizando algún tipo de soporte en la colocación de las células. Igualmente también se han utilizado para tratar defectos cartilagosos y lesiones traumáticas pudiendo substituir a los injertos de condrocitos, con la ventaja de su mayor capacidad proliferativa y de supervivencia, al no tratarse de células maduras sino de progenitoras.

También se han utilizado células mesenquimales en el tratamiento de niños con osteogénesis imperfecta⁷⁵. En este estudio, los niños recibieron tratamiento mediante trasplante alogénico, pudiendo demostrarse a los meses del

trasplante un mejoría muy significativa en la calidad y cantidad de tejido óseo formado y demostrando la capacidad de las células mesenquimales injertadas de generar osteoblastos y sintetizar nueva matriz ósea.

TERAPIA CELULAR EN

ENFERMEDADES HEPÁTICAS

Un número importante de enfermos hepáticos pueden curarse gracias al trasplante hepático que restituye un órgano enfermo por un órgano sano. De igual forma que en otros tipos de trasplantes de órganos, las dificultades técnicas junto con la escasez de órganos hacen que el número de pacientes que se benefician de esta terapéutica sea mucho menor que el número de potenciales candidatos. La posibilidad de utilizar células madre de distintos orígenes o incluso hepatocitos maduros modificados genéticamente aparece como una alternativa de gran interés. Vaya por delante que no existen en la actualidad estudios clínicos de regeneración hepática con células madre y tan sólo se han realizado algunos estudios clínicos utilizando el trasplante de hepatocitos con escaso éxito. Sin embargo existen estudios experimentales, que sugieren la posibilidad de regenerar tejido hepático a partir de células madre.

Las células madre embrionarias tienen una indudable capacidad de diferenciarse en hepatocitos maduros *in vitro*, sin embargo existen muy escasos estudios *in vivo*, que hayan podido demostrar la eficacia de las células embrionarias en la regeneración hepática, existiendo además el problema de la generación de tumores a partir de dichas células embrionarias⁷⁶.

La posibilidad de regenerar tejido hepático con células madre hematopoyéticas se describió por primera vez por el grupo de Petersen⁷⁷ en el que observaron la contribución de células de médula ósea a la regeneración del hígado a través de la diferenciación hacia células ovales. Utilizando un modelo de ratón transgénico análogo a la tirosinemia humana tipo I, Lagasse demostró la capacidad de las células madre hematopoyéticas de rescatar animales con dicha enfermedad con la consiguiente implicación clínica⁷⁸. Aunque como ya hemos comentado no existen estudios clínicos, sí que existen observaciones en pacientes sometidos a trasplante de médula ósea en los que se ha podido demostrar que células derivadas del donante son capaces de adquirir características de células hepáticas, apoyando en humanos las observaciones del Lagasse y Petersen. La principal limitación de estos estudios, es que datos posteriores obtenidos por diversos grupos de investigación sugieren que la mayor parte de los fenómenos de regeneración hepática observados a partir de células madre hematopoyéticas se deben realmente a la capacidad de fusión de las células trasplantadas con los hepatocitos existentes en el animal, y por tanto no a una auténtica transdiferenciación⁷⁹. Aunque el mecanismo que contribuye a la regeneración de

los hepatocitos es de indudable interés desde el punto de vista biológico, el hecho de que se trate de fusión celular o de auténtica transdiferenciación no disminuye su interés desde el punto de vista clínico. Es decir, incluso en el caso de que las observaciones experimentales de regeneración hepática se debieran mayoritariamente a fusión celular, sería posible que resultaran clínicamente beneficiosas en pacientes.

La existencia de un compartimento hepático de células madre ya se sugirió hace más de 40 años⁸⁰. Las células ovales fueron las primeras candidatas a células madre hepáticas. Localizadas en los canales de Hering, son células madre multipotenciales capaces de diferenciarse a hepatocitos así como a epitelio ductal y que poseen algunos antígenos comunes con células de médula ósea. Sin duda esta población celular tiene cierta capacidad de regeneración hepática, pero a día de hoy permanece sin definir, si realmente su origen está en el hígado o por el contrario derivan de células de la médula ósea.

Estudios recientemente publicados sugieren que una población de células madre bien caracterizada como las células madre mesenquimales pueden contribuir a la regeneración hepática. Como hemos mencionado anteriormente la principal fuente de células madre mesenquimales es la médula ósea, si bien es posible derivar dichas células a partir de otros tejidos como la grasa. Son células no hematopoyéticas de origen mesodérmico en las que al menos *in vitro* se ha podido demostrar su capacidad de diferenciarse a hepatocitos maduros y funcionales⁸¹. El potencial *in vivo* de esta población de células madre no está definido en la actualidad.

TERAPIA CELULAR EN

ENFERMEDADES RENALES

Un objetivo primordial de la terapia regenerativa es la reposición, reparación o mejora de la función biológica de tejidos u órganos dañados. En el caso del riñón esto puede suponer una tarea extraordinaria. Por un lado el riñón posee una estructura muy compleja, en la que se pueden detectar hasta 26 tipos de células terminalmente diferenciadas, que a su vez derivan de 4 tipos celulares surgidos en el mesodermo intermedio durante el desarrollo embrionario. Además, a diferencia de otros órganos en los que se ha demostrado la existencia de células con características de pluripotencialidad y capacidad regenerativa, en el riñón adulto no se ha podido demostrar de forma concluyente la existencia de células madre. Maeshima y cols. han demostrado recientemente la existencia en el riñón, de unas células denominadas LRC (label-retaining cells) por su capacidad para permanecer marcadas por la bromodeoxiuridina durante periodos prolongados de tiempo⁸². Las células que proliferan durante el proceso de regeneración tubular parecen ser derivadas de esta población LRC. Si es-

tas células constituyen auténticas células madre renales y participan en el proceso de recuperación que sigue al daño isquémico del riñón, el descubrimiento de agentes capaces de estimular su diferenciación podría constituir un avance en el tratamiento de las enfermedades renales.

Otra vía de actuación posible sería la utilización de células madre pluripotenciales que tuvieran la capacidad de diferenciarse a células renales maduras. Las células madre de origen embrionario trasplantadas en ratones inmunodeficientes son capaces de desarrollar teratomas que contienen estructuras de todas las capas embrionarias, incluyendo glomérulos y túbulo renales. Ya que todo el riñón excepto su aporte neural es de origen mesodérmico se puede pensar que se origina a partir de una célula riñón específica derivada de una célula madre embrionaria. Si tal célula existe, estaría localizada en algún lugar del mesodermo intermedio en una fase de la embriogénesis. Aunque tal célula madre renal exista y pueda ser identificada, conseguir que se divida y sea capaz de originar los precursores capaces de organizarse en un riñón adulto, es evidentemente mucho más complejo que derivar de una línea de células madre embrionarias un tipo celular cualquiera.

CONCLUSIONES

A lo largo de las páginas anteriores hemos tratado de presentar una perspectiva general, quizá un poco superficial, de lo que la terapia celular y las células madre podrían representar en el futuro. No tenemos ninguna duda de que las posibilidades son enormes, pero sin embargo es muy importante que seamos conscientes de que estamos todavía muy lejos de alcanzar el objetivo de utilizar clínicamente esta nueva herramienta. Este es el mensaje más importante que queremos transmitir: a pesar de las enormes expectativas que existen para pacientes con enfermedades incurables es imprescindible eludir el optimismo exagerado y continuar desarrollando una investigación de calidad científica que nos permita alcanzar nuestros objetivos.

No sabemos si la terapia celular llegará a curar la diabetes o la enfermedad de Parkinson, pero si lo hace seguro que no será en los próximos 5 años, ni con células madre adultas ni con células madre embrionarias. Los obstáculos existentes son enormes, y es responsabilidad de los médicos e investigadores no manipular no transmitir esperanzas erróneas e infundadas a los pacientes, que a la larga se volverán contra nosotros. ■

REFERENCIAS

1. Thomson JA, et al. Science. 1998;282:1145-7.
2. Shambloott MJ et al. Proc Natl Acad Sci USA. 1998;95:13726-31.
3. Evans MJ et al. Nature. 1981;292:154-6.
4. Geijsen N et al. Nature. 2004;427:148-54.

5. Hubner K et al. *Science*. 2003;300:1251-6.
6. Toyooka Y et al. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2003;100:11457-62.
7. Shamblott MJ et al. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2001;98:113-8.
8. Raff M et al. *Annu Rev Cell Dev Biol*. 2003;19:1-22.
9. Krause DS et al. *Cell*. 2001;105:369-77.
10. Grant MB et al. *Nat Med*. 2002;8:607-12.
11. Jiang Y et al. *Nature*. 2002;418:41-9.
12. Terada N et al. *Nature*. 2002;416:542-5.
13. Alvarez-Dolado et al. *Nature*. 2003;425:968-73.
14. Wagers AJ et al. *Science*. 2002;297:2256-9.
15. Efrat S. *Trends Mol Med*. 2002;8:334-39.
16. Soria B et al. *Diabetes*. 2000;49:157-62.
17. Lechner A et al. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2003;284:E259-66.
18. Hess D et al. *Nat Biotechnol*. 2003;21:763-70.
19. Hirsch E et al. *Nature*. 1988;334:345-8.
20. Arenas E. *Brain Res Bull*. 2002;57:795-808.
21. Fischbach GD et al. *N Engl J Med*. 2001;344:763-5.
22. Dunnett SB et al. *Nat Rev Neurosci*. 2001;2:365-9.
23. Kerr DA et al. *J Neurosci*. 2003;23:5131-40.
24. Wichterle H et al. *Cell*. 2002;110:385-97.
25. Ramon-Cueto A et al. *Neuron*. 2000;25:425-35.
26. Hofstetter CP et al. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2002;99:2199-204.
27. Zurita M et al. *Neuroreport*. 2004;15:1105-8.
28. Pluchino S et al. *Nature*. 2003;422:688-94.
29. Arvidsson A et al. *Nat Med*. 2002;8:963-70.
30. Nakatomi H et al. *Cell*. 2002;110:429-41.
31. Sinden JD et al. *Neuroscience*. 1997;81:599-608.
32. Nelson PT et al. *Am J Pathol*. 2002;160:1201-6.
33. Kondziolka D et al. *Neurology*. 2000;55:565-9.
34. Cowie MR et al. *Eur Heart J*. 1997;18:208-25.
35. Prosper F et al. *Rev Esp Cardiol*. 2003;56:935-9.
36. Reffelmann T et al. *Cardiovasc Res*. 2003;58:358-68.
37. Strauer BE et al. *Circulation*. 2003;107:929-34.
38. Nadal-Ginard B, Kajstura J, Leri A, Anversa P. Myocyte death, growth, and regeneration in cardiac hypertrophy and failure. *Circ Res*. 2003;92:139-50.
39. Murry CE et al. *Circulation*. 2005;112:3174-83.
40. Taylor DA et al. *Nat Med*. 1998;4:929-33.
41. Reinecke H et al. *J Cell Biol*. 2000;149:731-40.
42. Chachques JC et al. *Ann Thorac Surg*. 2004;77:1121-30.
43. Menasche P et al. *Lancet*. 2001;357:279-80.
44. Menasche P et al. *J Am Coll Cardiol*. 2003;41:1078-83.
45. Herreros J et al. *Eur Heart J*. 2003;24:2012-20.
46. Smits PC et al. *J Am Coll Cardiol*. 2003;42:2063-9.
47. Tomita S et al. *Circulation*. 1999;100:II247-56.
48. Kamihata H et al. *Circulation*. 2001;104:1046-52.
49. Assmus B et al. *Circulation*. 2002;106:3009-17.
50. Kawamoto A et al. *Circulation*. 2003;107:461-8.
51. Orlic D et al. *Nature*. 2001;410:701-5.
52. Kocher AA et al. *Nat Med*. 2001;7:430-6.
53. Asahara T et al. *Science*. 1997;275:964-7.
54. Asahara T et al. *Circ Res*. 1999;85:221-8.
55. Peichev M et al. *Blood*. 2000;95:952-8.
56. Shi Q et al. *Blood*. 1998;92:362-7.
57. Kawamoto A et al. *Circulation*. 2001;103:634-7.
58. Takahashi T et al. *Nat Med*. 1999;5:434-8.
59. Pittenger MF et al. *Science*. 1999;284:143-7.
60. Toma C et al. *Circulation*. 2002;105:93-8.
61. Makino S et al. *J Clin Invest*. 1999;103:697-705.
62. Shake JG et al. *Ann Thorac Surg*. 2002;73:1919-25; discussion 26.
63. Espana EM et al. *Ophthalmology*. 2002;109:2004-10.
64. Pellegrini G et al. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2001;98:3156-61.
65. Tseng SC. *Indian J Ophthalmol*. 2000;48:79-81.
66. Tseng SC et al. *Arch Ophthalmol*. 1998;116:431-41.
67. Tseng SC et al. *Adv Exp Med Biol*. 2002;506:1323-34.
68. Qu-Petersen Z et al. *J Cell Biol*. 2002;157:851-64.
69. LaBarge MA et al. *Cell*. 2002;111:589-601.
70. Skuk D et al. *J Muscle Res Cell Motil*. 2003;24:285-300.
71. Gussoni E et al. *Nature*. 1999;401:390-4.
72. Ferrari G et al. *Science*. 1998;279:1528-30.
73. Beauchamp JR et al. *J Cell Biol*. 1999;144:1113-22.
74. Brittberg M et al. *N Engl J Med*. 1994;331:889-95.
75. Horwitz EM et al. *Nat Med*. 1999;5:309-13.
76. Yamamoto H et al. *Hepatology*. 2003;37:983-93.
77. Petersen BE et al. *Science*. 1999;284:1168-70.
78. Lagasse E et al. *Nat Med*. 2000;6:1229-34.
79. Wang X et al. *Nature*. 2003.
80. Grisham JW et al. *Lab Invest*. 1961;10:317-32.
81. Schwartz RE et al. *J Clin Invest*. 2002;109:1291-302.
82. Maeshima A et al. *J Am Soc Nephrol*. 2003;14:3138-46.

PLACAS DE HONOR 2006

Acto de entrega de las placas de honor de la Asociación. 17. XI. 2006. Presentado por Jesús Martín Tejedor

Es este el octavo año en que esta Asociación distingue con sus placas de honor a unos científicos eminentes y a unas entidades empresariales cuya ejecutoria como promotoras o realizadoras de I+D+I conviene resaltar para que la conciencia colectiva de los españoles se ilumine con nuevas luces de esperanza.

En los años anteriores hemos venido celebrando este acto en las suntuosas dependencias del Palacio de Linares o Casa de América, y este es el primer año que nos acogemos a la hospitalidad de la Residencia de Estudiantes que conserva todavía la austeridad, no exenta de buen gusto, con que la Institución Libre de Enseñanza construyó y alhajó sus edificios. Considero obligado en este día recordar el acogimiento que nos ha dispensado la Casa de América durante estos años, y agradecer a Carmen Díaz Marés, aquí presente, la solicitud con que se ha preocupado de que el Palacio de Linares nos franqueara sus puertas y además con singular distinción, como era la de abrir la puerta principal que da a Cibeles y sólo se abre en muy contadas y solemnes ocasiones.

El cambio de escenario tan conspicuo hacia este paraje más recoleto en la antigua Colina de los Chopos se nos antoja como la llegada a la tierra prometida. Difícilmente podría estar nuestra Asociación de científicos en marco más adecuado que éste, en pleno campus del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, al que muchos de nosotros pertenecemos, y en este santuario de la Residencia, de la Residencia por antonomasia, verdadero santuario científico e intelectual de la segunda Ilustración española, la que va desde el último cuarto del siglo XIX hasta el final de la Segunda República. No

quiero, pues, proseguir sin agradecer vivamente a la dirección de la Residencia este acogimiento que esperamos habrá de ser el comienzo de una larga amistad.

Las placas de honor de este año, quizá de manera un tanto inusual en nosotros, tienen una cierta especialización temática: hemos querido fijarnos en la investigación científico-tecnológica del mundo de la construcción. Un mundo de claro-oscuro. Porque se refiere al renglón más descollante de la economía española, en la actualidad y en un futuro de duración difícil de precisar. Es el aspecto claro y brillante. Pero también un mundo oscuro, porque es el que más tinta consume en la Prensa de nuestros días donde apenas hay noticiario que no divulgue alguna especulación delictiva en torno al tema de la construcción. Hasta el lenguaje resulta implicado: hoy en día la palabra ladrillo significa dinero próspero y seguro. ¿No les parece interesante y dignificante que esta noche hablemos de los ladrillos y de la construcción como un importante tema de investigación científico-tecnológica necesaria para que los edificios no se caigan como un castillo de naipes? ¿No es importante saber que en todo este mundo hay nombres verdaderamente ilustres y distintos de los grandes millonarios con yate que llenan la Prensa del corazón?

Federico de Isidro Gordejuela

Cuando habéis llegado a esta Residencia, o mejor, a la Residencia, –algunos quizá por primera vez– habréis experimentado no sé si tanto como un placer estético, pero sí al menos esa placentera impresión de pulcritud arquitectónica, de sencillez inteligente, de discreta elegancia, clase y buen estilo característico de algunos campus anglosajones y norteamericanos. Tantas felices impresiones las producen dos únicos elementos: la geometría y los ladrillos.



Jesús Martín Tejedor.



Federico de Isidro Gordejuela y su mujer.

Es curiosa la pervivencia del ladrillo como solución constructiva. Empieza a fines del neolítico. En Mesopotamia, Caldea y Asiria se usa el ladrillo como revestimiento de los muros para proteger de la intemperie. En Ur se hacen tumbas y templos con bóveda de ladrillo. Los omeyas de Siria usan el ladrillo para sus construcciones militares y religiosas, y la expansión del Islam trae a Europa, especialmente a España, las técnicas constructivas con ladrillo de la antigua Mesopotamia, enriquecidas con elementos bizantinos y armenios. Y aquí se produce en Castilla, en Aragón y en Andalucía el románico de ladrillo y la arquitectura mudéjar, renglón importantísimo de la cultura y el arte español, seguido por el renacimiento y el barroco de ladrillo, y casi en nuestros días por la arquitectura historicista y modernista de los dos últimos siglos.

Pues bien, este material que genéricamente llamamos ladrillo, comprende, que yo sepa, hasta 27 variedades diferentes no sólo por su morfología, sino por los complejos procesos físico-químicos que intervienen en su fabricación. Había importantes áreas de investigación en torno al ladrillo, acuciantes áreas de investigación porque se referían a la seguridad de la edificación, a esos fracasos y hundimientos que todavía asoman con no poca frecuencia en nuestros noticiarios.

Si esto fuera una película en vez de un breve discurso, tendríamos que poner ahora una música de trompetas y atabales, y rodar a un caballero que vendría galopando desde la lejanía y pronunciar con voz sonora: “y fue entonces cuando apareció don Federico de Isidro y Gordejuela”.

Ha sido muy importante su estudio, su investigación y su alumbramiento de sutiles claves de comportamiento de estos materiales, es decir, de sus respuestas a la relación de sus componentes, o a los procesos de fabricación, o a la acción de agentes exteriores y muy especialmente a la acción de la humedad. Y su investigación ha dado lugar a una docencia ubicua y activísima en una gran parte de España.

Federico de Isidro nació en Vitoria el 23 de marzo de 1961. Hizo sus estudios de arquitectura en el Colegio Universitario del CEU y en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Terminó con sobresaliente el año 1987. Y los Propagandistas de Angel Herrera, que entre sus defectos no tienen precisamente la tontuna, al año siguiente nombraron a nuestro hombre Coordinador del Área de Conocimiento de Construcciones Arquitectónicas y profesor de Construcción 1 del CEU. Pasó directamente del pupitre a la mesa del profesor. Y ahí ha seguido hasta nuestros días, aunque cambiando de asignaturas: “Revestimientos cerámicos”, “Estructuras de fábrica de ladrillo”, “Sistemas constructivos, Materiales, Obra Gruesa y Construcción”.

En el año 2003 se graduó de doctor en la Politécnica de Madrid con una tesis madura que ha sido la base de su investi-

gación posterior *Determinación de la expansión por humedad de los productos cerámicos empleados en elementos estructurales*. El tema es de gran importancia para la seguridad de la edificación porque los fenómenos de dilatación no previstos o no cuantificados con precisión pueden ser catastróficos. Dentro de este afán tuciorista deben clasificarse también sus aportaciones al *Análisis de patologías y rehabilitación de fábricas antiguas de ladrillo en edificios históricos*, cuya importancia e interés nacional es algo obvio dada la importancia histórica del ladrillo en nuestro arte y nuestra cultura. Y finalmente ha estudiado también la *Resistencia ante el fuego de los muros estructurales de fábrica*”.

En torno a estos temas ha publicado él solo 8 libros y 5 en colaboración con otros autores. Pero ha impartido una impresionante docencia de estas materias en Zaragoza, Tortosa, Cuenca, San Sebastián, Toledo, Vitoria, Gerona, Santander, Valencia, Ávila y por supuesto varias veces en Madrid y Barcelona. Participaciones en congresos y en comités técnicos, proyectos y concursos premiados, etc., llenan un currículum brillante cuya exposición podría cansarles. Los ladrillos de la Residencia y los habitantes que cobijan pueden sentirse agradecidos deudores a este original investigador: Federico de Isidro Gordejuela.



Gerardo Delgado Barrio y Jesús Martín Tejedor.

Gerardo Delgado Barrio

Gerardo Delgado Barrio nació en Santiago de Compostela el año 1946. Tiene por lo tanto 60 años. Como nació un 9 de abril, la posible iconografía de Gerardo podría tener como símbolo la cabeza cornuda de Aries. Además desde su porte elevado, Gerardo baja la cabeza con frecuencia y su postura podría sugerir la intención de embestir. Nada más equivocado e impropio. Gerardo es un gallego dulce como un verso de Rosalía y de una suprema elegancia humana. Pero no dejemos el hilo de la iconografía y planteémonos qué otras figuras podrían representarle con propiedad y exactitud. Pues bien, después de leer su *currículum* y de ver todo lo que ha escrito a sus 60 años, a uno le viene a las mientes la imagen de una divinidad india con muchos brazos y manos a ambos la-

dos de su cuerpo. Y si se considera que todo lo escrito constituye un riquísimo acervo de pensamiento, se piensa en una hidra de muchas cabezas. Y si se proyectan sobre un mapa todos los lugares del mundo a donde ha ido invitado, uno recuerda las divertidas aventuras del barón Münchhausen.

En 1968 terminó su licenciatura en Físicas por la Universidad Complutense. En 1973 se hizo Técnico de Sistemas por la Politécnica de Madrid. Y en ese mismo año se doctoró en Físicas por la Complutense. Hasta 1979 fue profesor agregado de la Universidad Autónoma de Madrid, y, en 1979 también, ingresó por oposición en el Instituto de Estructura de la Materia del CSIC. Es aquí, en este Consejo Superior de Investigaciones Científicas, donde ha transcurrido su ejecutoria en los ratos que le han dejado libre sus viajes al extranjero.

No me queda más remedio que sintetizar globalmente sus aportaciones, aunque luego haré una enumeración de acciones científicas y de topes geográficos a donde ha llegado su presencia científica y docente.

Lo primero que dirán las futuras enciclopedias sobre Gerardo Delgado es que fue el introductor, o uno de los introductores, de la física atómica en España. El se encontró aquí con el belga Yves Smeyers, verdadero iniciador de la física atómica entre nosotros, con quien Gerardo hizo su tesis doctoral. A partir de ese momento Gerardo fue un animador de grupos diferentes dedicados a la física atómica y molecular y a esa siembra se debe el hecho de que hoy en día sea España una de las naciones sobresalientes en Física Teórica y que en el CSIC se creara el Instituto de Física Fundamental, actualmente llamado de Matemáticas y Física Fundamental. Fue también el Primer Presidente del Grupo Especializado de Física Atómica y Molecular.

Lo segundo es que Gerardo Delgado ha introducido a España, con una presencia no sólo digna, sino protagónica, en las más importantes sociedades científicas, escuelas, conferencias e instituciones científicas de Europa, especialmente en la European Physical Society en la que en la actualidad es Responsable de Relaciones Internacionales.

Lo tercero es que Gerardo, al ser nombrado Presidente de la Real Academia de Física en 1997, cargo en el que continúa en la actualidad, ha acrecentado su vitalidad interna y le ha dado una proyección internacional y europea a todas luces memorable.

Sé que a él le agradará que yo mencione también su nombramiento como Presidente de la Federación Iberoamericana de Sociedades de Física, por la que él ha luchado llevado por dos motivos a cual más plausible: el primero porque aprecia el movimiento científico en Hispanoamérica, mucho más digno de tenerse en cuenta de lo que algunos imaginan; y segundo por el prestigio de España, porque Gerardo es profundamente español.

Ha participado, generalmente como investigador principal, en 23 proyectos científicos radicados no sólo en Madrid, sino en Orsay (Francia), en la París Sud, en la Universidad de Chicago, en "La Sapienza" de Roma, en la Universidad de Pittsburg, en la Academia de Ciencias de Moscú, en el Joffe Institute de San Petersburgo, en la Universidad de Cambridge, en la Paul Sabatier de Toulouse, en la de Göttingen, en la de Buenos Aires, en la Nacional de Córdoba, en la de La Plata, y en la de Perugia.

Ha sido coautor de 174 artículos científicos, de los cuales 153 han salido en revistas extranjeras del máximo prestigio y de 18 libros. Ha tenido estancias en Bogotá, Los Angeles, Chicago, Roma, Jerusalén, Moscú, Leningrado, Toulouse, Gainesville, Rio de Janeiro, Londres, Corrientes, Buenos Aires, y Habana. Entre Congresos y Conferencias hace 126 y por este motivo añade a la lista de sus desplazamientos Liblice (Chequia), Rehoboth (Israel), Bernkastel-Kues (Alemania), Taipei (Formosa) Brisbane (Australia), Praga, Córcega, Lausana, Pisa, Edimburgo, Kos (Grecia), Puebla, Río, Argonne (Illinois), Nunspeet (Holanda), Cartago. Ha tenido conferencias en el Congreso y en el Senado. Y ha dirigido 12 tesis doctorales. Es medalla de Oro de la Real Sociedad Española de Física, Doctor Honoris Causa por el Instituto Superior de Ciencia y Tecnología Nucleares de La Habana.

Perdonen si he abusado de su paciencia, pero me parece interesante que nuestro público sepa que todo esto lo ha hecho un español desde España. No todos los científicos españoles son como Gerardo Delgado, pero muchos se le aproximan. Y tengo para mí que no pocos ignoran el cosmopolitismo en que se mueve una parte apreciable de la ciencia española.

Álvaro López Ruiz

Álvaro López Ruiz es un hombre humilde, ajeno a toda presunción, no le gusta empujarse a nadie ni ir por la vida contando grandezas, así que por él nunca nos enteraríamos de que



Álvaro López Ruiz, en un momento de la entrega de las placas.

es bilbaíno. Y es bilbaíno además por un doble concepto: en primer lugar porque es bilbaíno, todos somos de alguna parte; y en segundo lugar porque, además, ha nacido en Bilbao, un 19 de febrero de 1925. Hoy en día todo el mundo sabe que un genuino bilbaíno puede nacer donde le dé la gana.

Estudió el bachillerato en el colegio de Santiago Apóstol de Bilbao regentado por los hermanos de Lasalle y quiero hacer notar que López Ruiz no es el primer ex alumno del Santiago Apóstol que recibe nuestra placa de honor. A licenciarse en Química y a hacer el doctorado vino a la entonces Universidad Central de Madrid. Desde entonces ha estado siempre con las manos en la masa –luego explicaremos en qué sentido– pero en los últimos tiempos de su vida activa se ha soltado y ha levantado el vuelo hacia el ámbito científico-filosófico en busca de las claves explicativas del ser humano, de la vida y del cosmos.

Su tesis doctoral sobre *Obtención y fabricación de cambiadores inorgánicos de iones (zeolitas)* no sólo tuvo el éxito de ser juzgada positivamente por su tribunal, sino que éste su primer trabajo de investigación generó ya la primera patente de invención de su repertorio personal. Antes de presentar su tesis, en 1951, ya había comenzado a trabajar, en 1950, como investigador en el Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción de Madrid. Su campo de trabajo eran los materiales puzolanos, es decir, productos naturales o artificiales que reducidos a polvo fino y mezclados con cales grasas apagadas adquieren propiedades hidráulicas o sea forman morteros que fraguan dentro del agua. Sus primeros pasos de investigación fueron, pues, las masas de adherentes constructivos donde metió sus manos con tenacidad hasta el final de su vida profesional.

Desde 1955 hasta 1967 fue director de laboratorio en diversas dependencias de ámbito estadounidense como la Base de Rota y en Brookline, para terminar con un curso de estudios de postgrado en el famoso MIT de Harvard. Nuevas patentes obtiene en tratamientos geotécnicos mediante inyección de soluciones duales gelificantes que aplica en varios tramos del metro de Milán, en el metro de Barcelona, en el colector de la Castellana de Madrid, en el metro de Valencia y en el metro de Washington. Introduce en España nuevas tecnologías de la construcción: utilización de cenizas de carbón en hormigones; el dispersante retardador del fraguado del hormigón con acción recubridora; inyecciones de compactación dinámica profunda de rellenos y suelos que utiliza bajo el río Támesis y bajo el Júcar en Valencia. Actualmente investiga sobre hidrogeles en el laboratorio de Físico-Química de la Facultad de Farmacia de la Complutense. Todas estas labores científico-tecnológicas han tenido como resultado valioso y meritorio siete patentes de invención en España y en el extranjero.

Todo esto es brillante, aleccionador, y sin embargo la razón más importante por la que hemos querido distinguirlo con

nuestra placa de honor es su labor como divulgador de la Ciencia y de la Tecnología al fundar la Sección de Ciencia y Tecnología del Ateneo de Madrid y presidirla durante 10 años, coordinando 150 conferencias. No queremos insistir más –otras muchas veces lo hemos hecho– en la importancia que tiene en nuestro país la creación de una cultura científica, es decir, de todo eso que ni siquiera echamos en falta cuando a modo de coartada justificativa decimos “es que yo soy de letras”. Si falta en España la Ciencia que correspondería a un país europeo con más de 20.000 dólares *per capita*, es porque falta una cultura científica en nuestra sociedad, y por tanto en los políticos y Gobiernos de cualquier signo que distribuyen nuestro Presupuesto.

En toda esta labor en el Ateneo es donde Álvaro López Ruiz ha sacado las manos de la masa y se ha dedicado a perspectivas trascendentes, filosóficas, vitales. El origen, desarrollo y evolución de la vida molecular dentro de una teoría del cosmos. Tiene 81 años pero le fascina lo que la última física profunda va descubriendo, los nuevos ámbitos de realidad en penumbra pero realidad sonora que hace preguntas, todavía sin respuesta, sobre el sentido del cosmos y la vida.

Obviamente no somos los primeros. Es socio de Honor e insignia de Oro del Colegio Oficial de Químicos de Madrid, y en Denver se le dio el premio de compactación e ingeniería civil. Ha hecho y está haciendo todo esto. Y además es de Bilbao. ¿No le vais a aplaudir?

HISPALYT

La Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida, también conocida como HISPALYT recibe hoy nuestra Placa de Honor 2006 en reconocimiento a su labor en I+D+i en el sector de la industria cerámica estructural y de nuevos materiales cerámicos para la construcción.

Tenemos el honor y la satisfacción de ver entre nosotros a Miguel Ángel Iturralde, presidente de HISPALYT que ha te-



Directivos de Hispalyt.



Iturralde durante la entrega de las Placas de Honor.

nido la atención de venir en persona a recibir nuestra distinción, pero también a dar distinción a este acto. Piensen que HISPALYT agrupa a más de 300 empresas españolas que dan trabajo a 12.500 operarios y genera un volumen de negocio de 1.260 millones de euros. Estos datos acreditan a HISPALYT como la empresa más importante de Europa en su sector productivo.

Nada de esto debe sorprendernos si conocemos los principios e ideaciones a los que obedece la empresa en sus tareas: el primero y más fundamental de esos principios es el fomento de la investigación tecnológica y de la innovación que habrá de ser el vertebrador de su política de competitividad. No se trata de una mera proclamación de principios a efectos de imagen empresarial. Durante los dos años últimos HISPALYT ha invertido en I+D+I la friolera de 200 millones de euros. Y ha producido 30 millones de toneladas métricas de material cerámico.

HISPALYT proyecta su investigación en dos dimensiones: la primera es la medioambiental o ecológica. Movimientos de tierras, moliendas de arcillas, cocciones y emisiones de gases, etc. definen a este sector como potencialmente contaminante. Pues bien, se ha desarrollado una tecnología depuradora que está reconocida como la más avanzada de Europa y que tiene el premio añadido de permitir aumentos sustanciales de producción sin dañar el medio.

La segunda dimensión se refiere a la calidad del producto. A este respecto se han llevado a cabo investigaciones sobre nuevos materiales y sobre la aplicación de nuevas soluciones estéticas y funcionales a las que los fabricantes del grupo HISPALYT conceden gran importancia. Por ejemplo, la mejora de las condiciones acústicas de las paredes construidas con materiales cerámicos. Unas bandas aplicadas a todo el perímetro de la pared rompen el puente acústico que transmite el sonido. Aumenta el aislamiento sonoro hasta 11 decibelios menos. Por eso ha participado en el grupo de investigación preformativa de ensayos de acústica para el nuevo Código Técnico de la Edificación, y ha colaborado con AECOR (Asociación Española contra la Contaminación por

el Ruido) en un estudio sobre la repercusión económica de la implantación de estos adelantos acústicos.

La Asociación Española de Científicos a través de su revista Acta Científica y Tecnológica, a través del Sitio en la Red de nuestra organización y a través del reconocimiento que cada año tributamos por medio de la concesión de nuestras placas de Honor, pretende dar a conocer, especialmente al público español, la existencia de empresas con entidad investigadora que nada tienen que envidiar a las mejores de los prestigiosos países de nuestro entorno europeo. No se trata de dar una imagen dorada de nuestra investigación e innovación que no respondería a la realidad de un país cuya ciencia y tecnología no corresponde a un pueblo con 44 millones de habitantes y más de 20.000 dólares *per capita*. Pero sí se trata de proclamar, y es urgente hacerlo, que somos capaces de estar en la primera fila de la ciencia y de la tecnología. Por eso, la existencia de HISPALYT y de otras empresas que ya hemos distinguido otros años, es altamente aleccionadora y estimulante, y en nombre de todos nosotros, señor Iturralde yo le doy las gracias, porque más allá del trabajo y de la renta que ustedes generan, aportan un ejemplo y un testimonio que esperamos habrá de tener consecuencias en nuestro espíritu público.

Grupo de investigación de la Universidad Complutense de Madrid ARTE, CIENCIA Y NATURALEZA

La concesión de nuestra placa de honor al Grupo "Arte, Ciencia, y Naturaleza" se justifica ante todo como reconocimiento a una iniciativa novedosa, necesaria y creativa; quizá también valiente y, desde luego, ambiciosa. Una ejecutoria larga y colmada de resultados no puede darse todavía, habida cuenta de la breve historia del Grupo. A decir verdad, han hecho mucho en el tiempo que llevan trabajando, y no es su menor aportación el haber formulado unos esquemas conceptuales que fundamentan el estatuto de una nueva y necesaria interdisciplina.



Grupo de Arte Ciencia y Naturaleza.

El Grupo "Arte, Ciencia, Naturaleza" pretende abrir un camino de encuentro entre diferentes disciplinas como la biología, la botánica, la fisiología, la zoología, la sociología y los multimedia, investigando en aplicaciones artísticas desde la escultura, el dibujo, la fotografía, la restauración, la pintura y las aplicaciones 3D, que aunque son reclamadas desde estos ámbitos no han encontrado hasta ahora el entramado y la estructura suficientes como para, de modo riguroso y en profundidad, abordar todos estos aspectos. Pretenden incrementar el conocimiento y el interés social hacia la ciencia y hacia la naturaleza, conscientes de que el arte es una óptica nueva y complementaria de la ciencia para el conocimiento de la naturaleza, o si se quiere, de la realidad cosmológica.



Arte Ciencia y Naturaleza.

Bellas Artes. Esta labor divulgadora de los artistas difundirá socialmente el interés por la ciencia y contribuirá no poco a la formación en el pueblo español de una cultura científica cuya menguada existencia es causa de que la investigación científica no recabe la atención política y presupuestaria que la ciencia merece.

Hay un aspecto de especial modernidad en el que me parece que este grupo de "Arte, Ciencia y Naturaleza" tiene una peculiar misión que cumplir. Es una sugerencia que yo les brindo y se refiere a la singular relación que siempre ha existido entre el arte y el reflejo de la realidad. Nuestro mundo, nuestra época se caracteriza por el descubrimiento de nuevos ámbitos de realidad.

Esta cooperación del arte con la ciencia tiene una doble dimensión: primera la que acabamos de expresar como aportación al conocimiento a través de una nueva óptica complementaria en el terreno heurístico y de la invención; segunda como aportación a la divulgación de la ciencia y de su interés social.

De la primera dimensión hay ejemplos ya clásicos que conviene recordar. La gran aportación de Celestino Mutis para el conocimiento de la flora americana no habría podido hacerse sin el concurso del arte del dibujo en época en que no existía la fotografía. Algo parecido podríamos decir de los viajes de Alexander Humboldt o del mismo Darwin. Más notable es todavía la adivinación certera del trazado de la red nerviosa del cuerpo humano que hizo Ramón y Cajal a través de dibujos todavía vigentes. El mismo fue también un expertísimo utilizador del arte fotográfica. Más antiguas son las plasmaciones de la realidad teológica en las vidrieras góticas o las intencionadas abstracciones del arte de las cavernas, aunque no sepamos con certeza cuál era su relación con la realidad.

Las modernas técnicas fotográficas y de informática permiten la recuperación de importantes fondos museísticos relegados a un desván y aun deteriorados, cuya recuperación, restauración y puesta a la luz vuelven a poner en circulación conocimientos valiosos y acaso ignorados en nuestro tiempo.

La segunda dimensión, es decir, la divulgativa tiene mucho que ver con la actual proliferación de museos, de planetarios, de parques zoológicos, de parques botánicos, cuya finalidad docente y aun frutiva requieren una permanente puesta en escena, un efectismo emocional, mediante la instalación de maquetas, volúmenes, esculturas, luces y sonidos que son dominio del artista y aun del tratadista de

La física intraatómica, la biología molecular, las redes cristalográficas sugieren imágenes que plasman los resultados obtenidos por las leyes internas de la matemática, que por una ya no tan sorprendente correspondencia, ponen en evidencia la identidad entre la matemática y la realidad física profunda. Esta condición pitagórica de la realidad profunda hace posible al físico avanzar sin más ayuda que la pizarra y la tiza. Lo que es verdad en la lógica matemática se descubre ser también real en los componentes del cosmos y ¡oh sorpresa! hasta en el propio funcionamiento de la mente humana. Pues bien, el artista siempre ha querido reflejar la realidad, y si quiere seguir siendo fiel a este envite de la realidad profunda tiene que afrontar este nuevo reto de los tiempos. ¿Cómo representar el mundo intraatómico, el mundo de la molécula viva, el mundo de las estructuras moleculares y de los cristales?

Evidentemente, una pintura del mundo intraatómico presentará una factura de apariencia abstracta, pero ni Picasso, ni Braque, ni Kandinsky, ni Klee, ni Mondrian, ni Malevich pensaron en hacer imágenes figurativas de la realidad profunda. Ellos son abstractos y de ningún modo figurativos o retratistas de la realidad. Ahora bien, ellos trocearon y crearon formas, definieron tratamientos del color, de la luz, y de la geometría que habrán de servir para mucho a quienes intenten adentrarse en la realidad profunda con intención figurativa. Ahí os dejo esta difícil sugerencia que no sé si os podrá aprovechar.

El grupo "Arte, Ciencia, Naturaleza" ha firmado acuerdos con el Museo Nacional de Ciencias Naturales, con el Jardín Botánico, con el Zoo-Acuarium, con Faunia. Prepara Cursos de Lenguajes y Técnicas Artísticas... Y una cosa digna de toda reverencia tenemos que decir de ellos... Resulta que ganan dinero. ¿Qué dato más elocuente podemos decir de su excelencia? ■

donde unos ven necesidades,

nosotros vemos soluciones

APORTAMOS CONOCIMIENTO

Aeroespacial . Civil y Arquitectura .
Energía y Procesos . Naval .



SENER

www.sener.es

Barcelona . Bilbao . Buenos Aires . Lisboa . Madrid . México D.F. . Valencia . Varsovia

Creative energy

Market segments

- Biomass.
- Central Generation.
- Wind energy.
- Photovoltaic.
- Fuel cells.
- Hydrogen.
- Emerging Technologies on Production and Storage.
- Natural gas.
- Electrical Network.

Additional segments

- Environmental & Energy.
- Energy & Construction.
- Energy & Transport: Propulsion, new fuels.

