

Ciencia e ^{CI} Investigación

ASOCIACIÓN ARGENTINA PARA EL PROGRESO DE LAS CIENCIAS

Primera revista argentina de información científica / Fundada en enero de 1945



Simbiosis: su rol en la supervivencia y la evolución de los organismos.

■ ROSA NAGEL

Cosmología moderna: la huella de la formación de los mundos

■ ALEJANDRO GANGUI

Retinopatía diabética: mecanismos básicos y avances terapéuticos

■ GABRIELA BRAVO, CAROLINA FLUMIAN, MARTÍN GÓMEZ, GABRIELA LEVY

Los matemáticos, su oficio y su saber: entre la armonía de las esferas y el arrebató inspirador

■ ENRIQUE SEGURA

La fabricación de los elementos combustibles para reactores nucleares en la Argentina

■ DOMINGO QUILICI
SANTIAGO HARRIAGUE

TOMO 60 N°1 - 2010



UNSAM

UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

E S C U E L A D E P O S G R A D O

DOCTORADOS, MAESTRÍAS Y ESPECIALIZACIONES en temas de:

- Química
- Medioambiente y Desarrollo Sustentable
- Microbiología
- Toxicología
- Educación
- Derechos Humanos
- Familia
- Cooperación Internacional
- Derecho
- Medicina Legal

**CURSOS DE FORMACIÓN CONTINUA, PRESENCIALES Y A DISTANCIA.
SÓLIDA EXPERIENCIA EN INVESTIGACIÓN, TECNOLOGÍA Y TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO.**

MÁS INFORMACIÓN:

ESCUELA DE POSGRADO

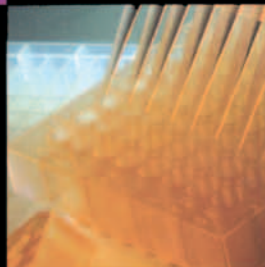
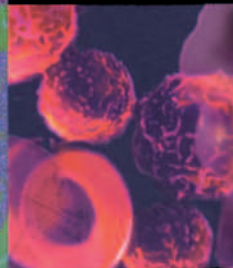
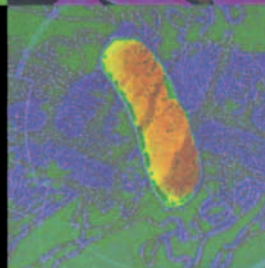
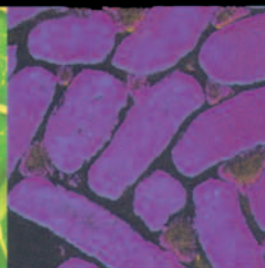
Teléfonos: 4372-3990 / 4580-7264 / 7300

E-mail: posgrado@unsam.edu.ar

www.posgrado.unsam.edu.ar

KITS PARA PURIFICACIÓN de Ácidos Nucleicos

AxyPrep™
Plasmid
Multisource Genomic DNA
Blood Genomic DNA
Body Fluid Viral DNA/RNA
Bacterial Genomic DNA
Multisource RNA
Blood RNA
Cultured Cell RNA
PCR Clean-up
DNA Gel Extraction



CIENCIA Y EXCELENCIA



ETC Internacional S.A.
Tel (54 11) 4639 3488 (rotativas)
etcventa@etcint.com.ar
etcinfo@etcint.com.ar
www.etcint.com.ar

AXYGEN®

B I O S C I E N C E S

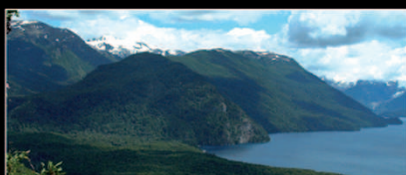


FUNDACIÓN DE HISTORIA NATURAL
FÉLIX DE AZARA

En todo el país

Por el estudio y la conservación
del patrimonio de todos los argentinos.

CIENCIA | CONSERVACIÓN | EDUCACIÓN | DIVULGACIÓN



Proyectos de investigación y conservación - Servicio de Información - Reservas - Relevamiento de campos - Estudios de impacto ambiental - Estudios de impacto sobre bienes arqueológicos - Publicaciones
Arqueología de rescate - Asesoramiento en temas ambientales - Trabajos de campo - Lucha contra el tráfico ilegal de flora y fauna silvestres - Viveros - Congresos y jornadas - Cursos y conferencias - Biblioteca
Exposiciones temporarias e itinerantes - Producciones televisivas y radiales - Talleres educativos - Visitas guiadas - Charlas en escuelas - Colecciones - Archivo de imágenes - Prensa y difusión

www.fundacionazara.org.ar

Acompañamos a la Fundación en su compromiso con el país, con sus recursos y con su gente.



Fundación de Historia Natural Félix de Azara
Departamento de Ciencias Naturales y Antropología
CEBBAD - Instituto Superior de Investigaciones

 **Universidad Maimónides**

EDITOR RESPONSABLE

Asociación Argentina para el
Progreso de las Ciencias (AAPC)

COMITÉ EDITORIAL

Directores

Dr. Alberto Baldi
Dr. Marcelo Vernengo

Editores Asociados

Dr. Guillermo Juvenal
Dr. Claudio Parica
Dra. Alicia L. Sarce
Dr. Ángel M. Stoka
Dra. Marta Toscano
Dr. Norberto Zwirner
Dr. Juan R. de Xammar Oro

**CIENCIA E
INVESTIGACIÓN**

Primera Revista Argentina
de información científica.
Fundada en enero de 1945.
Es el órgano oficial de difusión de
la Asociación Argentina para el
Progreso de las Ciencias.

Av. Alvear 1711, 4° piso,
(C1014AAE) Ciudad Autónoma
de Buenos Aires, Argentina.
Teléfono: (+54) (11) 4811-2998
Registro Nacional de la
Propiedad Intelectual
N° 82.657. ISSN-0009-6733.

Lo expresado por los autores o anun-
ciantes, en los artículos o en los avisos
publicados, es de exclusiva responsabi-
lidad de los mismos. Ciencia e Investi-
gación no se hace responsable por su
contenido.

Ciencia e Investigación se
edita *on line* en la página web
de la Asociación Argentina
para el Progreso de las
Ciencias (AAPC)
www.argentinapciencias.org

Centrales nucleares
Atucha, la imagen
izquierda construcción
de CNA II, la imagen
derecha CN Atucha I



SUMARIO

EDITORIAL

LA AAPC DE CARA AL BICENTENARIO

Alberto **Taquini** 3

ARTÍCULOS

La fabricación de los elementos combustibles para reactores nucleares en Argentina

Domingo **Quilici** y Santiago **Harriague**. 4

Simbiosis: su rol en la supervivencia y la evolución de los organismos

Rosa **Nagel** 23

Cosmología moderna: la huella de la formación de los mundos

Alejandro **Gangui** 30

Retinopatía diabética: mecanismos básicos y avances terapéuticos

Gabriela **Bravo**, Carolina **Flumian**, Martín **Gómez** y
Gabriela **Levy** 41

Los matemáticos, su oficio y su saber.

Entre la armonía de las esferas y

el arrebató inspirador

Enrique **Segura** 51

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES..... 58

... La revista aspira a ser un vínculo de unión entre los trabajadores científicos que cultivan disciplinas diversas y órgano de expresión de todos aquellos que sientan la inquietud del progreso científico y de su aplicación para el bien.

Bernardo A. Houssay

Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias

COLEGIADO DIRECTIVO

PRESIDENTE

Dr. Alberto C. Taquini (hijo)

VICEPRESIDENTE

Dr. Jorge Zenón Comín

SECRETARIA

Dra. Nidia Basso

TESORERO

Dr. Horacio H. Camacho

PROTESORERO

Ing. Juan Carlos Almagro

PRESIDENTE ANTERIOR

Dr. Alberto Baldi

MIEMBROS TITULARES

Dr. Máximo Barón

Dr. Eduardo H. Charreau

Ing. Oscar Mazzantini

Dr. Raúl Racana

Dr. Renato Radicella

Dr. Héctor Torres.

Dr. Marcelo Vermengo

Dr. Juan R. de Xammar Oro

MIEMBROS INSTITUCIONALES

Sociedad Argentina de Farmacología Experimental

Sociedad Argentina de Investigación Bioquímica

Sociedad Argentina de Investigación Clínica

Unión Matemática Argentina

MIEMBROS FUNDADORES

Dr. Bernardo A. Houssay – Dr. Juan Bacigalupo - Ing. Enrique Butty

Dr. Horacio Damianovich – Dr. Venancio Deulofeu – Dr. Pedro I. Elizalde

Ing. Lorenzo R. Parodi – Sr. Carlos A. Silva – Dr. Alfredo Sordelli - Dr. Juan C. Vignaux

Dr. Adolfo T. Williams – Dr. Enrique V. Zappi

AAPC

Avenida Alvear 1711 – 4º Piso

(C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

www.aapciencias.org

La AAPC de cara al Bicentenario

Alberto C. **Taquini (h)** ■

La Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias llega al Bicentenario después de un periodo de reconocimientos y transformaciones.

En él se realizaron una serie de reuniones públicas sobre la generación de conocimiento en el país, las que nos han permitido reconocer los aportes que, los miembros que la crearon y constituyeron, realizaron para la ciencia argentina.

Bernardo Houssay, por tus aportes a la diabetes y a la organización sistemática de la ciencia en la Universidad Argentina. Los descubrimientos fundamentales en el mecanismo renina-angiotensina, los de los mecanismos de los hidratos de carbono. La organización de las distintas disciplinas científicas encaradas por ellos han sido y serán siempre reconocidas.

La constitución del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y la creación de la Secretaría de Ciencia y Tecnología, hoy Ministerio, se han debido a la acción específica de miembros de esta Asociación.

También hemos recordado al Doctor Cesar Milstein por su importante descubrimiento de los anticuerpos monoclonales, y a otros destacados científicos que tanto han hecho por las ciencias en el país.

En el mismo periodo se estableció una modificación en la dinámica de publicación de la revista ciencia e Investigación, en la que han asumido la dirección de la misma los Dres. Baldi y Vernengo.

En la nueva página Web se han abierto distintas secciones con el objeto de debatir en ellas los principales temas científico-tecnológicos.

La reestructuración institucional de la Asociación ha dado un nuevo paso con el objeto de vincularla crecientemente con las exigencias del aparato productivo y en tal sentido, en la Asamblea Extraordinaria se modificó el Artículo Primero del Estatuto para permitir que en el cuerpo colegiado puedan participar representantes de las instituciones intermedias del mismo.

La ciencia argentina en expansión en los organismos de política y promoción de la ciencia, la creación de universidades nacionales y privadas en todo el territorio del país y la creciente responsabilidad de estas con respecto a la investigación hacen pensar que en los próximos años la Argentina estará mas inmersa en los desafíos científicos y culturales de un mundo globalizado.

En resonancia con esos cambios hemos trabajado para contribuir a ello y así apuntaron las modificaciones que, en estos tres últimos años, hemos encarado en la Asociación.

La fabricación de los elementos combustibles para reactores nucleares en Argentina

Palabras clave: combustibles nucleares; reactores nucleares; industria nuclear; uranio; circonio.
Keywords: nuclear fuels; nuclear reactors; nuclear industry; uranium; circonio.

Domingo Quilici¹ ■
Santiago Harriague²

Comisión Nacional de
Energía Atómica (CNEA)
¹quilici@cnea.gov.ar
²harriag@cnea.gov.ar

El presente trabajo es una reseña del desarrollo y posterior fabricación industrial de los elementos combustibles que alimentan a los reactores de investigación y centrales nucleares argentinas. Su propósito es historiar cómo la vinculación entre un Organismo Público de I+D+i y la industria local permitió garantizar el suministro de combustible a los reactores nacionales y desarrollar una capacidad industrial en un sector de alta tecnología. Este proceso estuvo signado por la temprana decisión en 1957 de desarrollar y fabricar localmente los combustibles para todas las instalaciones nucleares. Así se ha abastecido de combustible nacional a las dos centrales nucleares en operación, los cinco reactores de investigación construidos en el país y los cuatro exportados, y actualmente se están poniendo a punto las líneas de fabricación para el combustible de la Central Nuclear ATUCHA II en construcción. Para la fabricación de los combustibles de las centrales nucleares se constituyó una empresa de mayoría privada, a la que CNEA transfirió la tecnología.

■ 1 - ANTECEDENTES DEL DESARROLLO DE LOS COMBUSTIBLES NUCLEARES EN CNEA

Desde sus inicios, a comienzos de la década del 50, la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) se planteó como objetivo el desarrollo de aplicaciones pacíficas de la energía nuclear a la generación de energía, a la salud,

al agro y a la industria. La metodología adoptada para desarrollar capacidades tecnológicas autónomas en dichas áreas fue “aprender haciendo” a través de la adquisición incremental de dichas capacidades encarando proyectos de complejidad creciente.

Los reactores nucleares de potencia para generación eléctrica estaban en la década del 50 en una temprana etapa de desarrollo en el mundo, y las prime-

ras unidades comenzaron a operar en la entonces Unión Soviética (1954), el Reino Unido (1956) y Estados Unidos (1957). Se adoptó entonces como camino de aprendizaje los reactores de investigación.

En un país donde la autosuficiencia en los combustibles, fundamentalmente el petróleo, se había constituido en un objetivo prioritario, se decidió tempranamente en el campo nuclear al-

canzar autosuficiencia en el suministro del combustible de los reactores. Para ello se contaba con la existencia en el país de uranio, fuente de la energía nuclear, lo que dio lugar desde los inicios de CNEA a un esfuerzo sistemático en el campo de la exploración y en los posteriores procesos de producción, concentración y purificación de este mineral.

El desarrollo autónomo del combustible nuclear presentaba un primer escollo: la inexistencia a comienzos de los años 50 de formación en Metalurgia en el país. Esa disciplina no existía en los planes de estudio de las universidades nacionales.

Fue así que en enero de 1955 ingresa a CNEA Jorge Sabato, profesor de Física con experiencia en ese tema, para crear la División Metalurgia. Dicha División debía alcanzar la capacidad necesaria para el desarrollo local del combustible de los futuros reactores de investigación, y más adelante, de potencia.

Si bien los materiales involucrados en los combustibles nucleares eran aleaciones y compuestos de uranio, aleaciones de aluminio y aleaciones de circonio, Sabato comprendió que la mejor forma de alcanzar el dominio de la metalurgia nuclear era desarrollando una fuerte base de conocimientos en metalurgia general. ¹Así sería posible enfrentar la constante y rápida evolución de la tecnología nuclear, además de contribuir al desarrollo de la industria local metal-mecánica convencional. Para tal fin se enviaron jóvenes profesionales al exterior y se recibió la visita de numerosos expertos extranjeros para la capacitación en las áreas básicas de la metalurgia de transformación. Se generó así una de las ramas de I+D+i que caracterizó a la Institución, tanto por la excelencia de los investigadores, por la escuela que significó para el país y para Latinoamérica, como por el derrame del saber metalúrgico a la industria local.

Existía entonces una coyuntura internacional favorable a la cooperación en los usos pacíficos de la energía atómica². En 1953 EEUU lanzó el programa "Átomos para la Paz"; en 1956 se creó el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), del cual Argentina fue miembro fundador. Como conse-

cuencia de ese clima, los laboratorios de renombre internacional estaban abiertos a recibir investigadores y tecnólogos de todos los países, al menos los alineados en "occidente", y CNEA supo aprovechar la oportunidad.

Pero los resultados obtenidos se debieron a que la Institución tenía un programa de desarrollo articulado con objetivos precisos, que partía desde la formación de recursos humanos en ciencias fundamentales, de tecnólogos y posteriormente hasta de operarios especializados. Esto se lleva adelante con los cursos de post grado para formación en reactores nucleares que comenzaron en 1953, la creación del Instituto Balseiro en 1955, los Cursos Panamericanos de Metalurgia, desde principio de los 60, con el apoyo de la Organización de los Estados Americanos, para llegar luego de una rica historia de capacitación en tecnología nuclear y de creación de Institutos Académicos, a la Escuela de Soldadores, creada con motivo de la construcción de la Central Nuclear Atucha I. Todo dentro de un ambiente donde se promovía la generación de tecnología endógena para su aplicación nuclear y no nuclear.

No se pueden comprender estas decisiones sin mecharlas con el pensamiento de Jorge Sabato³, nacido, en parte, desde su puesto de investigador y dirigente de la CNEA. El proyecto nuclear que se inició relacionaba los tres vértices del Triángulo de Sabato, nacido de las ideas de la "Escuela Latinoamericana de Pensamiento en Ciencia, Tecnología y Desarrollo"⁴ (1950/70) que se difunde entonces, como una de las bases alternativas de la organización político-técnica, social y económica para los países de la región.

■ 2 - EL DESARROLLO DE LOS COMBUSTIBLES PARA LOS REACTORES DE INVESTIGACIÓN

La decisión de CNEA en 1957⁵ de construir localmente el reactor RA-1, sobre la base de planos provistos por EEUU, y de fabricar localmente su combustible, permitieron evaluar la capacidad metalúrgica conseguida en sólo dos años.

El reactor, primero en Latinoamérica, comenzó a operar en enero de 1958, en base a datos de diseño provistos por el Argonne National Laboratory de EEUU y los combustibles desarrollados y fabricados por CNEA⁶, con apoyo de la empresa nacional CAMEA. El "know-how" sobre esa fabricación fue vendido a una empresa alemana⁷, lo que demuestra la pronta convicción de los tecnólogos de la necesidad de comercializar los desarrollos propios.

En los años subsiguientes, el reactor sufrió grandes modificaciones para elevar su potencia y, consecuentemente sus prestaciones. Los cambios de diseño fueron hechos e implementados por CNEA; las modificaciones significaron sucesivos cambios radicales en el combustible, llevados a cabo también por CNEA.

A comienzos de la década del 60 se decidió diseñar y construir el reactor RA-3 para producción de radioisótopos⁸, proyecto de complejidad órdenes de magnitud superior a la del RA-1. Dentro del proyecto se diseñó y construyó el RA-2, reactor de potencia cero (su denominación técnica es conjunto crítico). CNEA diseñó y fabricó los combustibles para el RA-2 y el RA-3⁹, que comenzó a operar en 1967. Desde entonces el RA-3 suministra la mayoría de los radioisótopos requeridos por el sistema de salud argentino, y recientemente ha iniciado su exportación ante la actual crisis mundial en su provisión. Durante más de 40 años de operación, CNEA ha introducido sucesivas modificaciones al combustible, reduciendo su enriquecimiento para satisfacer las políticas de no proliferación e introduciendo nuevos compuestos de uranio de mayor rendimiento (Fig. 1 y 2).

En 1978 se inició la exportación de reactores de investigación, con el diseño y construcción del reactor de producción de radioisótopos RP-10 al Perú, primera exportación nuclear Sur-Sur de envergadura, donde se diseñó y garantizó el combustible.

En 1982 comenzó a operar el reactor RA-6 en el Centro Atómico Bariloche, como soporte a la carrera de Ingeniería Nuclear iniciada en el Instituto Balseiro. Nuevamente el diseño y fabricación de su combustible estuvo a cargo de CNEA, así como del nuevo combustible de bajo enriquecimiento

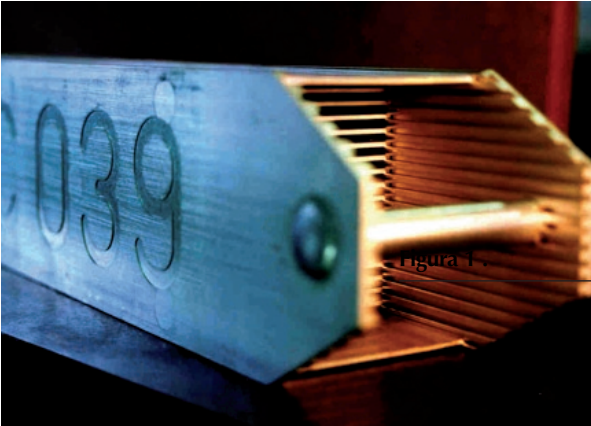


Figura 1 . Combustible MTR

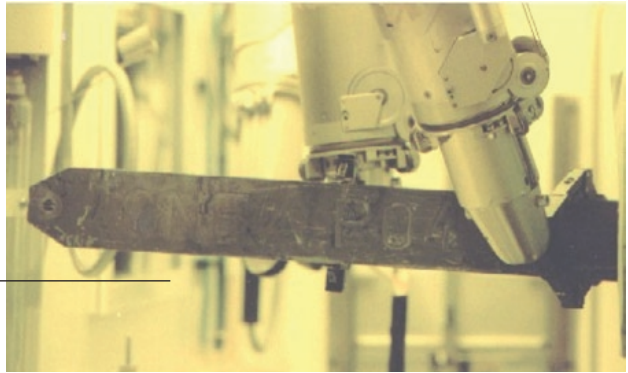


Figura 2 . Proyecto CADRIP – Prototipo de elemento combustible con alta densidad de uranio P04 durante su desarme en celda caliente

adoptado a comienzos de 2009. Otro tanto ocurrió con el combustible del conjunto crítico RA-8, parte del proyecto CAREM, Fig. 3.

CNEA fue también responsable del diseño y fabricación del combustible de los tres reactores experimentales exportados por INVAP: NUR a Argelia (1985/89), ETRR-2 a Egipto (1992/97) y OPAL a Australia (2000/07) Fig. 4.

A partir de la década del 90 la empresa de mayoría privada CONUAR SA, creada para la fabricación del combustible de las centrales nucleares argentinas, comenzó a fabricar en su planta FECRI (Fábrica Elementos Combustibles Reactores Investigación) los elementos combustibles para el reactor RA-3, antes producidos por CNEA.

En la actualidad, dentro de este exitoso proceso de más de 50 años, CNEA está desarrollando nuevas aleaciones de uranio que permitan aumentar significativamente la concentración de ese elemento fisionable en una nueva generación de combustibles para reactores de investigación.

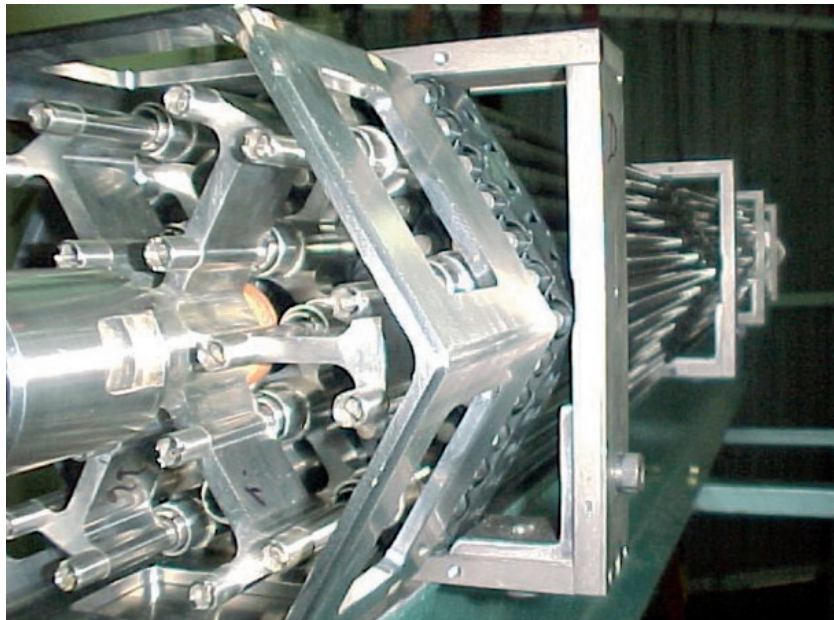


Figura 3 . Detalle del prototipo de combustible tipo CAREM

■ 3 - LAS DECISIONES Y ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL DESARROLLO DE LOS EECC PARA LOS REACTORES DE POTENCIA

Las primeras acciones concretas sobre los combustibles nucleares de los reactores de potencia¹⁰, nacieron con la decisión de incorporar la nucleoelectricidad al sistema eléctrico nacional en 1965.

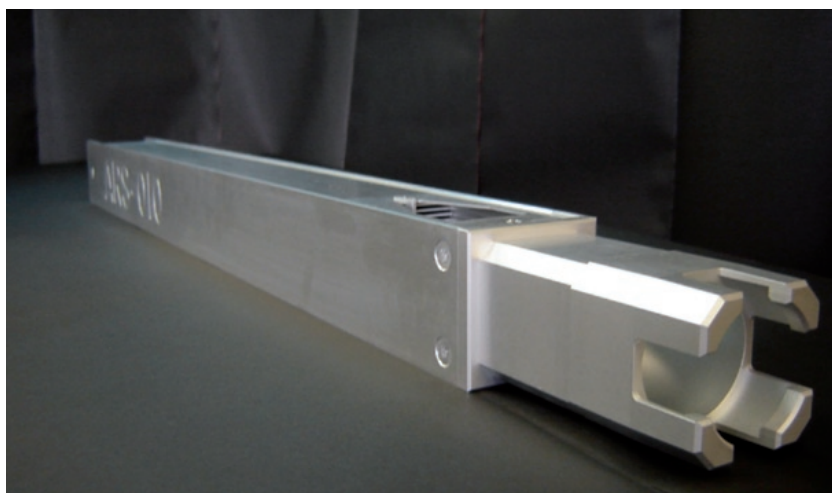


Figura 4. Elemento combustible de alta densidad para el Reactor OPAL.

La decisión de que el país entrara, en el todavía exclusivo club de los que producían electricidad aprovechando la energía de la desintegración del átomo, la elección de una línea de reactores con la cual se pretendía alcanzar una mayor independencia de los suministros importados¹¹ y el convencimiento del desarrollo y la integración industrial que significaría introducirse en el campo energético nuclear, fueron acciones fundamentalmente impulsadas por los directivos de la CNEA, imbuidos de los pensamientos políticos del la época. Tales políticas eran, entre otras, la búsqueda de la autosuficiencia tecnológica y energética, y superar el estancamiento de la primera fase del modelo de industrialización por sustitución de importaciones. Encontraron eco en las autoridades del gobierno, las cuales pensaban, entonces, que debían acompañar estos proyectos utilizando la capacidad del Estado para programar e invertir en sectores estratégicos, como el energético, y al mismo tiempo legislar para incentivar la participación de la industria nacional.

Con la compra de la Central Nuclear Atucha I (CNA I), a la empresa alemana Siemens, se decide que los combustibles para la misma sean fabricados en el país. En el contrato de compra se establecía la participación de personal de CNEA en su diseño y la transferencia de la tecnología de su fabricación.

Sabato negoció con la empresa SIAM Electromecánica su participación en la naciente industria nuclear nacional, comenzando con la fabricación de un combustible prototipo; esta iniciativa queda trunca por razones ajenas a lo técnico y estuvo más bien basada en la crisis que sufría dicha empresa¹². En consecuencia, se fabricó el prototipo argentino en los laboratorios del Centro Atómico Constituyentes. El mismo fue ensayado en el reactor MZFR –prototipo a su vez del reactor Atucha I - y luego pasó exitosamente las pruebas de post irradiación en celdas calientes alemanas, verificándose su comportamiento.

A partir del año 1971, el Departamento de Combustibles de la CNEA constituye, en la fábrica alemana RBU de combustibles, el grupo de inspección de fabricación de los elementos

combustibles (EECC) para la CNA I, con los alcances establecidos en el contrato de compra de los primeros núcleos para la Central. Este grupo aprovecha la oportunidad para estudiar el “lay out” de las instalaciones y los procesos de fabricación, reuniéndose además valiosa información que serviría de base para la confección de las especificaciones y pliegos para la obra civil de la futura fábrica de combustibles nucleares a construirse en la Argentina, adquiriéndose, así mismo, capacitación en el aseguramiento de la calidad.

Una muestra de la capacidad alcanzada en capitalizar la experiencia y el aprendizaje surge del siguiente hecho. Durante las pruebas en frío de los combustibles alemanes en la central de Atucha I se verificó un error de diseño, y fueron los tecnólogos argentinos, conjuntamente con los alemanes, los que analizaron y resolvieron el problema.

Para completar el dominio nacional del suministro del combustible se inició el desarrollo de las vainas (tubos de pared fina) y componentes estructurales del combustible, construidas de una aleación de circonio¹³ llamada Zircaloy 4.

Durante el proceso de desarrollo de esta tecnología comenzó la búsqueda de los equipos para fabricar las vainas. En 1969, a instancia de tecnólogos dedicados a este desarrollo, Sabato viajó a la URSS, visita la fábrica de las máquinas laminadoras para tubos de pared fina, similares al equipamiento usado en Alemania. Concluye en la conveniencia de adquirir las máquinas rusas¹⁴.

Es importante aquí señalar la presencia argentina en el OIEA. Las laminadoras rusas fueron transferidas a la Argentina, dentro de la cooperación internacional que el Organismo estimulaba. Los rublos soviéticos no eran, en aquel momento, convertibles. El costo de la maquinaria fue considerado parte de la cuota que los rusos debían pagar al Organismo y éste la cedió a la CNEA en el marco de su programa de cooperación para el desarrollo de la energía nuclear con fines pacíficos.

Estas laminadoras no fueron el único equipamiento que recibió el país en el marco del programa de cooperación técnica citado. Los contactos de los

tecnólogos argentinos con sus pares alemanes permitieron adquirir equipamiento sofisticado para los laboratorios metalúrgicos, así como la visita de expertos que ellos invitaban a través del citado organismo internacional. Estos expertos tuvieron, en algunos casos, participaciones importantes en el desarrollo de la tecnología para la fabricación de los EECC⁵.

■ 4 - EL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL, DEL EC PARA LA CNA I

En los años 1975-1976, teniendo en cuenta:

- el cuadro de situación en la generación núcleo eléctrica a nivel mundial en la década del '70, su proyección futura estimada en ese momento y el consecuente mercado de EECC asociado¹⁶;
- la decisión adoptada por la Argentina en el año 1965 de incorporar la núcleo electricidad al sistema energético nacional; y
- los trabajos sistemáticos llevados a cabo por CNEA en el campo de desarrollos tecnológicos a escala de laboratorios y señalados en el punto 3 precedente;

Se inician así acciones para la instalación, en el país, de una planta industrial de fabricación de EECC para el plan nuclear vigente, con capacidad de suministro para 3 líneas de producción: Central Nuclear Atucha I, Central Nuclear de Embalse y para una tercera Central Nuclear.

En consecuencia, la CNEA implementa en el año 1976 dos proyectos que se ejecutarán simultáneamente:

- El Proyecto Fábrica de Elementos Combustibles Nucleares (FECN): para las obras civiles y servicios auxiliares de la planta industrial a instalarse en el Centro Atómico Ezeiza - CAE, con capacidad de producción para las tres líneas señaladas, y posteriormente encarar las acciones con la industria privada nacional para la formación de una empresa que operará la misma.
- El Proyecto Planta Piloto de Fabricación de Elementos Combustibles

Nucleares para Atucha (PPFECN-A): encargado de desarrollar las técnicas de fabricación y control de la línea de EECC para la CNA I, con el objetivo de alcanzar la escala de producción demandada por la Central, la provisión del correspondiente equipamiento industrial necesario y el entrenamiento del personal para la línea de producción. La tecnología fue transferida por la empresa alemana RBU, y su precio fue incorporado al valor de las máquinas que se compraron a la firma.

- Las actividades del Proyecto PPFECN-A se desarrollaron en el Centro Atómico Constituyentes, bajo dependencia de la entonces Gerencia de Desarrollo y asistido por la infraestructura técnico-administrativa de la CNEA. También contó con la participación de la industria privada nacional como proveedora de algunos equipos para la fabricación de algunas piezas estructurales de los EECC y como prestadora de servicios demandados por la operadora del proyecto.
- En el marco de las actividades de la Planta Piloto se desarrollaron dos Subprogramas:
 - Adquisición de todo el equipamiento de fabricación a proveedores europeos, así como la compra, en el mercado internacional, de los materiales necesarios para la puesta a punto de la tecnología y de la línea de fabricación industrial en la futura Fábrica (FECN).
 - Desarrollo de las técnicas de fabricación y control del elemento combustible. Con el equipamiento instalado y en operación en la Planta Piloto del CAC fueron desarrolladas las respectivas técnicas de fabricación y control, bajo especificaciones establecidas por el Departamento de Combustibles de CNEA y procedimientos de operación redactados por la Planta Piloto. Se dio por concluido el desarrollo cuando se alcanzó una capacidad de producción de 1,5 combustibles por día – que era el consumo de la Central - lo que implicó fabricar 243 EECC, que alimentaron la Central Atucha I¹⁷.
- A su vez el Proyecto estuvo particularmente atento a la programación

de sus actividades y a la evaluación de los costos del desarrollo.

El Proyecto PPFECN-A fue programado por “Camino Crítico” y establecía alcanzar los objetivos propuestos en el período agosto/76-septiembre/80¹⁸. Por razones de índole económico financiera hubo un atraso de 8 meses, y otros 4 por problemas técnicos.

Es de destacar que en la importación de equipos con tecnología sensitiva¹⁹ provenientes del exterior no surgieron inconvenientes con las autoridades alemanas, salvo el cumplimiento de los requisitos de salvaguardia exigidos por el OIEA imperantes en la época. Esta situación no se modificó con el ingreso de Alemania Federal al “Club de Londres²⁰”, pese a que el mismo exigía que los países compradores de tecnología sensitiva suscribieran el Tratado de No Proliferación Nuclear, cosa que Argentina no había hecho.

El “Costo del Desarrollo de Tecnología de Fabricación y Control del Elemento Combustible CNA I” se calculó como la diferencia entre “todas las inversiones realizadas para lograr el objetivo del Proyecto propuesto” y el “producido físico del Proyecto”. Se entendía por esto último el valor de los bienes de capital y de los materiales que se transfirieron a la Fábrica “a posteriori”, más el valor de la energía producida en la CNA I por los 243 EECC fabricados en la Planta Piloto.

El “Costo de Desarrollo” fue definido como el “producido tecnológico del Proyecto” y constituyó una cuantificación del “conocimiento adquirido” por

el personal del Proyecto²¹ que, en un 80% fue incorporado posteriormente a la empresa fabricante industrial de los combustibles (CONUAR).

Dicho “Costo” fue incluido en la negociación económica llevada a cabo al constituirse la empresa CONUAR que operaría la FECN, cerrando de esta forma el balance contable del Proyecto PPFECN-A e incorporando al patrimonio productivo del país una fuente genuina de recursos.

■ 5 - LAS INVERSIONES PRODUCTIVAS

En 1976 la dirección del Proyecto (FECN) decidió la construcción de la planta industrial. En 1977 se llamó a licitación para su construcción (adjudicada a una firma local); se trataba de una obra proyectada por CNEA, de 11.000 metros cuadrados cubiertos y con especificaciones muy exigentes.

La maquinaria instalada en la Planta Piloto fue trasladada a la nueva planta industrial, y fue valorizada como se indico en el punto anterior²².

La planta industrial fue dimensionada para la central Atucha I, la Central Embalse en construcción, la tercera ya decidida (Atucha II), y con amplias facilidades para un posterior aumento de la producción²³.

La construcción fue solventada por el presupuesto de la CNEA. El costo de la obra civil y los servicios auxiliares fue del orden de los 20 millones de dólares (Fig. 5).



Figura 5. La fábrica de combustibles CONUAR

5.1 - La constitución de la empresa de fabricación de combustibles CONUAR

Con la Fábrica de combustibles en construcción, la dirección de la CNEA eligió como responsable para coordinar las acciones de los dos proyectos PPFCN y FECN a uno de sus profesionales que había tenido una rica experiencia en el grupo de I+D de la empresa ALUAR. Estaba claro en ese entonces que la operación de la planta debía ser responsabilidad de un socio privado con experiencia industrial^{24 y 25}.

A través de un concurso público se buscó el socio industrial privado, que tendría participación mayoritaria en la futura empresa. En las condiciones del pliego se fijó que dicho socio debía ser de capital *local y de origen nacional*. La empresa VIALCO, representando a la metalúrgica TAMET, fue seleccionada. Al entrar en convocatoria de acreedores, TAMET es desestimada, y a través de una negociación onerosa es

reemplazada por la empresa EMA SA (Electromecánica Argentina), que pertenecía a SADE del Grupo Pérez Companc. Cuando se estaba formalizando el contrato se conoció que un 5% de las acciones de SADE pertenecían a General Electric (EEUU) y por lo tanto estaba inhabilitada por los pliegos. Es así que se forma la empresa PECON NUCLEAR, que pertenecía exclusivamente al Grupo Pérez Companc²⁶.

El 19 de diciembre de 1981 se creó la empresa CONUAR²⁷ por decreto del PEN N° 1.719, como sociedad anónima entre la CNEA y el holding de Pérez Companc. Se acuerda que la sociedad quede constituida con el 66,67% de las acciones en manos del socio privado y el 33,33% restante de la CNEA.

El 2 de abril de 1982 se inauguró oficialmente la planta, y a partir de entonces comienza a suministrar combustible a la CNA I, en un principio utilizando los semiterminados transferidos desde la PPFCN e importando algunos de los componentes estructurales.

En esa oportunidad, el Presidente de la CNEA, Valte. Carlos Castro Madero dijo:

"...En cumplimiento de las políticas y objetivos en materia nuclear (Dtos. PEN 3183/77 y 302/79), y bajo condiciones que aseguran el poder de decisión estatal, se decidió la constitución de una sociedad anónima, dando la participación mayoritaria a una empresa privada de capital nacional.

Esta forma posibilita que el sector privado aporte el know how de ingeniería industrial y proporcione su capacidad administrativo-financiera y de operación industrial, permitiendo a la Comisión Nacional de Energía Atómica concentrarse en sus misiones específicas que en este campo significan el desarrollo de nuevas tecnologías..."

*"...El modo de acción adoptado permite garantizar al país que tendrá el control del combustible nuclear que consume, incluyendo su costo, y que tendrá también el dominio tecnológico y, por lo tanto, la seguridad de poder continuar introduciendo en el país mejoras de diseño y nuevos desarrollos en el campo de los combustibles nucleares..."*²⁸

Por estatuto, CNEA tiene poder de veto sobre acciones comerciales de la empresa relacionadas con la compra de "know how" que se juzgen riesgosas para la pérdida del dominio de la tecnología de fabricación del combustible.

El Estatuto también establece la valoración de la maquinaria instalada como aporte de CNEA al capital accionario, así como que el 2% del facturado de la empresa debía ser utilizado como fondo para I+D.

CNEA reservó para sí la responsabilidad de la Ingeniería del Producto, la provisión de tecnología y el análisis de las desviaciones de fabricación con el derecho a la aceptación o rechazo.

El personal técnico con el cual se inició la operación de CONUAR proviene, casi en su totalidad, de la Planta Piloto (Proyecto PPFCN-A)

Las exigencias de calidad en este tipo de fabricación son máximas (Fig. 6). En ese sentido CONUAR, desde muy temprano, adoptó las normas de calidad ISO de la serie 9000, más tarde incorporó las normas ambientales ISO de la serie 14000 y últimamente



Figura 6. Fabricación de elementos combustibles tipo PHWR para la Central Nuclear Atucha I en CONUAR S.A.

las normas sobre salud ocupacional. Esta política ha permitido a la empresa la optimización del gerenciamiento, además de situarla como proveedora internacional.

Se realizaron innovaciones en el combustible Atucha I. Un hito importante, único entre los reactores nucleares a uranio natural, fue la introducción de uranio levemente enriquecido²⁹ (ULE) (Fig. 7), lo que significa una disminución del costo de generación debido en gran medida, a que el consumo de EECC se reduce a casi la mitad para producir la misma cantidad de energía. Esta modificación del diseño original fue producto de un largo trabajo de desarrollo donde tuvieron activa participación la CNEA, la propia empresa y también Nucleoeléctrica Argentina SA (NA-SA).

CONUAR se ha especializado, aprovechando la capacidad de sus máquinas herramientas y el manejo de aleaciones no convencionales, como proveedora de equipos especiales para reactores nucleares y otros usos. Ha participado en importantes suministros a las centrales argentinas y se ha convertido en un proveedor internacional de componentes muy sofisticados, no de serie, con características únicas³⁰. Para permitir estos suministros fue modificado el objetivo social de la empresa establecido en

el Estatuto. Posteriormente éste se ha vuelto a modificar para permitirle participar en el mantenimiento de centrales eléctricas como contratista principal y en proyectos de ingeniería y venta de equipos relacionados.

5.2 -El desarrollo del combustible para la central de Embalse

Al contratarse en 1974 la Central de Embalse a Canadá, la empresa proveedora AECL se comprometió - dentro del Acuerdo de Transferencia de Tecnología, firmado en esa oportunidad - a gestionar la transferencia de la tecnología de fabricación del combustible a CNEA con los fabricantes del mismo.

A poco de firmarse el Acuerdo de Transferencia de Tecnología ocurre la explosión nuclear de India. Canadá, miembro del "Club de Londres" (ver nota 19), y ante el hecho que Argentina no era signataria del Tratado de No Proliferación, limita dicho acuerdo y se considera relevada del compromiso de gestionar la transferencia de la tecnología del combustible. Dentro del concepto de autonomía tecnológica y de autosuficiencia en el suministro de combustible que regía a CNEA, se decidió avanzar con la fabricación propia del combustible Embalse en vez de resignarse a importarlo "sine die".

Por primera vez se presentó la necesidad de realizar el diseño de detalle, ingeniería de fabricación y calificación de los EECC a partir del diseño y especificaciones básicas dadas por el diseñador del reactor (AECL), sin la posibilidad de interactuar con su fabricante³¹.

Se decidió en consecuencia formular el proyecto: Suministro Combustible para Embalse (SUCOEM), estructurado en tres grandes líneas:

- Diseño de detalle y calificación, que culmina con la irradiación de 9 barras en un reactor experimental (NRX) del Canadá³².
- Desarrollo de procesos (soldadura por "brazing", "coating" de grafito, nuevo proceso de pastillado), llevados a cabo en distintas instalaciones de CNEA.
- Desarrollo, suministro, instalación y puesta en marcha del equipamiento de producción, a ser realizada directamente en las instalaciones de CONUAR.

El Proyecto SUCOEM fue estructurado con el objetivo de generar tecnología que fuera directa y exitosamente transferida a la industria.

Una parte de las tareas fueron encaradas por grupos "ad hoc" que dependían del Jefe del Proyecto y otras se atendieron en forma matricial utilizando las capacidades existentes en el Centro Atómico Constituyentes - CAC. Se hizo un contrato de suministros con la empresa INVAP para el desarrollo del equipamiento, quedando el personal afectado bajo la dependencia del Jefe del Proyecto.

Se hace necesario la contratación de personal especializado en procesos, que es buscado en la industria automotriz, así como técnicos en mantenimiento electrónico, expertos en vacío y desarrollo de máquinas. Se busca la interfase entre el personal de I+D y el dedicado al desarrollo de la línea industrial. Además se trabaja siempre en contacto con el personal técnico y operario calificado de CONUAR.

Mientras se desarrollaba este proceso se estaba poniendo en marcha la Central Nuclear Embalse y era necesario comprar el combustible a los proveedores canadienses - General Electric y Westinghouse. El celo en

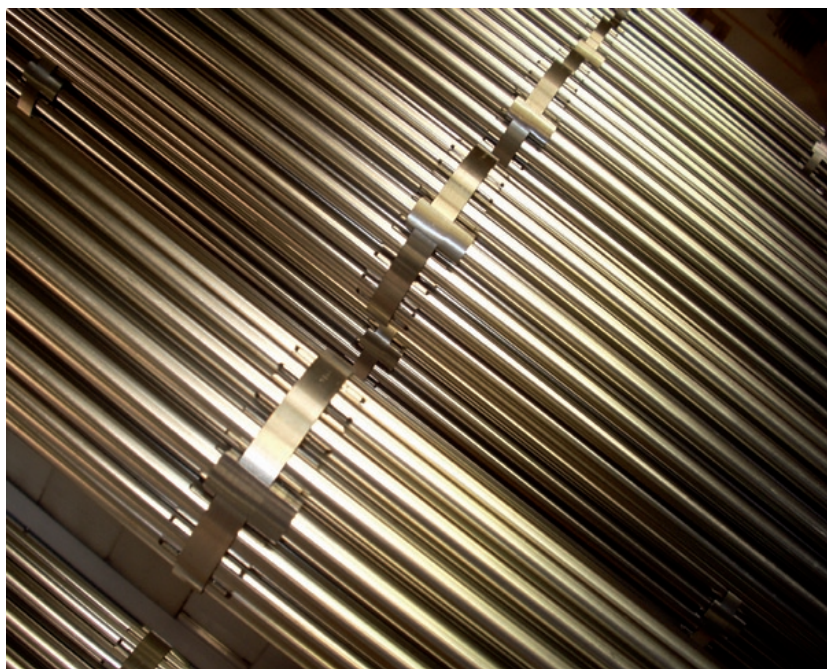


Figura 7. En Atucha I se utilizó uranio levemente enriquecido



Figura 8. La fabricación del combustible, bajo responsabilidad de la CNEA, se extendió hasta fines de 1987, reemplazando a los combustibles canadienses en la CNE.

resguardar la tecnología era tal, que el proveedor no permitía a los inspectores argentinos entrar en la fábrica para realizar las acciones de aseguramiento de la calidad. Esta actitud fue particularmente rígida en ocasión de la compra de los combustibles para el primer núcleo, pero como se verá enseguida, se fue flexibilizando en las siguientes órdenes de compra.

CNEA, hasta que pusiera en marcha su propia fábrica, debió comprar más combustibles de los que estaban previstos en el contrato de suministro de la Central. Se aprovechó entonces la oportunidad ofrecida por el ingreso de un nuevo proveedor de combustibles, Combustion Engineering (CE). Este se instala en una zona promocional para la industria, en Canadá, donde se había construido una central gemela a Embalse, para proveerle los elementos combustibles. La empresa entró en el mercado canadiense en condiciones de debilidad frente a los proveedores establecidos, ya que AECL tenía un mecanismo de fijación de precios en el que CE no fue incluido. También dependía de sus competidores para el suministro de vainas y semiterminados de Zircaloy. En ese escenario la CNEA hace un concurso para el suministro adicional mencionado y logra ventajas significativas en precio y acceso a la inspección de fabricación (negado hasta ese momento por los otros fabricantes) por parte de CE, que resulta adjudicataria,

Durante las negociaciones, los tecnólogos argentinos tuvieron oportunidad de adquirir nuevos conocimientos sobre el proceso de fabricación.

La fase final del montaje de la línea de fabricación y su puesta en marcha se llevaron a cabo directamente en CONUAR, con participación del personal técnico de la empresa. Este accionar facilitó y aceleró la posterior producción industrial. La fabricación del combustible, bajo responsabilidad de la CNEA, comienza en diciembre de 1983 y se extendió hasta fines de 1987, fabricándose en ese periodo 3000 EECC, que fueron reemplazando paulatinamente a los combustibles canadienses en la CNE (Fig. 8).

En 1988 CONUAR toma la responsabilidad de la línea de producción, fabricando en ese año 2800 combustibles, que irradiados en la CNE, completaron la serie de calificación.

Se valorizó la tecnología que se transfirió a la empresa y la CNEA recuperó su valor a través de una alícuota en el precio del combustible en los siguientes 10 años. También el valor del equipamiento instalado en CONUAR fue recuperado por CNEA en cuotas anuales durante dicho periodo.

Posteriormente CONUAR, sobre la base de la experiencia de muchos años de producción, realizó optimizaciones importantes de la tecnología de fabricación de los elementos combustibles Embalse.

5.3 - La creación de Fabrica de Aleaciones Especiales (FAE)

El origen de esta planta, dedicada a la fabricación de componentes estructurales de los combustibles, se remonta a la adquisición de la laminadora de vainas en la Unión Soviética, que llegó al país en 1972. En 1973 CNEA hizo una presentación al Consejo Federal de Inversiones (CFI) para lograr financiamiento para el desarrollo. Posteriormente hubo gestiones con el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) para trabajar en forma conjunta en el desarrollo del proceso de fabricación. Ninguna de estas iniciativas se concretó.

En 1974, la entonces Gerencia de Tecnología crea el "Programa Tecnología de Circonio y sus Aleaciones"³³, que dio origen a dos sectores. La Planta Piloto Fabricación Aleaciones Especiales (PPFAE) en el CAE, para el desarrollo de la tecnología, donde se montó en 1976 la laminadora rusa y otros equipos. El otro sector fue el proyecto de implementación industrial: la Fabrica Aleaciones Especiales (FAE)³⁴.

La decisión de completar el desarrollo de la tecnología e iniciar el proyecto industrial, se insertó en la estrategia de CNEA de llegar al dominio de todas las etapas del ciclo de combustible nuclear, pero además coincidió con la decisión del Club de Londres (ver cita 19) de declarar material sensible también al Zircaloy – la aleación a base de circonio con la cuál se fabrican los elementos estructurales.

Los autores de la cita 33 dan idea del esfuerzo que significó pasar del laboratorio a la producción industrial:

"...Contando con un grupo de personal con formación metalúrgica adecuada se pudo encontrar una cantidad importante de trabajos publicados sobre aspectos técnicos o científicos de las propiedades y características de las vainas de Zircaloy, menos importante resultó la información existente sobre la dependencia entre operaciones unitarias del proceso de fabricación y las propiedades resultantes. Casi nula resultó la información referente a la historia de fabricación relacionada con las propiedades del producto final"

El proyecto FAE implicó el diseño de la obra civil y de los servicios de

la instalación fabril, y la adquisición del equipamiento comprando más laminadoras a los soviéticos y otros equipos a Alemania. El proyecto y el posterior llamado a licitación para la construcción estuvieron enteramente a cargo de personal de CNEA, con colaboración de la empresa INVAP. Durante esta fase también se encararon desarrollos propios, como fue el horno de vacío para tratamientos térmicos, conjuntamente con INVAP que resultó finalmente el proveedor. La obra fue financiada por el presupuesto de la CNEA con un costo algo superior a los 20 millones de dólares (Fig. 9). La planta fue instalada en el CAE, en un predio lindante con CONUAR.

La tecnología fue desarrollada por PPFAE, y el personal de esta planta piloto se trasladó a las nuevas instalaciones para ponerlas a punto a escala industrial durante un periodo aproximado de 2 años. Durante este tiempo ya se suministraron componentes a CONUAR.

Los autores de la cita 33 dicen sintetizando el espíritu que alentaba a los hombres que transformaron conocimiento en tecnología: *...En resumen no es posible encontrar información industrialmente relevante (...) por lo que la búsqueda de tal información requiera capacidad científica y lo que es más importante, poseer "sentido industrial".*

...Como experiencia del desarrollo realizado queda que, en general, se puede encontrar científicos capaces,

pero unos pocos poseen por motivación y formación un sentido de análisis crítico sobre procesos industriales.

El aporte de capital de CNEA a FAE fue la tecnología, que abarcaba la laminación de las vainas partiendo de semiterminados importados (llamados "trex" – tubos de pared gruesa), así como la fundición de aleaciones de circonio³⁵. Con la empresa privada nacional se llevaron adelante experiencias de forjado y extrusión de los lingotes provenientes de la fundición. Por razones de conveniencia económicas – debido a problemas de escala - se decidió continuar con la importación del "trex". Sin embargo se puso a punto la fabricación de un semiterminado – barrotos - con los cuales se fabricaban en CONUAR componentes de los combustibles³⁶.

CNEA fue autorizada a crear la empresa FAESA por Decreto PEN N° 1088 del 30 de junio de 1986. El Decreto reflejó los conceptos rectores de la institución: autonomía tecnológica, participación de la industria privada, utilización de la tecnología nuclear capaz de generar alto valor agregado en la industria convencional a fin de diversificar la producción (llamados en este caso productos afines) a los efectos de mejorar la rentabilidad y como derrame al sistema productivo en general.

CNEA llamó a licitación pública de empresas nacionales para buscar el socio mayoritario que debía operar las instalaciones. En el proceso licitatorio

participaron dos compañías ligadas a la fabricación de tubos. Pero a la apertura de los sobres sólo se presentó una, CONUAR, lo que llevó a la creación de una sociedad anónima, FAESA, con participación accionaria del 66,7 % de CONUAR, y del 33,3 % de la CNEA.

Al igual que en CONUAR, el Estatuto estableció que la empresa privada debía ser de capital nacional y ésta no podía vender, ni parte ni todo, su capital a una empresa extranjera. Siendo CNEA minoritaria³⁷, tenía poder de veto sobre las operaciones comerciales que implicaran riesgo para la pérdida del dominio de la tecnología. Se repite el esquema establecido para CONUAR para la elección de los Directores y del Comité Ejecutivo. También se estableció en el Estatuto que el 2 % del facturado se utilizaría para I+D.

Se fijó el capital de la empresa valorizando la maquinaria instalada y la tecnología desarrollada y se lo dividió en acciones de acuerdo a la participación de los socios. La CNEA integró el capital, además, con materia prima en existencia comprada para los desarrollos y CONUAR con dinero en efectivo.

Igual que en CONUAR la empresa paga a la CNEA alquiler por el edificio, en función de las líneas de la producción demandada.

Durante la operación de la fábrica se produjeron innovaciones de proceso, de productos y organizativas. Las laminadoras rusas sufrieron sucesivas modificaciones para mejorar sus performances.

El desarrollo de la tecnología para el combustible Embalse llevó a profundizar también el conocimiento en la fabricación de vainas.

La disminución en una "pasada" de laminación de tubos durante el proceso de fabricación de las vainas³⁸, representó un ahorro importante en el costo de producción. Esta mejora del proceso se llevó a cabo con los fondos del 2% reservados para I+D bajo el marco de un acuerdo FAE-CNEA, con activa participación de la PPFAE.

Otro hito importante en la innovación fue la decisión de incorporar la fabricación de tubos de aleaciones de titanio. El dominio de la tecnología del circonio fue fundamental para poder poner a punto los procesos corres-



Figura 9. Fabrica de Aleaciones Especiales (FAE).



Figura 10. Aprovechando sus instalaciones y capacidad tecnológica, FAE se convirtió en proveedora de tubos de acero inoxidable, con y sin costura.

pondientes, y. FAE es uno de los pocos proveedores mundiales de tubos sin costura de aleaciones de titanio.

Aprovechando sus instalaciones y capacidad tecnológica, FAE se convirtió en proveedora de tubos de acero inoxidable, con y sin costura. Buena parte de su producción se coloca en el mercado externo. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de nuevas aleaciones para tubos (Fig. 10).

■ 6 - EL NACIMIENTO DE LA NA-SA

En 1994, dentro de la política de reforma del Estado, se divide la CNEA en tres organismos (Dto. PEN 1540). CNEA queda como organismo de I+D, el Ente Regulador Nuclear (hoy Autoridad Regulatoria Nuclear) asume el control de la actividad en lo referente a radioprotección, seguridad nuclear y salvaguardias, y la empresa Núcleo Eléctrica Argentina Sociedad Anónima (NA-SA) nace como operadora de las centrales nucleares y dueña de la obra en construcción de la CNA II. Esta empresa debía ser privatizada, acción que no se pudo concretar.

Bajo este nuevo paraguas institucional, los Contratos de Suministros y Fabricación de combustibles firmados entre CNEA y CONUAR, se renegociaron en 1995 con NA-SA. En este

nuevo marco CNEA mantiene solo la responsabilidad de la ingeniería del producto y el análisis de las desviaciones de fabricación. CONUAR y FAE continúan con el pago a CNEA del alquiler de los edificios.

La apertura del mercado eléctrico obligó a NA-SA a mantener costos competitivos de generación, lo que se tradujo en una continua presión sobre CONUAR para disminuir el costo del combustible³⁹.

Surgió una intensa política de reducción de los costos del “frente del ciclo de combustible nuclear”. Esto afectó a la minería del uranio, las etapas de concentración y purificación del mineral, y a la fabricación del óxido de uranio grado nuclear, actividades

que no pertenecen a las empresas en estudio. Pero también alcanzó a la fabricación del combustible en CONUAR/FAE. Este esfuerzo llevó a la disminución del costo de generación eléctrica en las dos centrales nucleares – Atucha I y Embalse⁴⁰. En lo que respecta a las fábricas, las mejoras en los costos se debieron a importantes esfuerzos tecnológicos (modificación de la tecnología de producción de los separadores de combustible para Atucha, automatización de la cadena de producción del combustible CANDU, eliminación de un paso en la laminación de las vainas en FAE, EECC levemente enriquecidos para la CNA I), y a un proceso de reingeniería de las empresas. Además impactó una



Figura 11. Segundo sumidero de calor Atucha 1.

disminución del precio internacional de algunos suministros, como el del circonio y el del uranio, lo que unido a las políticas de retiro del Estado condujo a la decisión de importar también este último.

Por otra parte, los importantes avances en la diversificación de la producción llevados adelante por las empresas, tanto para el mercado nacional (Fig. 11) como para la exportación, sumaron en forma favorable sobre los resultados.

La aparición de NA-SA aceleró la unificación técnico administrativa entre las empresas CONUAR/FAE, pero manteniéndose la independencia desde el punto de vista contable, lo que repercutió favorablemente sobre los costos fijos.

■ 7 - ¿QUE SIGNIFICÓ PARA EL PAÍS, PARA CNEA Y PARA EL SISTEMA PRODUCTIVO, LA CREACIÓN DE LAS EMPRESAS? ¿QUE PERSPECTIVAS SE PRESENTAN?

Para analizar las decisiones que se tomaron respecto a la fabricación del combustible nuclear, resulta adecuado considerar la evolución de la fortaleza de los vínculos entre los vértices del Triángulo de Sabato. Este concepto es útil por cuanto Sabato, cuando inspiró estas decisiones y fue parte de alguna de ellas, lo hizo desde la perspectiva de la "teoría del desarrollo", subyacente en el concepto del Triángulo. De esta forma se rescata el hecho de que las ideas que inspiraron las decisiones estaban basadas, al menos en parte, en considerar que el desarrollo económico-social dependía en gran medida de la tecnología. Aparece así en primer plano la circulación de la tecnología en las estructuras relacionadas con su generación, su uso en el sector productivo o social y la decisiva participación de las políticas públicas para favorecer o entorpecer esa circulación.

Cuando se toma la decisión de comprar la Central Nuclear Atucha I, CNEA había avanzado en un proceso de aprendizaje que implicó la formación de tecnólogos y la generación de tecnologías propias. Al mismo tiempo se había planteado, como objetivo, la

vinculación con el sector productivo⁴¹ para transferir los conocimientos, en el convencimiento que esto era fundamental para mejorar la competitividad industrial, además de como parte de un proceso de aprendizaje interactivo. Es decir que uno de los lados del triángulo- la vinculación entre los Organismos de CyT y el sector productivo – ya tenía existencia real.

Haber logrado en 1965 mostrar al Poder Ejecutivo la oportunidad de comprar Atucha I, fundamentando la decisión en razones tecnológicas y probando al mismo tiempo su competitividad, muestra que la vinculación entre otros dos vértices del triángulo funcionaba: la relación entre los Organismos de CyT y el Gobierno.

El pensamiento político económico imperante en aquel momento – el desarrollismo – favorecía este tipo de decisiones, pero de ninguna manera le quita mérito a los directivos de la CNEA por haber aprovechado esta coyuntura. En realidad había otros valores incorporados en la decisión que demuestra el convencimiento de llevar adelante el proyecto: la confianza en las capacidades propias, la fortaleza de gestión en materia internacional y la seguridad de que la industria nacional iba a acompañar.

Los directivos de la CNEA decidieron en ese momento que era fundamental dar un salto en la calidad y en la magnitud de los problemas que el organismo debía afrontar⁴². Ya se había recorrido el camino del diseño y construcción de los reactores de investigación y de sus combustibles, se habían formado tecnólogos, se habían establecidos los vínculos con la industria. La energía nuclear parecía tener un inmenso futuro y los países que la adoptaran como fuente de generación eléctrica, se beneficiarían con el derrame sobre el sector industrial, que se volvería más competitivo al convertirse en proveedor de insumos con tecnología sofisticada incorporada.

Los contratos que se gestionaron con el sector privado nacional durante la construcción de Atucha I, fueron favorecidos por créditos de la banca pública y por la política impositiva, para lo cual se legisló en la búsqueda de incentivos para la industria nacional (Ley Compre Nacional N° 18.875).

Algunas empresas que participaron de los suministros de Atucha y posteriormente de Embalse, se convirtieron, luego, en proveedores internacionales de grandes componentes⁴³, lo que demuestra el carácter de "industria industrializante" que se le atribuía a la actividad nuclear. El apoyo del Estado a la obra y las políticas para incentivar al sector privado demuestran que el otro lado del triángulo estaba fuertemente establecido: la vinculación del gobierno con el sector productivo.

La compra de Atucha I trajo aparejada la decisión de la fabricación nacional del combustible, íntimamente ligada al proyecto de desarrollo industrial y autonomía energética liderado por la institución. En este marco, la creación de las empresas mixtas para producirlos, no dependía solo de la voluntad de la CNEA y de la de los privados interesados: fue necesaria la autorización del PEN. La empresa privada apostó a la fabricación del combustible porque había un plan nuclear que le garantizaba continuidad en el negocio. Dicho plan nuclear no era de CNEA sino del gobierno. Esto muestra que, incluso en los inicios de las políticas neoliberales a partir de 1976, paradójicamente existían sectores del Gobierno y del sector productivo que buscaban transferir conocimiento tecnológico estratégico, de carácter endógeno, a la industria nacional⁴⁴.

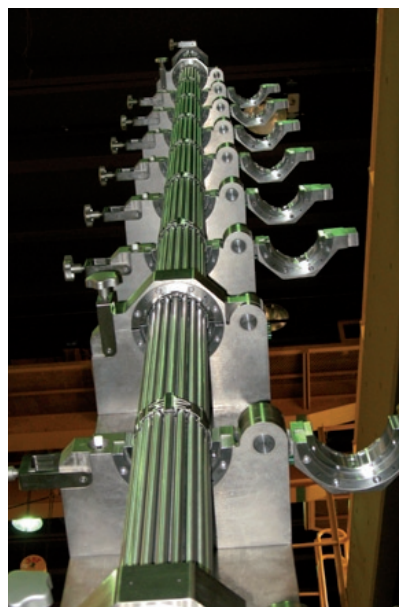
Es larga y compleja la historia del sector nuclear desde la creación de CONUAR/FAE hasta nuestros días y no se la analizará en detalle. Pero: ¿Cuál es hoy la situación de las fábricas de combustibles nucleares?

Es evidente que la reactivación del plan nuclear anunciada por el PEN en agosto de 2006 repercute directamente sobre el futuro de estas plantas. En apretada síntesis los desafíos inmediatos son los siguientes:

- Mejorar la calidad a fin de minimizar fallas en los combustibles.
- Enfrentar el cambio de escala frente a la introducción de la línea de producción para Atucha II, (Fig. 12), y de las futuras centrales en análisis por la Secretaría de Energía.
- Minimizar los costos de producción compatiblemente con el cambio de escala.
- Continuar con la política de expan-



Figura 12. Atucha II. Primer carga.



sión hacia los mercados internos e internacionales. Particularmente se abre una oportunidad, como proveedora de componentes especiales, frente a la reactivación a nivel global de la producción de energía eléctrica de origen nuclear⁴⁵ (Fig. 13).



Figura 13. Contenedores para materiales irradiados.

- Profundizar el desarrollo y fabricación de combustibles para reactores de investigación. Argentina es de los pocos productores mundiales, hecho que además consolida su competitividad en la exportación de este tipo de instalaciones.

La competitividad del sector núcleo eléctrico depende de muchos factores. Pero en un país como la Argentina, donde todavía el futuro no está del

todo definido, la participación del Estado en la definición de un plan estratégico para el área nuclear es clave. Y es así en la mayoría de los países que han optado por la núcleo electricidad.

Hoy pareciera que las decisiones que se tomaron en la década de '60 fueron acertadas. Es claro que el sector núcleo eléctrico está entrando de nuevo en un período de crecimiento. ¿Podrá la Argentina capitalizar su experiencia para maximizar el aprovechamiento de las inversiones en el mercado interno y salir a competir a nivel internacional?

■ 8 - ¿CUÁL FUE LA SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA?

Se puede decir que la satisfacción de la demanda para la cual fueron creadas las empresas fue exitosa. Las centrales nucleares, desde que las fábricas comenzaron a producir, fueron provistas en forma continua por CONUAR⁴⁶, aun en los casos que se presentaron "fallas epidémicas"⁴⁷ – fallas sistemáticas del combustible que afectan a una cantidad considerable de los que operan en el reactor- las que fueron resueltas entre CNEA y CONUAR/FAE, con la importante comprensión de la Dirección de las centrales nucleares para aceptar modificaciones en los es-

quemados de recambio de combustible y estrategias de intervención del personal de mantenimiento y operación a fin de mantenerse dentro de los valores aceptados de dosis de exposición.

Respecto a la tasa de falla de los combustibles, se han alcanzado, para Embalse, los valores de proveedoras internacionales (General Electric y Zirca-tek). Respecto al combustible Atucha, es muy difícil comparar, aunque las tasas normales de falla son superiores a la de los combustibles de las centrales nucleares más difundidas – tipo PWR. Sin embargo se pueden encontrar elementos que explican este hecho.

Los costos del combustible fueron disminuyendo, a pesar de que las expectativas de volumen de fabricación no se cumplieron. Hoy para el combustible Embalse se ha alcanzado un precio cercano al internacional, y si hay alguna diferencia se debe a un factor de escala. Para Atucha I los valores son muy difíciles de comparar con valores internacionales, debido a que es un diseño único. Pero sí se puede decir que el precio del Kwh de la Central es competitivo.

CONUAR y FAE han participado como proveedores de componentes especiales para las centrales argentinas; sin estas empresas, esos suministros deberían haberse importado. Además están exportando componentes nucleares y no nucleares de alto valor

agregado, aportando divisas al país.

Más allá del suministro de combustible, las empresas tienen posibilidades de producir en una franja muy especializada, fundamentalmente para el exterior, debido a su tamaño y versatilidad. Esto se debe a la capacidad propia y a la del socio CNEA para adaptarse a la demanda de requerimientos sofisticados, que empresas de mayores dimensiones no pueden atender⁴⁸ (Fig. 14).

La participación societaria de CNEA en CONUAR/FAE le ha reportado también beneficios económicos provenientes del reparto de dividendos. A título ilustrativo, en el año 2006 esos ingresos fueron de 3,6 millones de pesos (sin incluir los montos percibidos en concepto de alquiler de los edificios), que significaron el 20% de los recursos propios recaudados por el organismo. En dicho año, el fisco percibió ingresos de 13,4 millones de pesos en concepto de impuesto a las ganancias, correspondiendo al 9,4% de los aportes que el Tesoro Nacional hizo al presupuesto de CNEA.

9 - CONCLUSIONES

La CNEA ha provisto de combustible para reactores de investigación y tiene capacidad para seguir haciéndolo con las tecnologías de vanguardia, para todas las exportaciones que el país ha realizado.

Respecto a los combustibles de potencia, el caso estudiado evidenció que las empresas mixtas entre el Estado y la actividad privada funcionaron de acuerdo a los objetivos de su creación.

Uno de los aspectos fundamentales de esta sociedad fue la posibilidad de concretar en hechos comerciales los desarrollos tecnológicos – sin comercialización no hay tecnología – Después de más de 25 de años de creación de la empresa CONUAR, esta lógica de funcionamiento sigue abierta frente al renacer de la actividad nuclear.

Los proyectos de desarrollo de la tecnología para las dos líneas de combustible – Atucha y Embalse – tuvieron el objetivo sistemático de incorporar la industria nacional. Se negoció sa-

tisfactoriamente con los proveedores internacionales de tecnología a pesar de hechos externos que perturbaron las relaciones. Se buscó y se supo incorporar el conocimiento codificado al patrimonio de la institución y el tácito de la industria argentina. Se realizaron las evaluaciones económico-técnicas para fabricar en el país los insumos estratégicos e importar aquellos para los cuales, por distintas razones, no se justificaba su producción nacional. Pero en la base de la decisión de fabricar el combustible nacional, estaba el Plan Nuclear institucional, el cual tenía como un objetivo clave el desarrollo tecnológico argentino utilizando como instrumento el uso comercial de la energía nuclear.

Se quiere una vez más dejar constancia que el desarrollo de tecnología no obedece a un proceso lineal. Que la decisión primaria de aplicar el conocimiento en una actividad socio-productiva es fundamental para llegar al dominio del “know how” para producir industrialmente. Y en este caso, el hecho de contar con una

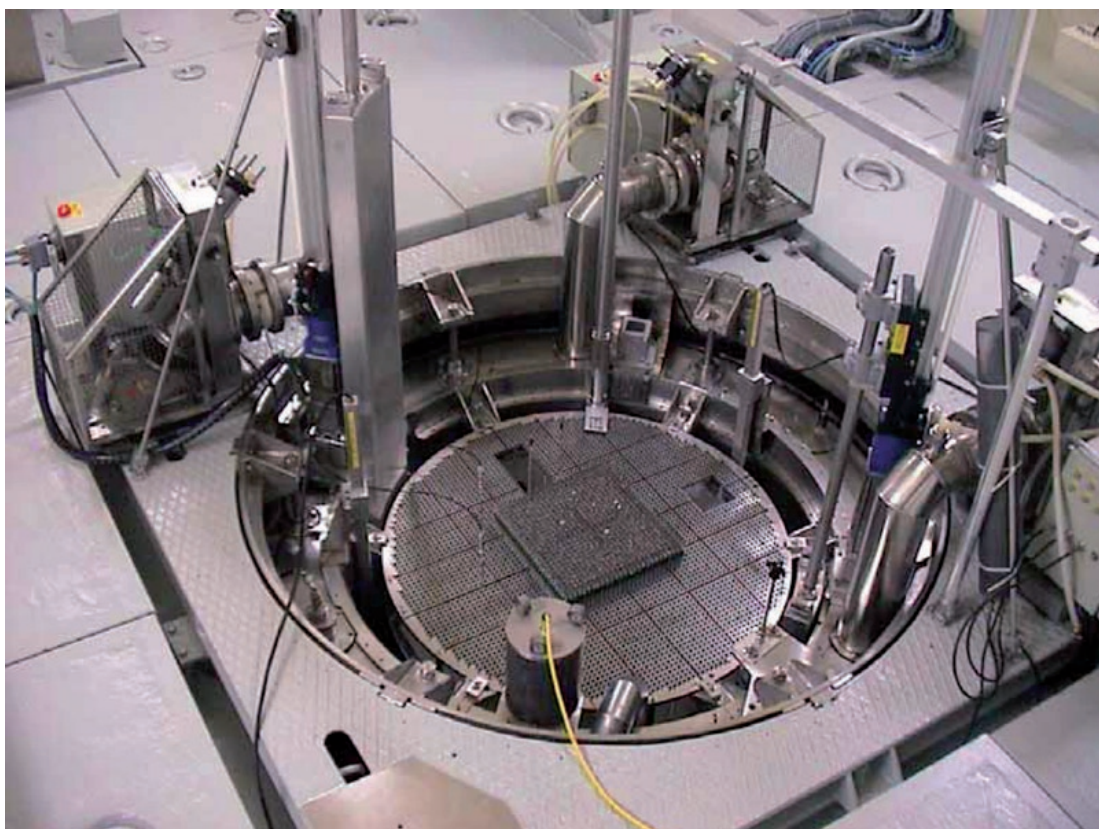


Figura 14. Más allá del suministro de combustible, las empresas tienen posibilidades de producir en una franja muy especializada, fundamentalmente para el exterior, debido a su tamaño y versatilidad.

empresa mixta fue una herramienta importante.

Por otra parte, cabe preguntarse: ¿el suministro del combustible a las centrales se habría podido mantener durante la etapa de retiro del Estado, en tiempo y forma, si estas empresas no hubieran estado gerenciadas por la actividad privada? Se hace mención, también, que las empresas nunca recibieron subsidio del Estado. Más aun, hicieron su aporte al financiamiento de la actividad nuclear, además del ahorro y generación de divisas que representa esta producción nacional para el país.

Teniendo en cuenta el nuevo momento económico social por el que está pasando la Nación, revisar a fondo la experiencia de este tipo de sociedades se convierte en un desafío importante. A nivel mundial, y particularmente en Argentina, los acuerdos comerciales-industriales entre los organismos públicos de CyT y la empresa privada a fin de generar conocimiento, productos y servicios de alto valor agregado, son realidades y materia de estudio al más alto nivel.

También es importante aclarar que no todo lo que se hizo obedeció a políticas claramente establecidas. Cabe preguntarse: ¿El estancamiento de la actividad repercutió sobre el compromiso de las autoridades de la CNEA? ¿Las estrategias seguidas, en el mediano y largo plazo, permitieron perfeccionar proyectos innovativos con el sector privado? En este marco ¿cuál fue la capacidad de gestión para el seguimiento del funcionamiento de las empresas?

Para el sector empresario el incentivo suele ser aumentar el negocio y no sólo la presión por bajar costos. La detención del programa nuclear en los 90 estancó la demanda de los EECC. Esto no estimuló la innovación en los procesos y de no revertirse la tendencia, podría finalmente conspirar contra la calidad. La empresa, para invertir en I+D, tiene que tener un programa de crecimiento relativamente asegurado que le permita cuantificar el riesgo.

La metáfora de la bicicleta: “para que no se caiga tiene que moverse”, se puede aplicar en este caso. El estancamiento sufrido en la demanda de conocimiento y nuevas tecnologías

repercutió negativamente en la formación de cuadros de la CNEA y quitó dinamismo a la actividad industrial. El relanzamiento de la actividad está actualmente revirtiendo esta situación y trayendo aires nuevos.

■ AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la valiosa predisposición a compartir sus experiencias personales y el tiempo dedicado a la revisión y comentarios por parte de Juan Carlos Almagro, Juan Bergallo, Carlos Biondo, Edgardo Bisogni, Maria Fernanda Cerivio Pinho, Roberto Cirimello, Alfredo Hey, Helmut Koll, Adolfo Marajovsky, Raúl Olezza, Roberto Ornstein, Benigno Ransemberg y Mónica Sbaffoni.

■ GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

- AECL: Atomic Energy of Canada Limited
- CAC: Centro Atómico Constituyente, CNEA, Pcia de Buenos Aires
- CAE: Centro Atómico Ezeiza, CNEA, Pcia de Buenos Aires
- CNA I: Central Nuclear Atucha I, NA-SA, Lima, Pcia de Buenos Aires
- CNA II: Central Nuclear Atucha II (en construcción) NA-SA, Lima, Pcia de Buenos Aires.
- CANDU: Central nuclear de diseño canadiense (CANada Deuterium Uranium)
- CNE: Central Nuclear Embalse, NA-SA, Embalse, Pcia de Córdoba
- CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica.
- CONUAR: Combustible Nucleares Argentinos SA, CAE.
- EECC: elementos combustibles
- FAE: Fabrica de Aleaciones Especiales SA, CAE
- NA-SA: Nucleoeléctrica Argentina SA, operadora de las centrales y constructora de la CNA II.

■ GLOSARIO TÉCNICO

Celda caliente: Instalación estanca y con blindaje contra la radiación para la manipulación y procesamiento de material radiactivo, empleando

telemanipuladores. El operador mira dentro de la celda caliente a través de una “ventana de plomo”, que es un vidrio transparente enriquecido con sales de plomo que sirven para aumentar su poder blindante. Se utiliza, por ejemplo, para separar y encapsular los radioisótopos producidos en un reactor de producción, para estudiar el comportamiento de los elementos combustibles irradiados.

Componente estructural: componente del elemento combustible de un reactor de potencia.

Conjunto crítico: Instalación experimental similar a un reactor experimental pero de potencia nula o despreciable, por lo que suele llamárselo de “potencia cero”. Utilizado para estudiar configuraciones de reactores, mediciones físicas y para enseñanza.

Elemento combustible: componente del núcleo de un reactor nuclear que contiene el material fisionable. En los reactores de generación nucleoelectrica el material fisionable es el cerámico óxido de uranio (por lo general uranio natural o enriquecido - hasta un máximo de 5% en el isótopo 235). El óxido de uranio se configura en forma de “pastillas” de típicamente un centímetro de diámetro y un centímetro de altura. Las pastillas están contenidas en un tubo de extremos sellados por “tapones” soldados, llamado “vaina”, cuya longitud depende del tipo de central y puede variar entre unos 50 cm y 6 metros; la vaina con las pastillas es denominada “barra combustible”. El elemento combustible está formado por un ramillete de entre 37 (caso de las centrales argentinas) y casi 400 (en algunas centrales PWR, que son de uranio enriquecido) barras combustibles, en disposición cilíndrica (caso argentino) o rectangular. El conjunto de barras debe permitir la circulación entre las mismas del refrigerante, y para lograrlo y otorgarle solidez estructural se colocan los “separadores” (entre 3 y casi 15 según la longitud del combustible), dispositivos que sujetan las barras en su posición y permiten su desplazamiento longitudinal para acomodar las dilataciones que puedan sufrir durante la operación, dejando pasar, al mismo tiempo, entre las barras combustibles el refrigerante. Los elementos combustibles tienen otros

componentes estructurales, para permitir por ejemplo su ingreso y salida del reactor, o para permitir el desplazamiento de las barras en la zona en que están en contacto con los separadores. Sus condiciones de diseño deben contemplar la presión, la temperatura y las vibraciones generadas por el intenso flujo de refrigerante. En los reactores de investigación los elementos combustibles suelen tener geometría plana. Suelen estar constituidos por "cajas" conteniendo placas, a través de las cuales circula el refrigerante. Las placas contienen un núcleo plano de material fisionable (algún compuesto de uranio enriquecido hasta el 90% en uranio 235; en los reactores argentinos el enriquecimiento máximo es del 20%), contenido herméticamente entre placas metálicas.

Enriquecimiento: El uranio existente en la naturaleza ("uranio natural") contiene sólo 0,71% del isótopo 235, que es el único fisionable en los llamados "reactores térmicos" que constituyen la gran mayoría de los existentes en el mundo. Se denomina "enriquecimiento" al proceso por el cual se aumenta el contenido del isótopo 235 en el uranio natural. Los reactores de investigación y producción de radioisótopos utilizan uranio enriquecido entre el 20% y 90% del isótopo 235.

Esquema de recambio: en los reactores nucleares el combustible debe ser cambiado mediante esquemas que dependen de su diseño. El esquema puede tanto implicar el retiro de un elemento combustible del reactor y su reemplazo por uno "fresco", como su colocación en una nueva posición dentro del núcleo. En las centrales nucleares argentinas se realiza una operación de uno de estos tipos en forma casi diaria, mientras el reactor sigue operando; en centrales nucleares de otro diseño, como por ejemplo PWR, se detiene la central cada uno o dos años para reconfigurar el núcleo, extrayendo algunos combustibles y modificando la posición de otros (por lo general se recambia un tercio o menos de los combustibles del núcleo).

Extrusión: proceso usado para crear objetos con sección transversal definida. El material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada.

Falla de combustible: Se considera que un combustible está "fallado" cuando, durante su operación, se aparta de las condiciones de diseño. Ejemplos de fallas pueden ser el desplazamiento fuera de lo normal de un elemento estructural, la liberación hacia el refrigerante de productos de fisión.

Forjado: procesamiento de piezas metálicas por la aplicación de temperatura y presiones, sea con una prensa o con martillos. Permite dar forma y mejorar las propiedades.

Grado nuclear: se refiere al grado de pureza y/o de calidad de un material o componente a ser utilizado en la industria nuclear. Está determinado por normativas específicas.

Material fisionable: material en el cual los núcleos de los átomos se "fisionan" por interacción con neutrones, dando lugar a núcleos de dos elementos más livianos (los "productos de fisión"), nuevos neutrones (que mantienen la "reacción en cadena") y liberación de energía. Los elementos fisionables son el uranio y el plutonio, y en forma indirecta el torio

Núcleo: parte del reactor nuclear donde se produce la reacción de fisión del material fisionable, contenido en el combustible.

Pruebas en frío: conjunto de ensayos que se realizan antes del inicio de operación de un reactor nuclear para verificar el funcionamiento de sus sistemas, sin que se produzcan fisiones y, por lo tanto, sin generación de energía (de allí el nombre de "frío").

RA-0, 1, ...: los conjuntos críticos y reactores experimentales y de producción de radioisótopos argentinos se denominan RA-N, donde RA significa reactor argentino y N indica su orden cronológico. Se incluyen en la denominación proyectos no concretados. Se construyeron los conjuntos críticos RA-0, RA-2 (actualmente desmantelado) y RA-8, y los reactores RA-1, RA-3, RA-4 y RA-6. Se encuentra en etapa de diseño el RA-10 para producción de radioisótopos.

Reactor: En una central nucleoelectrónica el reactor es la contención física del núcleo más un conjunto de accesorios. La energía generada por la fisión calienta al refrigerante a alta presión y temperatura dentro del reactor, cumpliendo en cierta forma la función de

"caldera". El refrigerante a través de generadores de vapor y un turbogruppo, genera electricidad.

Salvaguardias: Conjunto de procedimientos, métodos y técnicas destinado a verificar el uso exclusivamente pacífico de las actividades nucleares

Separador: componente del elemento combustible de un reactor de potencia.

Tratamiento térmico: proceso por el cual se lleva un metal a temperatura determinada durante tiempos fijados, a fin de mejorar sus propiedades tales como dureza, resistencia, tenacidad, etc.

Vaina: componente del elemento combustible de un reactor de potencia. Las vainas contienen la "columna" de pastillas cerámicas de óxido de uranio. Son tubos de paredes delgadas que deben soportar altas temperatura y presión, un fuerte campo de radiación y favorecer el intercambio de calor. Además deben ser permeables a los neutrones (lo contrario a venenos neutrónicos).

Venenos neutrónicos: Son materiales que tienen capacidad de absorber neutrones.

■ NOTAS AL PIE

¹Sabato J.A.: "Atomic Energy in Argentina: a case history", World Development Vol.1, N°8, 1973.

²Harriague S., Sbaiffoni M., Spivak L'Hoste A., Quilici D., Martinez Demarco S.: "Desarrollo tecnológico en un contexto internacional dinámico: los reactores nucleares de investigación argentinos a lo largo de medio siglo", ESOCITE 2008, Río de Janeiro, 2008.

³"Enfocada como un proceso político consciente, la acción de insertar la ciencia y la tecnología en la trama misma del desarrollo significa saber dónde y cómo innovar. La experiencia histórica demuestra que este proceso político constituye el resultado de la acción múltiple y coordinada de tres elementos fundamentales en el desarrollo de las sociedades contemporáneas: el gobierno, la estructura productiva y la infraestructura científica tecnológica. Podemos imaginar que entre estos tres elementos se establece un sistema de relaciones que se representaría por la figura geométrica de un triángulo, en donde cada uno de ellos ocuparía sus vértices respectivos". Sabato J. Botana N. "La ciencia y la tecnología en el desarrollo de América Latina". Tiempos Latinoamericanos, Ediciones Universitarias, Sgo. de Chile, 1970.

⁴Martínez Vidal C, Mari M. Revista Iberoamericana Ciencia, Tecnología, Sociedad e

- Innovación. N° 4, Sep-Dic. 2002.
- ⁵Hurtado D.: "Autonomy, even regional hegemony: Argentina and the "hard way" toward its first research reactor (1945-1958)", *Science in Context* Vol.18, N° 2, 2005.
- ⁶Kittl J.E., Machado R.E., Mazza J.A., Sabato J.A. y Silbert I.: "Elaboración de elementos combustibles tipo Argonaut", *Proceedings 2nd International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, P/1585, IAEA, Ginebra, 1958.
- ⁷Se vende a la empresa Degussa-Leybold (1958).
- ⁸F. Briozzo, S. Harriague y M.M Sbaiffoni: "A 40 años de la inauguración del RA•3: anécdotas, historias y algunas enseñanzas", *Revista de la Comisión Nacional de Energía Atómica*, Año 8, N° 27 / 28, 2008.
- ⁹Aráoz C., Martínez Vidal C., Mazza J., Morando R., Sabato J. y Wortman O.: "Fabricación de elementos combustibles para reactores de investigación", *Proceedings 3rd International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, P/837, IAEA, Ginebra, 1963.
- ¹⁰Las centrales de potencia son las diseñadas para producir energía eléctrica.
- ¹¹La línea a uranio natural se consolida con la compra de la segunda central nuclear, Embalse. Esta línea no era la más difundida a nivel mundial. Las otras líneas comerciales utilizaban uranio enriquecido.
- ¹²M.Rougier y J.Schvarzer: "Las grandes empresas no mueren de pie: El (o) caso de SIAM", Grupo Editorial Norma, Buenos Aires, 2006.
- ¹³No solo se encaró la metalurgia del circonio, sino también el desarrollo industrial de la producción de "agua pesada", otro de los insumos críticos de estos reactores.
- ¹⁴Como dato anecdótico se cita que se conserva el "memo" que J.C. Almagro le entrega a J.Sabato antes del viaje, y la repuesta de éste a su regreso.
- ¹⁵Uno de estos expertos fue el Dr. Rudolf Hess, enviado por OIEA en el área de planificación y ensayos en Loop.
- ¹⁶Biondo C. "El mercado mundial de EECC y la inserción de la Argentina en el mismo". *Revista Nuclear* N° 13, 1983.
- ¹⁷Uno de los dos primeros EECC ingresados a la Central falló, lo que obviamente generó polémica. Sin embargo la idiosincrasia de los tecnólogos era conciente de la necesidad de "aprender haciendo" y "tomar riesgos" y en consecuencia se siguió adelante. Las tasas de fallas resultantes al final del servicio de los 234 EECC resultaron compatibles con las verificadas en los EECC de origen RBU:
- ¹⁸Biondo C. Koll . Propuesta de Proyecto PPFECN-A. D-CN-03. CNEA, 06-08-76.
- ¹⁹Se considera "sensitiva" a la tecnología, equipos y materiales que pueden utilizarse para el desarrollo de explosivos nucleares.
- ²⁰Actualmente Nuclear Suppliers Group (NSG), creado en Londres en 1974 por los países proveedores de tecnología nuclear luego de la explosión nuclear de India en mayo de dicho año. Su objetivo es impedir la proliferación de armas nucleares mediante la imposición de exigencias a la exportación de tecnología sensitiva más allá de las demandadas por OIEA.
- ²¹Biondo C. "Costos del Desarrollo de la Tecnología de Fabricación y Control del EC ATUCHA I. Informe de la Gerencia de Desarrollo del 18-02-1982.
- ²²Pocos equipos fueron adquiridos especialmente para la planta industrial (FECN), por ejemplo los hornos de sinterizado.
- ²³Con el decreto PEN N° 302/79 se decide la instalación de cuatro centrales más, que debían entrar en operación antes del año 2000, la primera de ellas sería Atucha II.
- ²⁴Sabato había dejado este legado. Él consideraba que la CNEA debía concentrar su actividad en el desarrollo y en la optimización de los procesos industriales. El concepto del "socio tecnológico". *Revista Ciencia Nueva*, N°1, 1970. Y la frustrada experiencia de SIAM lo demuestra.
- ²⁵El Dr. Bisogni es el jefe elegido por el presidente de la CNEA para organizar la empresa con el mandato de formar una sociedad mixta con mayoría privada.
- ²⁶Ing. Roberto Cirimello y Dr. Bisogni. Comunicación personal.
- ²⁷El acrónimo CONUAR – Combustibles Nucleares Argentinos – es idea del Dr. Bisogni, que se inspiró en ALUAR – Aluminio Argentino.
- ²⁸Revista "CNEA informa", Año III, N° 9, Abril 1982.
- ²⁹El uranio levemente enriquecido tiene el 0,85 % del isótopo U-235. El uranio natural tiene el 0,72 % de este isótopo y los denominados Reactores a Uranio Enriquecido, los mas difundidos, están alimentados con un combustible enriquecido entre el 3 y el 5 %.
- ³⁰Por ejemplo: barras de control de reactividad para la producción de cobalto 60 utilizadas en la CNE y fabricación de contenedores de transferencia de materiales radiactivos para AECL de Canadá.
- ³¹Cirimello R. Olezza R. "Suministro de elementos combustibles para la Central Nuclear de Embalse de la Argentina". *Interacción Universidad Empresa en el MERCOSUR: Desafíos y Perspectivas*. Florianópolis – Brasil, 1997.
- ³²Esto fue posible gracias al Acuerdo de Transferencia de Tecnología (ATT) firmado durante las negociaciones para la adjudicación de la CNE.
- ³³Este programa estuvo a cargo del Ing. Jorge Kittl.
- ³⁴J. C. Almagro, J. Kilt, "Manufacture of sheaths for fuel elements", *International Seminar on Heavy Water Reactor Fuel Technology*, SC de Bariloche, 1983.
- ³⁵La empresa INVAP tuvo un contrato de la CNEA para el desarrollo de la tecnología para la obtención de la "esponja de circonio" a partir del mineral. La esponja es la materia prima para la fabricación de lingotes utilizando el horno de arco en vacío instalado en FAE. Pero este proceso no se llevó a escala comercial.
- ³⁶Los separadores de los EECC para la CNA I.
- ³⁷CNEA es relativamente minoritaria, porque sumando las acciones que tiene en CONUAR suma aproximadamente el 55% del capital.
- ³⁸Partiendo del "trex" para llegar a las vainas se necesitaban 4 "pasadas" por las maquinas laminadoras, la mejora de proceso llevó a que se pudieran fabricar sólo con 3 "pasadas".
- ³⁹El contrato original era a costo abierto. A partir de ahora se establece a costo fijo.
- ⁴⁰Cirimello R. Barceló G. Bergallo J. "Planificación industrial del Ciclo de Combustible Nuclear con miras a la competitividad en el Mercado Eléctrico Mayorista". *Asociación Argentina de Tecnología Nuclear*. 1994
- ⁴¹La creación en 1962 del SATI (Servicio de Asistencia Técnico a la Industria) fue concebida con ese fin. La vinculación entre los Organismos Públicos de C&T y el sector productivo, para asistencia técnica y transferencia de tecnología, era en aquella época todavía novedosa.
- ⁴²Se planteó en el seno de la Institución la oportunidad de comprar una central llave en mano o intentar un desarrollo propio de una central de potencia.
- ⁴³Por ejemplo, Industrias Metalúrgicas Pescarmona SA (IMPESA), Techint
- ⁴⁴D.Hurtado, 2009: "Periferia y fronteras tecnológicas. Energía nuclear y dictadura militar en la Argentina (1976-1983)", *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, Vol.5, N°13.
- ⁴⁵CONUAR se ha calificado como proveedora internacional de componentes para las centrales CANDU. Además, los productos de titanio, en especial los tubos, han gatillado procesos de calificación como proveedora de la industria aeronáutica internacional, y se está desarrollando la tecnología de producción de tubos de aleaciones especiales para generadores de vapor.
- ⁴⁶Salvo una excepción en la CNE que se utilizó combustible canadiense, después de que comenzó a proveer CONUAR.
- ⁴⁷En 33 años de operación de Atucha I se produjeron dos epidemias de fallas de combustible y en 23 de Embalse, una. Las mismas tuvieron causas similares a las ocurridas en muchos otros reactores del mundo y fueron solucionadas en tiempo y forma según los estándares internacionales y con la intervención oportuna de la Autoridad Regulatoria Nuclear cuando fue necesario.
- ⁴⁸Esta ventaja comparativa ya fue expresada en el discurso de Castro Madero en el acto de inauguración de la empresa CONUAR (ya citado en 27).

60 años de creación de la Comisión Nacional de Energía Atómica

El 31 de mayo de 1950, se creaba la Comisión Nacional de Energía Atómica como organismo autárquico. A lo largo de sus 60 años de existencia, CNEA se transformó en el emblema de las posibilidades de Argentina como país poseedor de tecnologías altamente sofisticadas incorporadas a la producción de bienes y servicios. Sus logros forman parte del imaginario colectivo sobre un país moderno, dinámico y con grandes realizaciones que van más allá de las meras potencialidades.

ALGUNOS HITOS TECNOLÓGICOS DE CNEA MUESTRAN:

- El diseño, la construcción y la puesta en operación del primer reactor nuclear de investigación de América Latina y la producción de su combustible con tecnología propia.
- La instalación de la primera Central Nucleoeléctrica de América Latina, de tecnología alemana, la Central Nuclear Atucha I, del tipo de reactor presurizado de agua pesada (PHWR) y uranio natural como combustible, con alta participación en la industria nacional. La participación en el programa de conversión de su combustible de uranio natural a uranio levemente enriquecido de 0,85% de U235, completada por Nucleoeléctrica Argentina S.A. en el año 2000. Es de mencionar que este hito en el área de los reactores de agua pesada mereció el premio de la organización INTERCIENCIA en el año 2004, a través de la propuesta de nuestra asociación, la AAPC.
- El diseño, desarrollo e inicio de construcción del prototipo de la central nuclear CAREM, de tecnología nacional.
- La primera exportación Sur-Sur de tecnología nuclear en gran escala, con la construcción de un reactor y centro nuclear en Perú. El soporte científico-tecnológico en las exportaciones de reactores de investigación concretadas por INVAP S.E. a Argelia, Egipto y Australia.

- El dominio de las etapas del ciclo de combustible: prospección, exploración y explotación de minas de uranio; transformación del mineral en yellow cake, la materia prima para la fabricación de combustibles nucleares; transformación de la yellow cake en UO₂ adecuado para la fabricación de pastillas de elementos combustibles; la fabricación de elementos combustibles completos para Centrales Nucleares de tipo Atucha y Embalse, y en esta última el desarrollo de la ingeniería de producto y proceso de su combustible; el dominio de la tecnología de enriquecimiento de uranio; el desarrollo y fabricación de combustibles avanzados para reactores de investigación.
- Desarrollo de la metalurgia. La metalurgia en América Latina nació con Jorge Sabato y sus tareas que llevaron, entre otras cosas, a dominar la tecnología de obtención de circonio y de fabricación de sus aleaciones en formas aptas para los combustibles nucleares y componentes estructurales de las centrales.
- Impulso de la Geología Argentina. Son muchos los geólogos argentinos que participaron en las tareas de relevamiento, prospección y exploración minera.
- La incubación de empresas tecnológicas que llevaron adelante diversos aspectos de la tecnología nuclear: CONUAR S.A., DIOXITEK S.A., ENSI S.E., FAE S.A., INVAP S.E.,. Los logros de estas empresas constituyen un capítulo en sí mismo en la historia de la tecnología nuclear en Argentina, y representan acabadamente qué es lo que Argentina puede hacer en desarrollos tecnológicos.
- Desarrollo de las tecnologías y los laboratorios de estudios no destructivos para caracterizar diversos materiales y componentes.
- Desarrollos en Medicina Nuclear: producción de radioisótopos, métodos de diagnóstico por imágenes (como el tomógrafo PET), terapias como la basada en la Captura Neutrónica por Boro (BNCT).
- Desarrollo y construcción de paneles solares para los satélites argentinos.
- Implementación de criterios de protec-

ción ambiental en todos sus emprendimientos.

- El permanente compromiso con las aplicaciones exclusivamente pacíficas de la energía nuclear.

ALGUNOS HITOS DE LOGROS CIENTÍFICOS DE CNEA SON:

- Presentación en la Primera Conferencia Internacional de Átomos para la Paz, 1955, de 13 nuevos radioisótopos descubiertos en los laboratorios de CNEA.
- Impulso de la Física Experimental y Teórica. Resulta imposible pensar en esta disciplina sin el aporte de los científicos de CNEA, tanto en el área metropolitana Buenos Aires como en Bariloche.
- Desarrollo de la Radiobiología, incluyendo su impacto en los criterios de protección ambiental.
- Desarrollo de la Química del Agua como fluido de proceso y a partir de allí toda la química de las dispersiones coloidales acuosas.
- Desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología, tanto en el Centro Atómico Constituyentes como en el Centro Atómico Bariloche.

En el campo de la formación de recursos humanos, algunos de los logros argentinos más destacados son también fruto de CNEA. El sistema de Institutos de CNEA tiene en la actualidad tres pilares, el Instituto Balseiro (el más antiguo y tradicional, con fuerte reconocimiento internacional, dedicado a las ciencias físicas y a la ingeniería, en su más amplia acepción), el Instituto Sábató (dedicado a la tecnología de materiales) y el Instituto Beninson (dedicado a la tecnología nuclear). Estos Institutos se establecieron por Convenios con Universidades Nacionales (las de Cuyo y de San Martín).

Los festejos del Bicentenario mostraron a los argentinos en celebración de los logros obtenidos a lo largo de 200 años. Es muy oportuno que estos festejos coincidan con los de los 60 años de CNEA en celebración de la Argentina Tecnológica y Productiva.



28 años de compromiso total con el desarrollo sustentable de la industria nuclear Argentina

- **Elementos combustibles:**
Atucha I, Embalse, Atucha II.
RA 3 CAREM
- **Barras de Co. ajustadoras de actividad, tubos guía para barras de control.**
- **Canales de enfriamiento.**
- **Canastos para almacenamiento en seco y dispositivos blindados de transferencia.**
- **Fabricación de componentes internos para reactores.**
- **Obras y prestación de servicios on-site.**



Consejo Latinoamericano
de Ciencias Sociales



Conselho Latino-americano
de Ciências Sociais

CLACSO

Red CLACSO de Posgrados en Ciencias Sociales

Convocatorias
para la
promoción
de la
formación
y la
investigación

Inscripciones abiertas a
Maestrías y Doctorados

Concursos y
convocatorias
para publicaciones

Eventos
académicos

Informes:

Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales

Avenida Callao 875 5to Piso Dpto J | Ciudad de Buenos Aires | Tel: (54 11) 4811-6588

www.clacso.org.ar | www.clacso-posgrados.net

Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias

Colabore a la difusión científica publicando en CIENCIA e INVESTIGACIÓN

La revista Ciencia e Investigación es el órgano oficial de difusión de la ASOCIACION ARGENTINA PARA EL PROGRESO DE LAS CIENCIAS. Fue fundada en el año 1945 y tiene por objetivo la publicación de temas básicos del conocimiento científico y tecnológico, a través de artículos accesibles a estudiantes y al público en general.

Sus páginas están abiertas a todos los interesados en colaborar, y el Comité Editorial tiene a su cargo la selección de los artículos que serán publicados.

Las instrucciones para los autores pueden solicitarse en la sede oficial de la ASOCIACION ARGENTINA PARA EL PROGRESO DE LAS CIENCIAS, también están detalladas en la última página de esta revista o bien pueden consultarse en **www.aargentinapciencias.org**

ESPERAMOS SU COLABORACIÓN

AAPC

**Avenida Alvear 1711 – 4º Piso - Tel: 4811-2998
(C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina
www.aargentinapciencias.org / email: director@aargentinapciencias.org**

Simbiosis

Su rol en la supervivencia y la evolución de los organismos.

Palabras clave: endosimbiosis, simbiogénesis, evolución
Key words: endosymbiosis, symbiogenesis, evolution

Los organismos establecen entre ellos numerosas relaciones de cooperación, interacción y dependencia. Los adelantos de los estudios genómicos y de bioinformática han hecho posible el estudio de comunidades y consorcios bacterianos, y el de las relaciones de las bacterias entre sí y con las células del organismo huésped. La endosimbiosis bacteriana, que ocurre en el interior de una célula eucariota, presenta aspectos por un lado similares al proceso de infección por un parásito, y por otro, al de la formación de organelas celulares. Ha cobrado fuerza la teoría sobre el origen simbiótico de organelas celulares, como mitocondrias y cloroplastos, así como la de nuevos tipos de organismos. La simbiogénesis constituiría un importante motor evolutivo.

■ Rosa Nagel
ronagel@retina.ar

Kwang Jeon, investigador de la Universidad de Tennessee, había observado que las amebas de su colección adquirían un extraño moteado (6). Las motas o manchas no eran otra cosa que bacterias patógenas que fueron matando a la mayor parte de la población de amebas. Las pocas amebas que sobrevivían fueron recuperando su ritmo normal de crecimiento, aún cuando seguían manteniendo en su interior alrededor de varios miles de las bacterias invasoras. Pero lo más curioso fue que estas amebas se habían vuelto incapaces de crecer sin sus bacterias

invasoras. Sus núcleos se encontraban modificados, pues transferidos a amebas no infectadas cuyos núcleos habían sido previamente extraídos, no producían organismos viables. Estos núcleos requerían una proteína sintetizada por la bacteria. Se había establecido una relación simbiótica, cooperativa, entre la ameba atacada y la bacteria atacante.

El término simbiosis (del griego sim: junto y biosis: vida) se emplea para describir las interacciones, generalmente obligadas, que se establecen entre dos o más seres vivos, y que resultan ben-

eficiosas y a veces hasta indispensables para, al menos, uno de ellos.

Son múltiples, en el reino vegetal y animal, los ejemplos de diferentes tipos de simbiosis, desde las asociaciones que resultan ventajosas para ambos integrantes, denominadas mutualismo, hasta aquellas que resultan ventajosas para uno y nocivas para el otro, que se designan como parasitismo.

Los líquenes, de los cuales se conocen más de 25000 variedades, son organismos simbióticos resultantes de la asociación de dos tipos de organismos, hongos con algas verdes

o con bacterias azul-verdosas (ciano-bacterias). Estos organismos presentan características sinérgicas respecto de las de sus integrantes, el hongo y su socio fotosintético, como una extraordinaria longevidad y resistencia, y la capacidad de crecer y prosperar sobre la roca desnuda. Bajo ciertas condiciones ambientales extremas pueden, sin embargo, volver a disociarse, con la pérdida de las células y características del hongo, o las del organismo fotosintético.

Los microorganismos ofrecen interesantísimos ejemplos de simbiosis. El hecho que no resulten visibles al ojo humano ha hecho que muchas veces no se llegue a percibir el inmenso impacto que ejercen en nuestra vida y en la biosfera.

Las limitaciones al conocimiento de las comunidades bacterianas se deben, en gran parte, a que sólo alrededor del 1% de los microorganismos presentes en la naturaleza pueden hacerse crecer en el laboratorio. Los enormes adelantos alcanzados en la última década en las técnicas de secuenciamiento del ADN y en el análisis computacional de estas secuencias han ido revelando la riqueza y complejidad de la vida bacteriana y la existencia de interesantísimas interacciones, previamente poco a nada conocidas.

Todos los tipos de relaciones existentes dentro de una comunidad bacteriana, y las de distintos tipos de organismos entre sí, de los cuales las relaciones simbióticas son solo un ejemplo, evidencian que la vida es un fenómeno absolutamente interdependiente.

■ INTERACCIONES BACTERIANAS ECTOSIMBIOSIS

Ecosistemas microbianos complejos habitan nuestra piel, mucosas y tracto intestinal. Este tipo de relación entre la flora microbiana y el organismo huésped constituye un caso de ectosimbiosis, porque ocurre fuera de la célula humana, en los epitelios, o en el lumen del tubo digestivo en el caso de la flora intestinal.

Se estima que la flora intestinal está constituida por billones de microorganismos (del orden de 10^{13} a 10^{14}),

cuyo peso es de alrededor de 1.2 kg (13). De acuerdo a estas estimaciones nuestro organismo contendría más células bacterianas que células humanas! (3). Desde esta perspectiva los seres humanos pueden ser vistos como superorganismos cuyo metabolismo representa una amalgama de atributos humanos y microbianos.

Los adelantos en el secuenciamiento y análisis computacional de genomas aplicados a comunidades bacterianas dio origen a una nueva disciplina, denominada metagenómica, que estudia los diferentes tipos organismos que integran las comunidades bacterianas naturales, sin que se requiera su crecimiento previo en el laboratorio (17). De acuerdo a estos estudios se estima que la flora bacteriana intestinal estaría constituida por unas 1000 especies diferentes, de las cuales se conoce solo una pequeñísima proporción.

Las bacterias residentes en el colon humano son importantes para el mantenimiento del metabolismo y la salud. Entre otras funciones, sintetizan las vitaminas B y K, indispensables para la vida, y degradan azúcares (xilanos, celobiosa) que el organismo humano no puede digerir.

No solo se establecen importantes relaciones entre las bacterias, sino también entre las bacterias y las células del huésped. Las bacterias cuentan con mecanismos de señales, designadas autoinductores, que les permiten sensar su número o densidad e inducir una serie de funciones. Se demostró que dos moléculas señal de este tipo, derivadas de la molécula química homoserin-lactona, que son producidas por la bacteria patógena *Pseudomonas aeruginosa*, pueden modular también la expresión de los genes de las células intestinales (20, 13). De manera tal que las señales no sólo son reconocidas por las bacterias, sino que también son reconocidas y funcionan en las células eucariotas.

El intestino de los vertebrados contiene una flora que consiste en una mezcla compleja de especies bacterianas, con una alta proporción de bacterias de los grupos denominados bacteroidetes y firmicutes. En cada tipo de organismo huésped (pez, ratón o humano) existe una proporción diferente de los grupos componentes,

requerida para una óptima actividad metabólica, e inclusive para una adecuada respuesta inmunitaria.

Estudios recientes enfatizan la importancia de la composición de la flora intestinal en el ser humano. Samuel y Gordon (18) estudiaron un modelo de mutualismo entre una bacteria, una arqueobacteria, y el organismo huésped, en un sistema experimental de ratones libres de gérmenes. Cuando colonizaron el intestino de estos ratones con dos especies de bacterias, *Methanobrevibacter smithii* (arqueobacteria productora de metano) y *Bacteroides thetaiotaomicron* (del grupo bacteroidete), observaron que se establecía entre ellas una relación de mutualismo. La bacteria metanogénica *M. smithii*, que permanecía en más baja proporción, incidía sobre *B. thetaiotaomicron* en la degradación azúcares (glucanos y fructanos) y la formación de acetato y formiato. Este último era utilizado por *M. smithii* en la metanogénesis. La forma en que estos dos tipos de microorganismos metabolizan los hidratos de carbono de la dieta afectan el metabolismo y el peso de los ratones (18). Este y otros estudios de Gordon y col. mostraron que los organismos componentes de la flora intestinal tienen una enorme incidencia en la eficiencia alimentaria y el balance energético del huésped. En ratones obesos hay una más alta proporción de firmicutes respecto de bacteroidetes que en ratones delgados. Estudios clínicos realizados en USA (7) indicarían que también en el hombre una mayor proporción de bacteroidetes se correlaciona con pérdida de peso. La microbiota intestinal contribuye a la obesidad provocada por la dieta modificando el balance energético.

Las relaciones interbacterianas han sido estudiadas también en otros sistemas. Así se observó, por ejemplo, que la arqueobacteria termófila *Nanoarchaeum equitans*, de genoma reducido (491 kpb), sólo crece en co-cultivo con la arqueobacteria, *Ignicoccus* (5,19). Dada su limitada capacidad biosintética y catabólica, *N. equitans* es un simbionte obligado de *Ignicoccus*.

Del estudio de las relaciones entre organismos componentes de biofilmes, en los cuales los microorganismos están embebidos dentro de una sustancia

polimérica extracelular, se concluyó que la producción del polímero confiere una ventaja selectiva a los microorganismos productores y sofoca y limita el crecimiento de los no productores (23).

■ ENDOSIMBIOSIS

En la endosimbiosis (del griego endo: dentro) el simbiote vive dentro de las células de su huésped. Muchas relaciones de endosimbiosis son obligadas, ya que ni el huésped ni el endosimbionte pueden sobrevivir uno sin el otro.

La simbiosis intracelular es un fenómeno generalizado en los invertebrados, en particular en los insectos, muchos de los cuales son patógenos importantes en medicina y agronomía. El endosimbionte bacteriano, al proveer nutrientes faltantes en las dietas del insecto, contribuye a su éxito evolutivo, posibilitando la ocupación por éste de nichos de otro modo inaccesibles (12).

Además del interés de los estudios sobre endosimbiosis desde el punto de vista evolutivo, éstos son importantes desde el punto de vista práctico, porque posibilitan, en el caso de insectos que constituyen plagas para la agricultura, el desarrollo y aplicación de estrategias que afecten específicamente al endosimbionte y permitan así combatir al insecto vector.

Un ejemplo interesante de endosimbiosis es el del insecto denominado *Homalodisca coagulata* (chicharrita de alas cristalinas), plaga de cítricos, vid y otras plantas, que se alimenta del xilema de la planta, pobre en nutrientes orgánicos. Su supervivencia depende de dos endosimbiontes bacterianos: la proteobacteria *Baumannia cicadellinica* y el Bacteroidetes *Sulcia muelleri* (22). En base al secuenciamiento del genoma de *B. cicadellinica* (de 690 kpb) se concluyó que éste contiene la información genética para la producción de vitaminas, pero no para la síntesis de aminoácidos esenciales. Del análisis del genoma del otro simbiote, *S. muelleri* (de 150 kpb), que habita los mismos tejidos que *Baumannia*. se concluyó que el mismo codifica aminoácidos esenciales. Así, *B. cicadel-*

linicola provee vitaminas y *S. muelleri* aminoácidos, los que son necesarios para la supervivencia del huésped.

Esta relación del insecto con dos endosimbiontes, con complementariedad y co-dependencia en las capacidades biosintéticas, parece ser el resultado de la reducción genómica de los endosimbiontes, y una co-evolución que llevó a la interacción mutualista obligada entre los mismos.

El estudio de otro endosimbionte, *Buchnera aphidicola*, que se encuentra en un áfido, pulgón del cedro, (*Cinara cedri*), ofrece un interesante modelo para el análisis de la reducción genómica ocurrida en el proceso evolutivo (15,16). *B. aphidicola* pertenece al grupo de las Proteobacterias y habría derivado de una bacteria Gram negativa de vida libre, del grupo de las enterobacterias, pues segmentos de su secuencia muestran similitudes con este grupo de bacterias, en particular con la bacteria *Escherichia coli*. Se estima que la relación simbiótica con el áfido se habría establecido alrededor de 150 millones de años atrás, con la subsecuente pérdida de genes, entre ellos los vinculados a la reparación del ADN. El genoma de este endosimbionte, de 420 kpb, se encuentra reducido en aproximadamente 200 kpb respecto del de otras líneas de *B. aphidicola* que se encuentran en otras familias de áfidos. Sus 362 genes proveen información para la síntesis de aminoácidos esenciales para el huésped, excepto el triptofano. Este aminoácido sería

provisto por otro endosimbionte (*Serratia symbiotica*) también presente en la célula del áfido.

Los genomas de otras líneas de *B. aphidicola* oscilan entre 600-650 kpb. Se considera que durante la evolución de *Buchnera* se fueron perdiendo grupos de genes contiguos por delección. Los genomas de los endosimbiontes habrían mantenido genes esenciales para su mantenimiento dentro de la célula huésped, pero otros genes dispensables, se habrían ido perdiendo. Las diferencias entre los genes que persisten entre las distintas líneas de endosimbiontes sugieren que los diferentes genomas pequeños se habrían generado repetidas veces, en eventos independientes, durante la evolución bacteriana.

El proceso de endosimbiosis, en el cual se produce la pérdida de porciones de genoma, con la concomitante pérdida de algunas de las funciones del endosimbionte y reducción en el tamaño, es un ejemplo de evolución reductiva.

Las funciones perdidas, de ser necesarias para la supervivencia de la célula huésped, deben ser compensadas por otros cambios, por ejemplo por la presencia y función de otro endosimbionte (caso *B. aphidicola* o *B. cicadellinica*), o por la transferencia de los genes perdidos al genoma del núcleo (caso *C. rudii*).

Otro aspecto interesante de estos estudios es que revelan la existencia de los genomas más pequeños conocidos

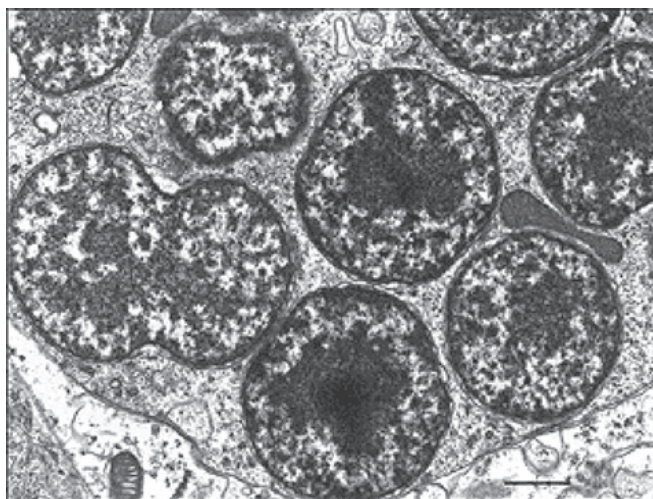


Figura 1. Microfotografía electrónica de transmisión de *Buchnera aphidicola*, endosimbionte de un áfido, en el interior de una célula del huésped (Foto: J. White).

hasta el presente (1). Es el caso de los endosimbiontes *S. muelleri* (150 kpb), *C. rudii* (160 kpb) o *B. aphidicola* (420 kpb). Los genomas bacterianos más pequeños secuenciados previamente correspondían al parásito *Mycoplasma genitalium* (580 kpb) y a la arqueobacteria *Nanoarchaeum equitans* (491 kpb) (2,19).

Los estudios genómicos recientes van revelando muchas otras curiosas situaciones de endosimbiosis, como es el caso de un pequeño gusano marino (oligoqueto *Olavius algarvensis*), que carece de boca, tracto digestivo y aparato excretor, habitante de sedimentos costeros. Mediante el enfoque metagenómico, Dubilier y col (21) detectaron que este gusano contiene al menos cinco especies distintas de bacterias

endosimbióticas. En él coexisten simbiontes capaces de obtener energía por oxidación de sulfuros con otros que obtienen energía, en ausencia del oxígeno, reduciendo sulfatos a sulfuros, estableciéndose así un ciclo metabólico interno que mantiene a los simbiontes y alimenta al gusano huésped. Las bacterias endógenas suplen la falta de aparato digestivo pues proveen al gusano con carbono orgánico, aminoácidos y vitaminas y la falta de aparato excretor reciclando los productos de deshecho. El metabolismo versátil de este consorcio simbiótico permite al gusano trasladarse desde zonas superficiales, con oxígeno, hasta los sedimentos más profundos, anóxicos, en los que habita.

■ ENDOSIMBIOSIS, CAMBIOS REPRODUCTIVOS Y TRANSMISIÓN LATERAL

La bacteria *Wolbachia* es un endosimbionte que infecta a artrópodos (crustáceos, insectos, arañas) y especies de nematodos (gusanos redondos). Se localiza preferentemente en los huevos y se transmite a través de ellos. Puede producir cambios dramáticos al nivel reproductivo: la muerte selectiva de los machos infectados, feminización (la transformación de machos a hembras), partenogénesis (las hembras infectadas son capaces de reproducirse asexualmente a partir de óvulos no fecundados, produciendo hijas como descendencia); incompatibilidad citoplásmica (los machos infectados solo dan descendencia con hembras infectadas) y diferentes situaciones de esterilidad (ausencia de descendencia en cruzamientos incompatibles, porque no se lleva a cabo la fecundación o por la muerte de los embriones).

Este tipo de efectos resultantes de la endosimbiosis puede producir aislamiento reproductivo, y por ende favorecer el proceso de especiación.

Se observó recientemente que el genoma de este endosimbionte, de más de un millón de pares de bases, se encuentra inserto dentro del genoma de la mosca *Drosophila ananassae*. (Se detectó la presencia de 44 sobre 45 genes de *Wolbachia* localizados en distintos sitios de su genoma) y se constató que al menos 28 (del total de 1206 genes de la bacteria) se encuentran activos (4).

Previamente se había detectado la presencia de un gen de *Wolbachia* en el genoma de un escarabajo.

Estos resultados indican que cuando se secuencian genomas de organismos eucariotas no debe excluirse a priori la presencia de secuencias bacterianas como debidas a contaminación.

Estas secuencias podrían corresponder, como en los casos citados, no a contaminantes sino a genes bacterianos que se transfirieron al organismo eucariota por transmisión lateral y se incorporaron dentro de su genoma.

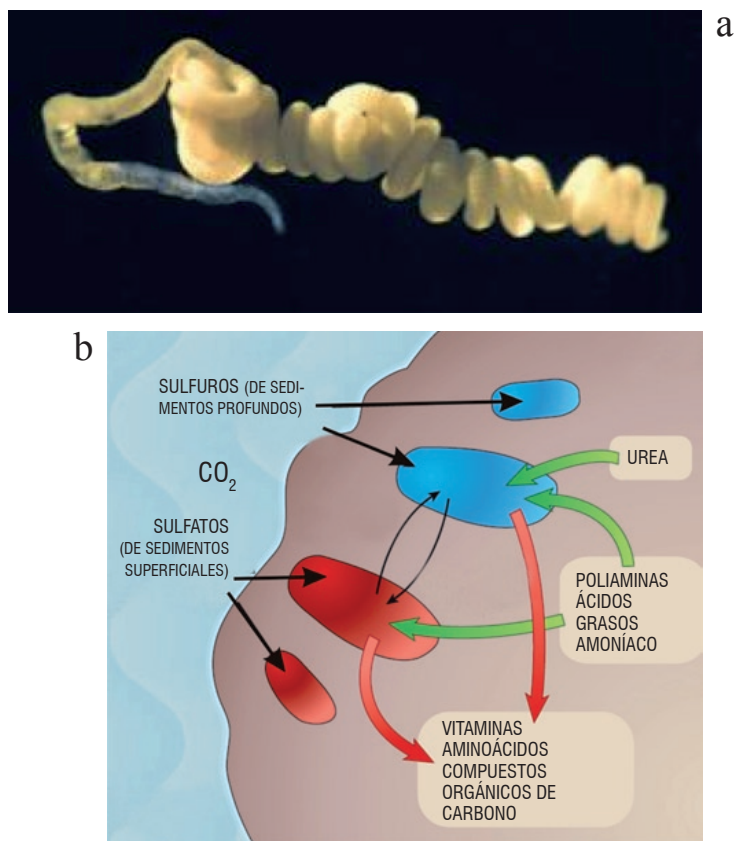


Figura. 2. a). Fotografía del gusano *Olavius algarvensis*, habitante de sedimentos costeros, que carece de órganos digestivos y excretorios; **b).** Esquema de la sección interna de *O. algarvensis* con bacterias endógenas. La simbiosis establecida entre el gusano y las bacterias, que se localizan bajo la piel, se basa en un intercambio metabólico que posibilita la subsistencia de los organismos involucrados. Las bacterias generan energía por oxidación de sulfuros o por reducción de sulfatos, presentes en los sedimentos, y convierten el dióxido de carbono del ambiente en compuestos orgánicos de carbono, aminoácidos y vitaminas, necesarios para el gusano. Por otro lado, reciben de éste metabolitos, como ácidos grasos, poliaminas, y absorben sus productos de desecho, tales como urea y amoníaco. (Adaptación de Stahl DA y Davidson SK. 2006 Nature. 443: 925).

■ GENERACIÓN DE ENDOSIMBIOTES

En el inicio de este artículo se relataron las experiencias de K. Jeon sobre la generación de endosimbiosis entre amebas y sus bacterias infectantes.

Más recientemente, dos científicos japoneses observaron que un protozoario (organismo unicelular) flagelado incorporaba en su interior un alga verde unicelular que vivía en las mismas aguas. Una vez dentro del flagelado, el alga perdía su citoesqueleto y flagelo (estructura externa), el huésped modificaba su alimentación que se volvía fotosintética (autótrofa), como la del alga, y adquiría taxismo hacia la luz (fototaxismo). Con la división de la célula, solo una de las células hijas recibía el plástido y permanecía modificada. La otra recuperaba su forma anterior de alimentación (heterótrofa) y se encontraba nuevamente en condiciones de incorporar otra alga. Se había establecido entre el protozoario y el alga una asociación simbiótica de tipo reversible.

Otro curioso mecanismo de iniciación del proceso simbiótico es el de un gusano gigante, *Riftia pachyptila*, que habita estructuras ubicadas en vertientes hidrotermales (14). Las formas adultas carecen de tubo digestivo y sobreviven gracias a los nutrientes provistos por la presencia de bacterias endosimbióticas. Estos endosimbiontes no se transmiten a las larvas de los gusanos, y las bacterias deben ser readquiridas en cada generación en la etapa larval para la supervivencia de la forma adulta.

Las asociaciones endosimbióticas descritas en estos ejemplos, de una bacteria con una ameba, o con un protozoario flagelado, o con un gusano, que son de carácter inestable, comparten aspectos de ambos, la infección por un patógeno y la endosimbiosis. Algunas de estas relaciones podrían visualizarse como etapas intermedias de un proceso que conduce a la endosimbiosis estable. Así, los endosimbiontes bacterianos, que como vimos, en ciertas etapas muestran similitudes con el proceso de infección por patógenos bacterianos intracelulares, en los casos de endosimbiosis estables presentan,

como veremos seguidamente, muchas similitudes con organelas celulares, como mitocondrias y cloroplastos.

■ ENDOSIMBIOSIS Y EVOLUCIÓN

La microbióloga Lynn Margulis, a fines de la década de 1960, y en forma más orgánica en 1970 en su libro "Origin of eukaryotic cells", propuso la hipótesis de que la célula eucariota se habría originado de la simbiosis entre células procariotas (8). Esta propuesta estaba en línea con las ideas del científico ruso Konstantin S. Merezkhovsky, de principios del siglo XX, sobre el origen simbiótico de la célula (11).

Esta hipótesis es conocida ahora como "teoría endosimbiótica del origen de la célula eucariota" o como "teoría endosimbiótica serial o SET" (por serial endosymbiosis theory, en referencia a que las incorporaciones endosimbióticas habrían ocurrido sucesivamente en el tiempo y no en forma simultánea). Según la misma las organelas de la célula eucariota, tales como las mitocondrias, y los cloroplastos presentes en las células vegetales, habrían derivado de bacterias aerobias (probablemente relacionadas con rickettsias), y de cianobacterias, respectivamente, que fueron en algún momento incorporadas dentro de una célula.

La hipótesis propuesta por Margulis fue ignorada y descalificada durante muchos años. Con el tiempo se fueron acumulando evidencias que le fueron aportando credibilidad. Así, se sabe que las mitocondrias y los cloroplastos no están codificados por el núcleo y que solo pueden generarse de organelas preexistentes. Además, tienen una serie de características que las asemejan a las células procariotas. Así, tanto sus genomas, que consisten de una sola molécula de ADN circular que no contiene histonas asociadas, como sus maquinarias sintetizadoras de proteínas, son similares a las de las bacterias. Gran número de antibióticos que bloquean la síntesis de proteínas en bacterias también lo hacen en las mitocondrias y cloroplastos, y no tienen efecto directo sobre la célula eucariota; el antibiótico rifampicina que inhibe la ARN polimerasa de las

bacterias, inhibe la polimerasa de las mitocondrias, pero no la polimerasa del núcleo eucariótico.

Los procesos de endosimbiosis reductiva constituirían estadios intermedios conducentes a la formación de organelas celulares.

Interesa notar que los tamaños de los genomas de los endosimbiontes estudiados no difieren mucho de los de las mitocondrias (de menos de 600 kpb) o los de los cloroplastos (de menos de 220 kpb).

La propuesta de que la adquisición de undulipodios (cilios y flagelos que confieren motilidad a la célula eucariota) derivan de espiroquetas, es aún controvertida. Según la misma, el primer paso habría sido la adquisición de la organela de la motilidad, que se habría convertido con posterioridad en un sistema de motilidad intracelular, incluyendo el de la mitosis.

También es aún materia de debate el tipo de mecanismo que llevó al origen de la célula eucariota. De acuerdo con la teoría simbiótica ésta habría resultado de la formación de asociaciones permanentes (simbióticas) entre organismos diferentes. En este contexto, se propuso que las células eucariotas primitivas resultaron de la fusión de una arqueobacteria con una eubacteria, del tipo de las espiroquetas (9).

Actualmente es de aceptación general que la simbiosis jugó un rol importante en la generación de cambios evolutivos y se aplica el término simbiogénesis a los cambios ocurridos a través del tiempo, que llevaron a la formación (génesis) de un nuevo organismo a partir de una simbiosis establecida.

De acuerdo a la teoría neo-darwinista la selección natural y la supervivencia de los individuos más aptos son los factores decisivos en la evolución de los organismos. Esta supervivencia diferencial se visualiza generalmente como la resultante de una competencia entre los organismos que lleva a la supervivencia del más apto. Sin embargo, las relaciones de cooperación, interacción y dependencia mutua entre los organismos, entre ellas la simbiosis, también constituirían un importantísimo motor de la evolución, y podría inclusive explicar la formación de nuevas especies y nuevos tipos de organismos.

L. Margulis y D. Sagan (10) postulan que la vida no se apoderó del planeta por combate sino por la asociación en redes (networking). Según esta visión, las relaciones simbióticas no habrían jugado un rol menor en el proceso de la evolución biológica.

Sin duda los estudios de simbiogénesis contribuirán a una comprensión más profunda de las interacciones entre los organismos y su evolución.

■ GLOSARIO

ADN: cadena de secuencias de bases (adenina, A; citosina, C; timina, T; guanina, G) unidas por enlaces fosfato-azúcar, que lleva la información genética de los organismos. Se encuentra formando una doble cadena asociada por las bases complementarias (AT; CG).

ameba: organismo unicelular que se desplaza mediante prolongaciones

arqueobacterias: grupo más antiguo de bacterias que carecen de pared y presentan diferente composición química de la membrana y diferente metabolismo. Habitan ambientes extremos.

autótrofo: organismo capaz de alimentarse y obtener energía de sustancias inorgánicas (quimiosíntesis) y luz (fotosíntesis).

bacteroidetes: grupo de bacterias que se encuentran en el ambiente, incluyendo el suelo, sedimentos, agua de mar y el tracto digestivo de los animales. (El grupo incluye tres clases: Bacteroidetes, Flavobacteriay Sphingobacteria).

base nucleotídica: (ó base nitrogenada): compuesto orgánico cíclico (citosina, adenina, timina o guanina) constituyente de los nucleósidos, nucleótidos y ácidos nucleicos.

biofilme: comunidad de microorganismos que crecen sumergidos en una matriz de exopolisacáridos que secretan algunos de ellos y adheridos a superficies inertes (rocas, catéteres, etc.) o a tejidos vivos (encías, etc.).

cloroplasto: organela intracelular en la que se lleva a cabo la fotosíntesis.

espiroqueta: bacteria (eubacteria) heterótrofa móvil provista de flagelo.

eubacteria: organismos procariotas que tienen membranas compuestas por ésteres del glicerol con ácidos grasos

. Tienen una pared celular constituida por peptidoglicano, son sensibles a los antibióticos antibacterianos tradicionales y tienen rRNA y regiones del tRNA claramente diferentes de arqueobacterias y eucariotas.

firmicutes: grupo de bacterias Gram-positivas. Algunas de ellas (entre las que se encuentran las micoplasmas) carecen de pared celular. (El grupo se divide en tres clases: *Bacilli*, *Clostridia*, y *Mollicutes*).

gen: porción de ADN constituido por miles de nucleótidos que codifica o controla la síntesis de una cadena polipeptídica o proteína.

genoma: conjunto del ADN de un organismo depositario de sus características genéticas.

heterótrofo: organismo capaz de alimentarse y obtener energía a partir de sustancias orgánicas.

kb: miles de bases. Se refiere al número de bases nucleotídicas (adenina, timina, citosina, guanina) presentes en una cadena de ADN.

pb: pares de bases nucleotídicas.

kpb: miles de pares de bases.

metagenómica: se aplica al empleo de técnicas modernas de estudio genómico. Se basa en el aislamiento y secuenciación del ADN y análisis computacional de las secuencias, aplicadas al estudio de las comunidades microbianas directamente de su ambiente natural, sin previo aislamiento y cultivo de las especies individuales.

microbiota: conjunto de microorganismos (bacterias y hongos) que mantienen relación entre sí y con su ambiente.

Mitocondria: organela intracelular que utiliza oxígeno y genera energía.

organela: estructura intracelular rodeada por una membrana que lleva a cabo una o más funciones vitales.

secuenciación: determinación de la secuencia de bases en el ADN.

sinergismo: interacción entre partes cuyo efecto es mayor que su suma.

transmisión horizontal: transferencia de material genético entre bacterias.

al. (1995) The minimal gene complement of *Mycoplasma genitalium* Science. 70:397-403

3. Gill SR, Pop M, Deboy RT, Eckburg PB, Turnbaugh PJ, Samuel BS, Gordon JL, Relman DA, Fraser-Liggett CM, Nelson KE (2006) Metagenomic analysis of the human distal gut microbiome. Science, 312: 1355-1359.
4. Hotopp JC, Clark ME, Oliveira DC, Foster JM, Fischer P, Torres MC, Giebel JD, Kumar N, Ishmael N, Wang S, Ingram J, Nene RV, Shepard J, Tomkins J, Richards S, Spiro DJ, Ghedin E, Slatko BE, Tettelin H, Werren JH. (2007) Widespread lateral gene transfer from intracellular bacteria to multicellular eukaryotes. Science 317(5845):1753-1756.
5. Huber H, Hohn MJ, Rachel R, Fuchs T, Wimmer VC, Stetter KO (2002) A new phylum of Archaea represented by a nanosized hyperthermophilic symbiont. Nature 417:63-67.
6. Jeon KW. (1987) Change of cellular "pathogens" into required cell components. Ann N Y Acad Sci. 503:359-71.
7. Ley RE, Turnbaugh PJ, Klein S, Gordon JL. (2006) Microbial ecology: human gut microbes associated with obesity. Nature. 444:1022-1023.
8. Margulis L (1970) Origin of Eukaryotic Cells, Yale University Press.
9. Margulis L (1996) Archaeal-eubacterial mergers in the origin of Eukarya: phylogenetic classification of life. Proc.Nat. Acad.Sci. USA 93: 1071-1076.
10. Margulis L, Sagan D (2002) Captando Genomas: una teoría sobre el origen de las especies. Editorial Kairós. Barcelona.
11. Mereschkovsky KS (1909) Symbiogenesis. (en ruso).
12. Moran NA (2002) Genome evolution in symbiotic bacteria, ASM News 68: 499-505.
13. Nagel R (2007) Las comunidades bacterianas. Su rol en la biosfera y el metabolismo. Ciencia e Investigación. 58: 38-42.
14. Nussbaumer AD, Fisher CR, Bright M (2006) Horizontal endosymbiont transmission in hydrothermal vent tubeworm, Nature 18: 441:345-348.
15. Perez Brocal, V., Gil R, Ramos S., Lamelas A, Postigo M, Michelena JM, Silva FJ, Morán NA (2002) Genome evolution in symbiotic bacteria. ASM News 68 : 499-505.
16. Pérez-Brocal V, Gil R, Ramos S, Lamelas A, Postigo M, Michelena JM, Siva FJ, Moya A, Latorre A (2006) A small microbial genome: the end of a long symbiotic relationship? Science 314: 312-313.
17. Riesenfeld CS, Schloss, PD, Handelsman J (2004) Metagenomics: Genomic analysis of microbial communities. Ann. Rev. Genet. 38: 525-552.

■ REFERENCIAS

1. Andersson SGE (2006) The bacterial world gets smaller, Science 314: 259-260.
2. Fraser CM, Gocayne JD, White O, et

18. Samuel BS, Gordon JI (2006) A humanized gnotobiotic mouse model of host-archaeal-bacterial mutualism. *Proc.Natl.Acad.Sci.USA*. 103: 10011-10016.
19. Waters E, Hohn MJ, Ahel I, Graham DE et al. (2003) The genome of *Nanoarchaeum equitans*: Insights into early archaeal evolution and derived parasitism. *Proc.Natl.Acad.Sci.* 100: 12984-12988.
20. Williams SC, Patterson EK, Carty NL, Griswold JA, Hamood AN, Rumbaugh KP (2004) *Pseudomonas aeruginosa* autoinducer enters and functions in mammalian cells. *J.Bacteriol.* 186: 2281-2287.
21. Woyke T, Teeling H, Ivanova NN, Huntemann M, Richter M, Gloeckner FO, Boffelli D, Anderson IJ, Barry KW, Shapiro HJ, Szeto E, Kyrpides NC, Mussmann M, Amann R, Bergin C, Ruehland C., Rubin EM, Dubilier N (2006) Symbiosis insights through metagenomic analysis of a microbial consortium, *Nature* 443: 950-955.
22. Wu D, Daugherty SC, Aken SE, Pai GH, Watkins KL, Khouri H, Tallon LJ, Zaborsky JM, Dunbar HE, Tran PL, Moran NA, Eisen JA. (2006) Metabolic complementarity and genomics of the dual bacterial symbiosis of sharpshooters. *PLoS Biol.* 4(6):e188.
23. Xavier JB, Foster KR. (2007) Cooperation and conflict in microbial biofilms, *Proc Natl Acad Sci. USA* 104: 876-881.

CONICET



Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva
Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología
Presidencia de la Nación - República Argentina

www.conicet.gov.ar



Dr. Bernardo A. Houssay

Instituto de Biología y Medicina Experimental

IBYME

El Instituto de Biología y Medicina Experimental (IBYME), asociado al CONICET, fue fundado por el Dr. Bernardo A. Houssay en 1944. Su Misión es impulsar el conocimiento en diversas áreas como: oncología, endocrinología, reproducción, neurociencias, comportamiento, inmunopatología y biotecnología. Todo ello está orientado a ampliar el conocimiento de los principios fundamentales que rigen el funcionamiento de los seres vivos y desarrollar aplicaciones tecnológicas en el área de la biomedicina.

IByME - CONICET - Vuelta de Obligado 2490 - Buenos Aires - Argentina / Tel: 54-11-47832869

Cosmología moderna: la huella de la formación de los mundos

Palabras clave: radiación de fondo, geometría del universo, energía oscura.
Keywords: background radiation, geometry of the universe, dark energy.

Alejandro Gangui ■

IAFE – Instituto de Astronomía y Física del Espacio,
CONICET, y CEFIEC – Facultad de Ciencias Exactas
y Naturales, Universidad de Buenos Aires
<http://cms.iafe.uba.ar/gangui/>

Desde tiempos inmemoriales, el cielo nocturno ha despertado en los seres humanos sentimientos de maravilla y reavivado interrogantes muy profundos. En este comienzo del siglo XXI, la maravilla y la fascinación no se han perdido, sólo han cambiado algunos interrogantes.

■ INTRODUCCIÓN

Sabemos hoy que las grandes estructuras astrofísicas se originaron de pequeñas aglomeraciones de materia por la acción de la gravitación. Sin embargo, aunque esto nos parece simple, la situación no era tan clara tan sólo unos años atrás. En efecto, si queremos formar una galaxia, por ejemplo, no basta con tener los ingredientes necesarios (la masa de unos cien mil millones de soles); también precisamos las “condiciones iniciales” adecuadas. Un universo perfectamente homogéneo, es decir, idéntico en todas partes, no sirve para formar estructuras astrofísicas, pues no existe en él un lugar privilegiado donde comenzar a formar una galaxia. Así pues, es necesario que

existan pequeñas *inhomogeneidades* en la distribución inicial de la densidad de materia, de tal modo que allí donde hay un “grumo”, las partículas se vean atraídas y se aglutinen cada vez más hasta formar las estrellas y galaxias que nos rodean hoy.

El origen de estas pequeñas inhomogeneidades es todo un tema en sí mismo, y es centro de uno de los debates más fascinantes de la actualidad en la cosmología. Diremos aquí solamente que hasta tanto no se detectara prueba fehaciente de la existencia de estas pequeñas perturbaciones iniciales en la distribución de la materia, no hubiéramos estado seguros de que el mecanismo de la *inestabilidad gravitacional* era el responsable de la formación de los mundos.

Pero si en efecto existieron dichas inhomogeneidades, también debieron estar presentes durante la época llamada del *desacople de la radiación y la materia*: cuando el universo cuenta con apenas unos 400.000 años de vida aproximadamente (hoy cuenta con unos 14.000 millones de años), su energía ambiente decrece lo suficiente como para permitir la formación de la materia neutra. El universo, extraordinariamente caliente en sus primeros instantes de vida, se enfría a unos pocos miles de grados centígrados. Es entonces que los electrones, hasta entonces libres, logran aferrarse a los núcleos para formar la materia neutra. Los corpúsculos de radiación –los *fotones*–, principales indicadores de la temperatura del universo, y que

hasta entonces chocaban y echaban por tierra todo intento de construir átomos, no cuentan ya con la energía suficiente.

La materia neutra deja entonces de obstaculizar el camino de los fotones, y éstos comienzan su largo viaje por el universo, inundándolo con un fondo de radiación al que llamamos la *radiación cósmica de fondo*, un verdadero vestigio del universo primordial. Los grumos (o semillas) primordiales, a partir de los que crecerán las grandes estructuras astrofísicas del cielo debieron ya estar allí en la época de este desacople. Por ello, pensamos que la radiación de fondo fue un "testigo" de esas épocas remotas y que estudiando sus propiedades hoy, llegaremos a saber cómo fue el origen de los mundos más allá de nuestro sistema solar.

■ UN VESTIGIO DEL UNIVERSO PRIMORDIAL

Vemos el árbol, queremos saber cómo era la semilla que le dio la vida. Las estrellas y galaxias actuales nacieron de pequeñas "semillas gravitatorias"; hoy queremos saber cómo eran estas últimas. Nos hace falta un registro primordial, una fotografía del nacimiento. Pues bien, la radiación cósmica de fondo nos provee esa imagen

que buscamos. El único inconveniente es que, dado que las semillas eran tan pequeñas, su "huella" impresa en la radiación de fondo es diminuta.

La radiación de fondo nos llega de todas las direcciones del cielo imaginables, como si estuviéramos en el centro de un inmenso horno de radiación. ¿Esperaríamos verla idéntica en todas las direcciones? Si así fuera, ¿qué clase de huella podríamos detectar?

No, la radiación de fondo no puede tener las mismas características en cualquier dirección; no puede ser *isótropa*. La huella impresa que esperamos detectar debe venir "codificada" en forma de *anisotropías* en alguna de sus propiedades, por ejemplo, en su intensidad o temperatura efectiva. Y son estas anisotropías en la temperatura lo que los cosmólogos han tratado de detectar durante más de tres décadas. Sin embargo, y por muchos años, la radiación de fondo se mostró absolutamente isótropa e idéntica en cualquier dirección que se la observase.

Evidentemente, esto presentaba un serio problema para los modelos de formación de estructuras. La radiación de fondo, que en la época del desacople iniciaba su camino libre de interacciones, *no* debía ser completamente isótropa, ya que debido a las inhomogeneidades en la distribución de

la materia, la "tela" espacio-temporal por donde viajan los fotones se debería "deformar" de distinta manera en dos lugares vecinos cualesquiera.

Una sobredensidad en un dado lugar generaría así una subdensidad en su vecindad. Un fotón que iniciase su camino desde la base de una "depresión gravitatoria" (o sea, una sobredensidad de materia) sufriría una pérdida de energía al "escapar" de esa región, de igual manera que una flecha disparada verticalmente pierde velocidad con la altura debido al campo gravitatorio terrestre. Lo contrario sucedería con un fotón que partiese de una región con una subdensidad (una "colina" gravitatoria). En resumen, dos fotones que nos llegaran procedentes de distintas direcciones de la esfera celeste habrían perdido diferentes cantidades de energía en sus viajes y por ende las intensidades, o temperaturas efectivas, procedentes de esas dos direcciones serían distintas.

Con esto en mente y luego del descubrimiento fortuito de la radiación cósmica de fondo en 1964, varios grupos se dieron a la difícil tarea de "cartografiar" el fondo cósmico en detalle. Se sabía que debía existir una cierta "estructura" intrínseca en la distribución de su temperatura efectiva, quizás manchas más cálidas en ciertos lugares de la bóveda celeste acompañadas de

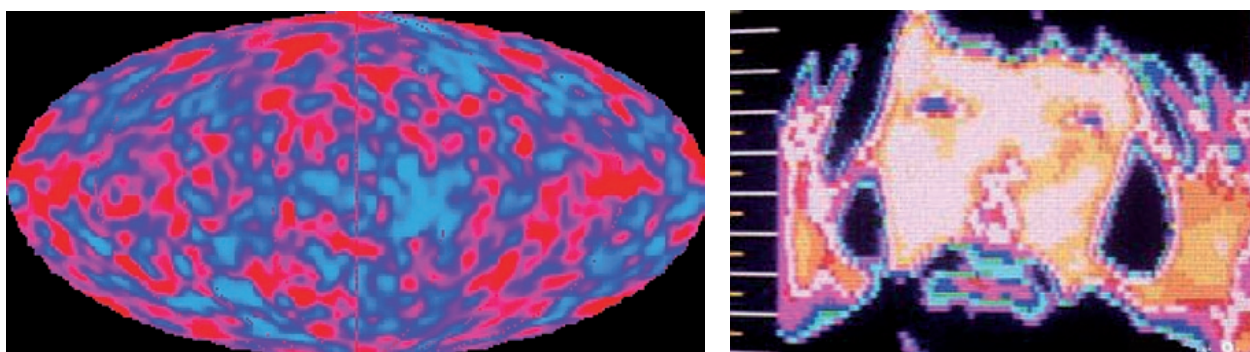


Figura 1. UN ECO DEL UNIVERSO PRIMITIVO. La imagen de la izquierda muestra las "anisotropías" en la "radiación cósmica de fondo" detectadas por el satélite COBE de la NASA. En este mapa, puede verse la totalidad del cielo en "coordenadas galácticas", donde la Vía Láctea está dispuesta en forma horizontal. Esta imagen representa a nuestro universo joven de apenas unos 400 mil años de vida. En ese entonces, los planetas y estrellas aún no existían. El fondo de radiación se desacopla de la materia y comienza a propagarse libremente llevando consigo la información del estado del universo primordial. A pesar de que el universo era una "sopa" de partículas y radiación sumamente homogénea, el mapa muestra diminutas variaciones de temperatura, codificadas por los distintos matices. Las diferencias son de apenas decenas de millonésimas de grado en la temperatura del fondo de radiación. Estas inhomogeneidades están ligadas a variaciones de densidad de la materia. Las zonas claras (más frías) son las más densas y, luego de miles de millones de años de evolución, darán origen a las estructuras astrofísicas que nos rodean hoy. A la derecha vemos una "imagen del calor", y nos muestra variaciones de temperatura del orden del grado; las anisotropías en la radiación de fondo reveladas por los detectores actuales son unas cien mil veces más pequeñas.

otras más frías en otras direcciones. Pero los años pasaban, las mediciones se multiplicaban y, luego de sustraer las señales espurias, nada aparecía.

Estos resultados hacían peligrar a virtualmente todos los modelos de formación de estructuras del momento. Muchos años pasarían antes de que el satélite americano COBE (acrónimo de COsmic Background Explorer, o explorador del fondo cósmico) revelara, en 1992, los tan ansiados "rizos" primordiales en la suave "cabellera" de la radiación de fondo. Y no exageramos en acotar que estas observaciones cerraron un largo período de angustias para la mayoría de los cosmólogos.

En efecto, observaciones previas a 1992 habían sólo provisto cotas superiores a las fluctuaciones en la temperatura de la radiación de fondo. De no haberse encontrado prueba suficiente de las anisotropías a un nivel de *una parte en 100.000* (como COBE las encontró) los modelos de formación de estructuras basados en la inestabilidad gravitacional hubieran pasado un mal momento (al igual que sus proponentes). Y esto debido a que las fluctuaciones en la densidad de materia (asociadas a las anisotropías en la radiación de fondo) hubiesen resultado demasiado pequeñas y a causa de esto "no habrían hecho a tiempo" a formar las conspicuas estructuras astrofísicas que conocemos hoy.

El satélite COBE comprobó además que la repartición en energías de la radiación de fondo (o equivalentemente, su *espectro*) es muy particular. Este espectro reproduce con increíble precisión la curva teórica de lo que en lenguaje algo más técnico se llama un espectro térmico de *cuerpo negro* a una temperatura de unos 3 grados Kelvin (unos 270 grados centígrados bajo cero). Bien, precisamente ésta es la predicción de los modelos que estudian la evolución del universo —conocidos comúnmente como modelos del Big Bang, ya que este espectro sólo puede resultar de un estado de equilibrio térmico entre todos los constituyentes del universo, como en efecto lo predicen los modelos con una fase temprana extremadamente densa, energética y caliente.

Con la radiación desacoplada de la materia neutra, no existe ya impedimento para que esta última comience a estructurarse, y así los primeros átomos, luego moléculas y más tarde sistemas cada vez más complejos se irán aglomerando, atraídos por la gravitación, para formar grandes cuerpos astrofísicos.

■ MATERIA OSCURA

Desde los pequeños grupos de galaxias con tan sólo algunas decenas de unidades, hasta los grandes cúmulos que cuentan con varios millares de galaxias, incluso masivas como la nuestra, estamos en presencia de una gran diversidad de estructuras astrofísicas. Es precisamente esa distribución de la materia que los cosmólogos tratan de modelar por medio de extensas simulaciones numéricas. Para que estas simulaciones den un resultado realista es vital conocer la cantidad de materia ordinaria presente en el universo. Pero desafortunadamente, ésta se desconoce pues hoy sabemos que la mayor parte de la materia que nos rodea a escalas cosmológicas no emite ningún tipo de radiación que podamos detectar.

El astrónomo suizo Fritz Zwicky fue el primero en ofrecer evidencia tangible de la presencia de materia no luminosa en otras galaxias. Allá por los años 1930, se conocían ya un número suficiente de velocidades de galaxias pertenecientes al cúmulo de Coma y esto permitía que los astrónomos pudieran embarcarse en un estudio de su dinámica. Coma es un gran grupo de galaxias que se halla a unos 300 millones de años-luz de la Vía Láctea y contiene al menos unas mil galaxias brillantes. En 1933, Zwicky notó que muchas de estas galaxias se movían tan rápido que su atracción gravitatoria mutua, calculada a partir de su masa luminosa, sería insuficiente para mantenerlas en grupo. Si los cúmulos estudiados no se desmembraban (y la evidencia sugería que no lo hacían) entonces cierta forma de *materia oscura* debía estar presente. Sería pues la atracción gravitacional de esta materia no visible la que mantendría unido al grupo.

Aunque en un principio los astrónomos pensaron que esa masa faltante era una propiedad exótica de los cúmulos, la acumulación de datos, sobre todo en los años 1970 y siguientes, rápidamente mostró que era una característica también de las galaxias, independientemente de su estancia en grupos. Aun así, éstos no son los únicos lugares en donde aparece la materia oscura... ¿Cuál es su identidad precisa? Por el momento es difícil de saber. Pero candidatos por supuesto que no faltan. Desde las estrellas frustradas llamadas *enanas marrones*, demasiado pequeñas como para iniciar las reacciones termonucleares y "encenderse", hasta los agujeros negros, objetos astrofísicos ultradensos de los cuales ni siquiera la luz puede escapar, existe toda una variedad "no exótica" de objetos posibles. Y decimos que no son candidatos exóticos ya que existen varias constataciones observacionales que nos indican que dichos objetos astrofísicos sí abundan en el universo.

Una buena cantidad de materia no luminosa podría también deberse a grandes planetas fríos, similares a nuestro Júpiter, que se distribuyen en el halo galáctico, llamados con el acrónimo "chillón" de MACHO (del inglés por Massive Astrophysical Compact Halo Object u objeto astrofísico compacto y masivo del halo). Por el lado de objetos exóticos, pues bien, la lista propuesta por los físicos de altas energías es virtualmente interminable. Muchos de los candidatos son partículas que casi no interactúan con la materia ordinaria y son por ello muy difíciles de detectar. Se los llama WIMPs, del inglés por Weakly Interacting Massive Particles, o sea partículas masivas débilmente interactuantes. Veremos más adelante que desde hace ya un par de años, otra forma de energía, relacionada con la famosa "constante cosmológica" de Einstein (bautizada con la letra griega Lambda) parece dominar en el universo actual. Y cuando decimos "dominar" nos referimos a la proporción que esta energía, conocida como "energía oscura", tiene en el balance total; ¡nada menos que más del 70% de la masa-energía del universo!

Sea cual fuere la verdadera identidad de la *materia oscura*, ésta, sin embargo, se traicionará a sí misma debido a la

atracción gravitatoria que ejerce sobre otros sistemas masivos de estrellas, e incluso sobre la misma luz emitida por objetos luminosos desde los confines del universo observable. A este último se lo llama *efecto de lente gravitatoria* y es una de las consecuencias más espectaculares de la relatividad general. Este efecto hace que la luz de ciertas galaxias muy lejanas, por ejemplo, nos llegue distorsionada y procedente de una dirección que no coincide con aquella en donde se ubicaría el objeto astrofísico detectado en ausencia del deflector.

Una lente gravitatoria, formada por un cúmulo masivo de galaxias y por la materia oscura presente pero no visible (que constituyen el deflector), puede crear varias imágenes de una única galaxia lejana, de forma similar a los varios puntos luminosos que uno vería al observar la llama de una vela a través de un vidrio rugoso. Una suerte de “astigmatismo cósmico gravitatorio” en donde las heterogeneidades de la repartición de materia a gran escala perturban, a la manera de lentes, la trayectoria de los rayos de luz.

Objetos lejanos que sufren este tipo de distorsión aparecerán ligeramente deformados, revelando las concentraciones de materia que se encuentran próximos a la línea de observación. El universo nos ofrece así un novedoso espectáculo de luces y formas, un maravilloso “espejismo gravitatorio”.

■ ¿QUÉ GEOMETRÍA PARA NUESTRO UNIVERSO?

La cosmología que hemos estado describiendo es una cosmología relativista y la relatividad de Einstein nos enseña que las propiedades locales del espacio se modifican de acuerdo a la cantidad de materia-energía que éste contiene (decimos materia-energía ya que ambas están relacionadas; recuerdan $E=mc^2$). Esto también vale para el universo en su totalidad, y es por ello que, de acuerdo a su contenido energético, nuestro universo podrá estar caracterizado por diferentes *geometrías*.

Pero recordemos que no debemos imponer lugares privilegiados –el universo no tiene centro– ni tampoco

direcciones privilegiadas –no hay un arriba o un abajo en el universo–. Esto nos lleva a imaginar que el universo –cuando se lo mira a las mayores escalas astrofísicas posibles– es homogéneo e isótropo. Esta “imagen” que nos hacemos del universo es, claramente, una hipótesis natural de trabajo, ya que no tenemos forma de demostrar que es verdad y por ello se la ha bautizado como el *principio cosmológico*. Este principio nos indica que, de tener nuestro universo una cierta curvatura, dada por su geometría, esta curvatura debe ser la misma en todo el espacio. De no ser así, habría lugares privilegiados, contradiciendo el principio cosmológico. Ahora bien, ¿cuál es la geometría de nuestro universo?

Existen tres tipos posibles de geometrías: espacios con curvaturas positiva, nula o negativa. El primero corresponde a un pedazo de esfera, pero no es una esfera de las comunes que se describe con tan sólo dos coordenadas angulares, como la latitud y la longitud. La esfera a la que nos referimos es una generalización a tres dimensiones (las dimensiones del espacio físico en el que vivimos). El segundo caso corresponde a un espacio plano, desprovisto de curvatura, como lo imaginara ya Euclides en su tratado de geometría del año 300 a.C. Finalmente, existen espacios de tres dimensiones con curvatura negativa y la representación más simple tiene forma de “silla de montar” (ver Fig. 2).

Notemos ahora mismo algo importante de estas tres representaciones para la curvatura de nuestro espacio tridimensional. En el caso “esférico” las trayectorias de todo par de partículas materiales o corpúsculos de luz, aunque inicialmente tiendan a separarse, terminarán por convergir. Es

un caso análogo a lo que sucede con dos aviones que, partiendo del polo Norte, vuelven a encontrarse en el polo Sud. Si los pilotos desconocieran la esfericidad de la Tierra, podrían con todo derecho pensar que durante sus viajes existió una fuerza de atracción “desconocida” que los atrajo uno al otro. Hoy nosotros sabemos que sus trayectorias se volvieron a cruzar debido a que el espacio por donde se movían (la superficie bidimensional de la Tierra) es curvo; en otras palabras, la “curvatura” reemplaza a la “fuerza”. En el caso cosmológico, sabemos que las leyes que rigen la física son las leyes de la relatividad general, donde el concepto de fuerza gravitatoria de Newton fue mejorado y ampliado por Einstein, señalando que es la materia la que curva al espacio. Así, en el caso “esférico” en tres dimensiones, las trayectorias se cruzarán debido a la gran densidad de materia-energía presente en el universo que curva el espacio que contiene los objetos, y que hace aproximarse a sus trayectorias. Es por esto que los modelos del Big Bang con este tipo de curvatura corresponden a universos con alta densidad de energía. Alta densidad... ¿con respecto a qué? Alta, si se la compara con la llamada *densidad de energía crítica* que surge de los modelos cosmológicos y que vale aproximadamente la masa de un átomo de hidrógeno por metro cúbico.

Por el contrario, aquellos universos que posean una densidad menor a la crítica, tendrán una curvatura negativa y las trayectorias tenderán a separarse por siempre; en el ejemplo bidimensional de la Figura 2, dos bolitas que inicialmente comiencen a moverse en dos direcciones cualesquiera, aunque éstas sean paralelas, se alejarán cada vez más para nunca más juntarse.

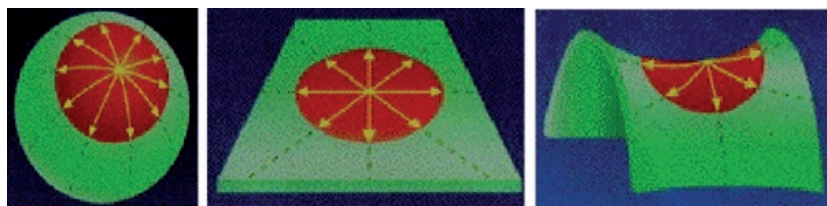


Figura 2. Las tres curvaturas para el espacio físico en los modelos del Big Bang. Las imágenes muestran la geometría espacial local en cada uno de los casos para los correspondientes universos bidimensionales (donde por razones de visualización, se suprime una dimensión espacial).

Estos espacios tienen una geometría que los matemáticos bautizaron con el nombre de *hiperbólica*, y aunque la representemos en la figura como una silla de montar, debe quedar claro que es una silla de montar "en todo punto del espacio". Esto es, en cada punto arbitrario que nos ubiquemos, la curvatura "local" que veremos será la dibujada en la figura.

Finalmente, el caso intermedio o crítico corresponde a una geometría plana, Euclídea, como la que aprendemos en la escuela y donde los ángulos interiores de un triángulo suman siempre 180 grados (en el caso esférico suman más de 180 grados y en el hiperbólico, menos).

Repitamos una vez más que todo lo dicho sobre las trayectorias vale para cualquier partícula material o corpúsculo de radiación. Esto es así ya que si dejamos de lado los otros tipos de interacciones conocidas (como la electromagnética) y nos concentramos en la gravitación, el concepto de fuerza que Newton introdujera en su gran unificación de los *Principia* de 1687 es ahora ampliado al de la curvatura del espacio (y del tiempo). Una vez que el Sol, que contiene más del 99% de la

masa del sistema solar, modifica (curva) el espacio a su alrededor, todos los planetas tienen automáticamente sus posibles rutas ya trazadas. En primera aproximación, la trayectoria seguida por Neptuno y aquella que seguiría un sólo electrón en el lugar de Neptuno serían las mismas.

De igual manera entonces, las trayectorias que seguirán los fotones de la radiación de fondo, en su largo periplo a través del universo, dependerán de la geometría espacial en cada punto del viaje. Pero de acuerdo con el principio cosmológico, el universo a muy grandes escalas es homogéneo, esto es, no hay lugar privilegiado. Todo punto genérico del universo debería entonces poseer idénticas características físicas, y esto vale también para la curvatura del espacio. Deducimos que la curvatura del espacio es constante y que su valor determinará la geometría. A su vez, la geometría a gran escala del universo está relacionada con la densidad de materia-energía que éste contiene. En conclusión, el recorrido de los fotones de la radiación de fondo dependerá del valor de esta densidad de energía y estudiar la radiación de fondo nos permitirá "pesar el universo".

■ UN UNIVERSO "PLANO"

En este punto de la discusión quizás surja naturalmente una pregunta, y ésta es: ¿cómo hacer para conocer la geometría de nuestro universo? ¿Cómo saber si el espacio donde vivimos es la superficie de una pelota (en tres dimensiones) o plano o hiperbólico? Pues bien, de acuerdo a lo ya dicho, bastaría con medir su densidad de materia-energía...

Obra de tamaña envergadura no es fácil de realizar. Pese a ello, desde hace años se llevan a cabo grandes campañas de observación que nos permiten tener una idea somera de cómo es nuestro entorno astronómico. Pero existe otro método más simple y claro para responder este interrogante. Este se basa en la detección de las anisotropías en la radiación cósmica de fondo. Veámoslo en más detalle.

Hemos mencionado ya que el espacio alrededor de objetos muy densos y masivos está curvado. Los fotones de la radiación de fondo, como todo habitante del universo, deben tomar una de las rutas disponibles para viajar. Su camino entonces se "doblará" de acuerdo a la curvatura del espacio.

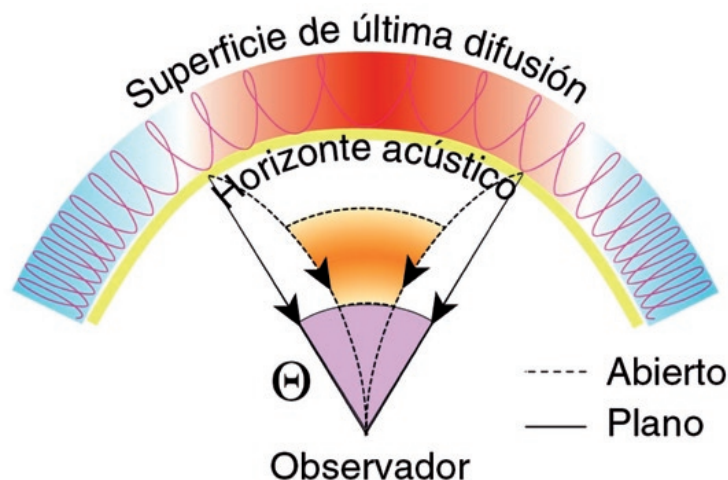


Figura 3. Fig. 3: El tamaño del horizonte acústico en la era del desacople de la radiación y la materia nos indica la talla de las perturbaciones cosmológicas características en esa época tan remota. Dichas perturbaciones se transmiten a los fotones de la radiación de fondo, generando fluctuaciones (anisotropías) en su temperatura efectiva. La detección de la distribución angular de estas fluctuaciones permite deducir el ángulo subtendido por el horizonte acústico. En la figura de la izquierda, el ángulo más grande corresponde a un universo con geometría euclídea (plano o sin curvatura espacial). Un universo de baja densidad de energía curva el camino de los fotones en su viaje hacia los detectores (el Observador). Este efecto hace que toda distancia característica en la época del desacople (el horizonte acústico en particular) subtienda un ángulo menor que en el caso plano (señalado como modelo "Abierto"). Observaciones recientes realizadas por varios grupos empleando distintas técnicas experimentales indican que el universo posee una geometría espacial plana. A la derecha, un universo "plano" ("flat" en Inglés) a partir de la radiación cósmica de fondo ("cosmic background radiation" en Inglés): tapa de la revista inglesa *Nature* del 27 de Abril de 2000 en donde, a partir del análisis de las anisotropías con datos recogidos en el polo Sur, se anunciaron los resultados sobre la curvatura espacial del universo.

Pero estos fotones viajan durante casi la totalidad de la vida del universo, unos 14 mil millones de años y luego, aunque la curvatura del universo a gran escala sea muy pequeña, casi imperceptible, la acumulación de la desviación durante tanto tiempo sí será detectable. Observaciones sofisticadas recientes en las anisotropías de la temperatura de la radiación de fondo indican con un alto grado de precisión que la geometría espacial es plana.

¿Cómo fue posible determinar este resultado tan increíble? Recordemos que el universo primordial era muy caliente y denso, y que por ello la densidad libre de electrones y demás partículas cargadas era tan grande que los fotones no podían propagarse en libertad sin chocar constantemente contra ellas.

Así, electrones, partículas ionizadas y radiación, tomados en conjunto se diferenciaban mal y formaban una suerte de “fluido” único con propiedades compartidas, en donde la tendencia a colapsar (la atracción gravitacional) estaba determinada por la masa de la materia—electrones y partículas cargadas—, mientras que la “fuerza de oposición al colapso” estaba dada por la presión de radiación de los fotones.

Con la tendencia de este fluido a aglutinarse, equilibrada dinámicamente por la presión restauradora de la radiación, no debe sorprendernos que aparecieran oscilaciones (llamadas *oscilaciones acústicas*) en la densidad de materia-energía del fluido. Y estas oscilaciones, como ondas de sonido, se propagaban con una velocidad finita característica. Así, cuando el universo contaba con unos 400.000 años de vida, estas perturbaciones acústicas habían logrado desplazarse hasta una distancia máxima, conocida en cosmología como el *horizonte acústico*. Esta es una distancia característica importantísima de nuestro universo primordial, una suerte de vara de referencia que nos permite conocer la geometría del espacio.

Recordemos que en esos instantes es precisamente cuando se produce el desacople entre materia y radiación, momentos en que el universo se vuelve “transparente” a los fotones de la radiación de fondo. Así, las características propias de la radiación de fondo en ese momento viajarán hacia nuestras antenas virtualmente inalteradas.

Los modelos teóricos actuales relacionan el tamaño del horizonte acústico con el ángulo que esta distancia máxima subtende en el cielo hoy. Y esta relación depende de varios parámetros cosmológicos desconocidos, principalmente de la densidad de energía total del universo. Pero vimos que esta densidad de energía determinaba las posibles curvaturas o geometrías (esférica, plana o hiperbólica). En conclusión, *la curvatura del universo afectará el ángulo bajo el cual el horizonte acústico es observado hoy*.

Dado que el horizonte acústico es una distancia característica en el pasado, ésta poseerá un ángulo característico correspondiente en los mapas actuales de la radiación de fondo. Para un universo desprovisto de curvatura espacial (un espacio “plano”) los modelos predicen un ángulo de aproximadamente 1 grado. Ángulos mayores indicarían que las trayectorias de dos fotones son curvadas excesivamente de modo de hacerlas converger, como sería el caso en un universo de alta densidad; por el contrario, un ángulo menor que 1 grado nos indicaría que la cantidad de energía está por debajo de la crítica (modelo llamado “abierto”) y que las mismas trayectorias tenderían a divergir.

Como lo adelantamos más arriba, los últimos análisis de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo mostraron evidencias contundentes de que existía un exceso notable de intensidad en los mapas a precisamente una escala angular de 1 grado (¡la escala característica buscada!). La interpretación más simple de este hecho es, entonces, que los fotones del fondo cósmico se desplazaron a lo largo de un espacio plano. Pero como ya lo mencionamos, su viaje abarcó la casi totalidad de la vida de nuestro universo...

La conclusión tan esperada fue publicada en las revistas científicas de mayor prestigio (ver Fig. 3), y fue más tarde confirmada por varias otras observaciones independientes: nuestro universo es plano.

■ UN PALIMPSESTO CÓSMICO

La radiación cósmica de fondo nos llega como un vestigio del universo primordial. Descubierta por azar en 1964,

es hoy considerada una de las evidencias más sólidas de los modelos del Big Bang. En 1992, el hallazgo de las anisotropías en su temperatura efectiva, nos mostró las tan ansiadas pequeñas perturbaciones cosmológicas germinales en el plasma primordial, que luego de eones de evolución vendrían las grandes estructuras astrofísicas que vemos hoy. Más tarde, otras observaciones con mayor resolución angular nos permitieron deducir la geometría a gran escala de nuestro universo, concluyendo que los fotones de la radiación de fondo habían viajado por un espacio físico euclídeo, esto es, exento de curvatura espacial. A fines del año 2002, miembros de la colaboración DASI (por Degree Angular Scale Interferometer, o Interferómetro de escala angular de un grado) anunciaron un nuevo descubrimiento mayor: la radiación de fondo posee una pequeña “orientación” o polarización. Este es un efecto de suma importancia y que se venía buscando desde 1968, año en el que el astrofísico inglés Martin Rees predijo su existencia.

La radiación de fondo se polariza sólo si existe una “dinámica” particular en esas diminutas semillas primordiales de las que hablamos antes. Es por ello que su importancia mayor radica en que no sólo es una muestra de las pequeñas inhomogeneidades presentes cuando el universo contaba con unos cien mil años de vida, sino que, además, nos informa sobre la forma en que dichos grumos primordiales “se movían” durante esas épocas remotas. Como vimos con los otros grandes descubrimientos mencionados más arriba, este nuevo hallazgo reafirma el marco teórico que sustenta el edificio de la cosmología actual.

La mayoría de la luz que nos rodea es *no polarizada*. Este tipo de radiación está constituido por trenes de ondas electromagnéticas independientes y que oscilan cada uno en un plano diferente durante su propagación. Sin embargo, la luz no polarizada puede adquirir una orientación de oscilación privilegiada cuando es difundida o reflejada, como sucede comúnmente a través de los anteojos de sol o en la superficie de un lago. En estos casos, la mayor parte de la radiación incidente es reemitida en forma de ondas que

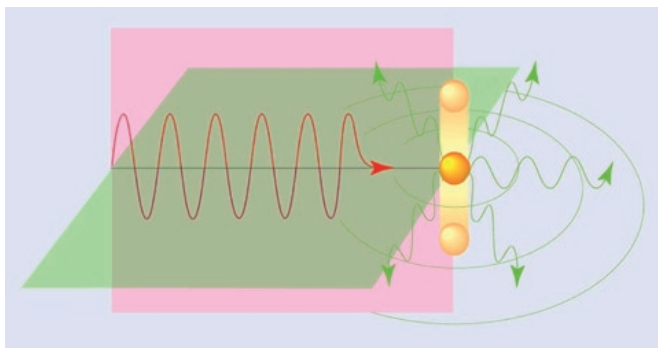


Figura 4. Una onda electromagnética (incidente desde la izquierda) polarizada linealmente oscila en un dado plano (el plano vertical). Cuando alcanza a un electrón (representado como una esferita) la onda le imprime un movimiento oscilatorio que provoca la emisión de la onda difundida. Esta onda resultante se concentra esencialmente en el plano perpendicular al movimiento del electrón (plano horizontal) y está polarizada como la onda incidente.

oscilan todas en un mismo plano. Llamamos a este tipo de radiación con el nombre de *luz linealmente polarizada*.

¿Cuáles son los mecanismos responsables de la polarización? Primero de todo, debemos saber que cuando una onda electromagnética incide sobre una partícula cargada eléctricamente, un electrón libre en el caso que nos interesa ahora, por ejemplo, el campo eléctrico de la onda oscilante en una

dada dirección imprime a la partícula un movimiento oscilante en la misma dirección. Esta carga en movimiento emite entonces un tipo de radiación llamada *radiación dipolar*. Y esta radiación dipolar se concentra esencialmente en el plano ortogonal a la dirección de oscilación. Segundo punto importante, el campo de radiación resultante de la interacción con el electrón estará polarizado de la misma manera que la onda electromagnética incidente. Bien,

estas dos reglas simples nos permitirán comprender el origen de la polarización impresa en la radiación de fondo al momento de la última difusión.

Sólo será observable la componente resultante de la radiación inducida por la otra componente de la onda incidente (flechas verticales), puesto que éstas imprimen al electrón un movimiento perpendicular a la línea de visión, y por ello la radiación difundida en el plano perpendicular sí nos llegará. Así, para el observador, todo sucede *como si* éste recibiese de parte del electrón una luz difundida inducida *sólo* por la componente polarizada perpendicularmente a la línea de visión (las flechas verticales). En virtud de la segunda regla que mencionamos más arriba, la radiación resultante debe poseer la misma dirección de polarización. En conclusión, el observador sólo recibe una parte de la radiación incidente sobre la partícula cargada y esta fracción está linealmente polarizada.

Hasta ahora nuestro razonamiento deja de lado el hecho de que un electrón recibirá radiación procedente de todas las direcciones imaginables, y en forma independiente (ver Fig. 5, panel derecho). Cada una de estas ondas,

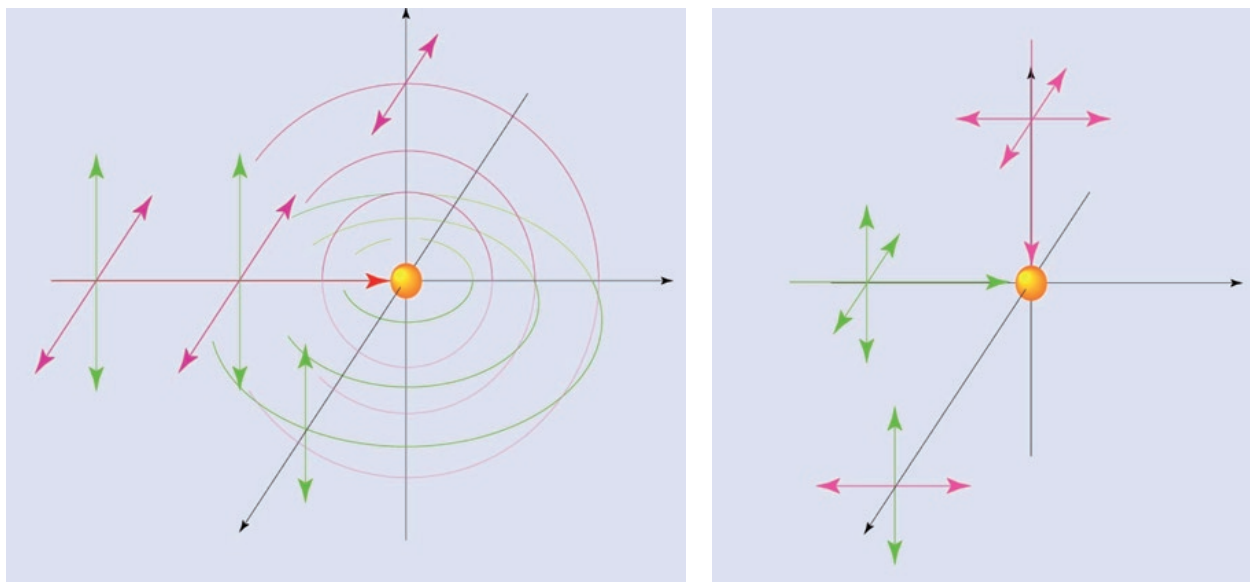


Figura 5. Panel izquierdo: si la onda electromagnética incidente es no polarizada, puede de todas maneras ser representada como la suma de dos ondas linealmente polarizadas, una a lo largo de la línea de visión (la incidente horizontal), la otra a lo largo de la dirección perpendicular (la incidente vertical). La radiación difundida inducida por la primera componente está contenida en el plano perpendicular a la línea de visión (hacia delante de la imagen) y no puede ser detectada. Sólo llegará al observador la segunda componente (vertical) de la radiación incidente, y polarizada como ésta. Panel derecho: cuando la partícula cargada recibe ondas no polarizadas procedentes de distintas direcciones (desde la izquierda y desde arriba), ella misma reemite hacia el observador ondas polarizadas en diferentes direcciones. Si la radiación incidente no es isotrópica, una de estas emisiones polarizadas será ligeramente más intensa que las otras y podremos observar un ligero excedente de polarización resultante.

como la que consideramos más arriba, será difundida hacia el observador en forma de radiación polarizada, pero cada una en una dirección independiente. Por ello, si el campo de radiación incidente sobre el electrón fuera exactamente isótropo, la radiación difundida estaría compuesta de trenes de ondas polarizadas con idéntica intensidad en todas las direcciones, y la suma de todas estas contribuciones terminaría por no dejar aparecer ninguna dirección privilegiada... Pero la radiación cósmica de fondo ¡no es perfectamente isótropa!

Nos queda un último punto a enfatizar. Vimos antes que las oscilaciones acústicas en el plasma primordial eran clave para comprender las características de las anisotropías en la temperatura de la radiación de fondo. Estas características nos permitieron incluso dar un veredicto sobre el difícil ejercicio de calcular la curvatura a gran escala de nuestro universo. ¿Qué nueva información nos proporciona el conocer la polarización de la radiación de fondo?

Pues bien, si las anisotropías nos indicaban el tamaño de las semillas primordiales a la base de las galaxias actuales, la polarización nos indica las variaciones de intensidad intrínsecas en la radiación en el momento preciso del desacople. Y estas variaciones de intensidad no son producidas sólo por la talla de las semillas, sino sobre todo por la dinámica de éstas. En suma, si las anisotropías nos proporcionaban una clara imagen de nuestro universo, joven de 400.000 años de vida, el campo de la polarización le "agrega movimiento" a dicha imagen y nos permite observar la forma en que los grumos primordiales de la formación de estructuras "se movían" en aquella época tan remota.

El descubrimiento de la polarización nos brinda una nueva ventana para observar el cosmos primordial. Como una imagen perdida de nuestro universo, ocultada por procesos físicos posteriores durante miles de millones de años, la radiación de fondo nos revela ahora este palimpsesto cósmico. Su estudio permitirá a los cosmólogos descifrar la información que temíamos se hubiese perdido para siempre: el mecanismo dinámico de la formación de los mundos.

■ ¿EL FUTURO DE NUESTRO UNIVERSO?

Ya hemos visto las diferentes posibilidades que brindan los modelos del Big Bang para la curvatura espacial. Pero ¿qué hay de la parte *temporal*? Esto es, ¿cómo evoluciona nuestro universo en el tiempo?

Aquí también existen casos diferentes: el primero, se trata de un universo actualmente en expansión y que continuará expandiéndose por siempre. Corresponde a modelos con curvatura espacial negativa o nula, y en éstos la separación cosmológica entre objetos astrofísicos suficientemente lejanos crece monótonamente con el tiempo. Así, la densidad de materia se hará cada vez menor y la temperatura del universo disminuirá sin cesar, convirtiéndolo en un lugar desoladoramente vacío y frío en donde vivir.

Pero también existe la posibilidad de que, debido a la mutua atracción gravitatoria de toda la materia que contiene nuestro universo, llegue un momento en el que su expansión "se frene" y comience entonces una fase de contracción (para curvatura espacial positiva). En este caso, el universo colapsaría sobre sí mismo y a este (trágico) fin de la evolución cosmológica se lo conoce con el nombre de *Big*

Crunch (gran colapso o "crujido").

Las observaciones actuales indican sin embargo que, lejos de contraerse sobre sí mismo, el universo continuará su expansión eternamente, y hasta se piensa que su tasa de expansión *aumenta*. Estas conclusiones son el resultado de los últimos diez años de detección y estudio de un tipo particular de estrellas lejanas colapsadas, eventos conocidos como *supernovas de tipo Ia*. Se piensa que son estrellas del tipo de las enanas blancas, que al incorporar demasiada masa de otra estrella compañera cercana, colapsan gravitacionalmente, terminando su vida en una gigantesca explosión termonuclear.

La luz que se detecta de estas fuentes lejanas nos da un indicio del estado de expansión del universo. En forma similar (¡aunque no idéntica!) a cómo se modifica la frecuencia del sonido de una fuente en movimiento, la frecuencia de la luz de las galaxias también se alterará: el sonido de un avión que se aleja es más grave que cuando pasa por encima de nuestras cabezas (¿recuerdan el efecto Doppler?); la luz de una galaxia que se aleja "arrastrada" por la expansión del universo se hace también "más grave", o mejor, disminuye su frecuencia. Esto es, la longitud de onda de la luz se hace más larga, lo que

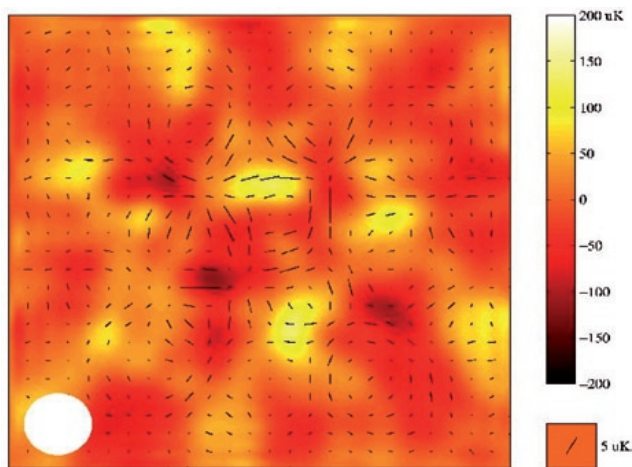


Figura 6. Imagen de la intensidad y polarización de la radiación de fondo obtenida por DASI en una zona del cielo de unos pocos grados de lado. Las diminutas variaciones de la temperatura de la radiación de fondo se muestran en diferentes matices, donde las zonas claras corresponden a zonas más calientes y las oscuras a zonas más frías que la temperatura media. La polarización detectada, a un nivel del 10% de las anisotropías, se evidencia con líneas negras. La longitud de cada una de éstas muestra su amplitud, mientras que la orientación indica la dirección en la cual la radiación está linealmente polarizada. El círculo blanco indica la resolución angular del experimento.

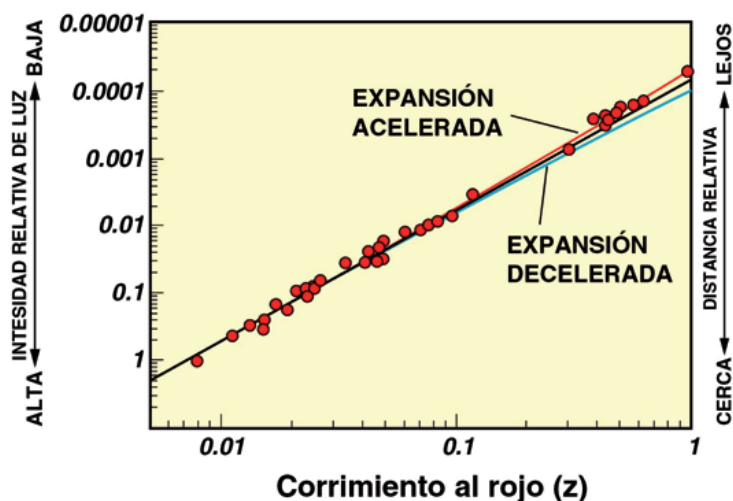


Figura 7. La ley de Hubble para las supernovas de tipo Ia. Este diagrama es análogo al que el célebre astrónomo Edwin Hubble presentara en 1929 para las galaxias más lejanas de la época y que constituyó la primera indicación de la expansión del universo, pilar de la cosmología actual. Muestra que existe una relación aproximadamente lineal en el plano "distancia relativa versus velocidad de recesión". Esto indica que aquellas supernovas de luminosidad más débil (más distantes) poseen un corrimiento al rojo z (o equivalentemente, una velocidad de alejamiento) mayor. Las observaciones han mejorado notablemente en las últimas décadas: las galaxias estudiadas por Hubble ocuparían apenas un pequeño espacio hacia el rincón inferior izquierdo del presente diagrama. Los potentes telescopios actuales permiten alcanzar distancias cada vez mayores y detectar el sutil apartamiento de las tres curvas teóricas para la evolución de nuestro universo: la superior (aceleración), la inferior (desaceleración) y la central (la simple relación lineal de Hubble). Observaciones actuales a alto z (del orden de $z=1$) muestran una preferencia de los datos observacionales a coincidir con la curva correspondiente a una expansión acelerada. La conclusión es que el universo se estaría acelerando suavemente en nuestra época actual.

en cosmología expresamos diciendo que la luz "se corre hacia el rojo".

En la actualidad existe el proyecto de enviar un satélite dedicado a la exclusiva detección de supernovas lejanas con el fin de aumentar en forma sustancial la estadística y verificar fehacientemente las observaciones actuales. Esta misión satelital, llamada SNAP (acrónimo por SuperNova/Acceleration Probe o sonda para el estudio de la aceleración a partir de supernovas), prevé detectar más de 2000 supernovas por año durante tres años de misión, con un corrimiento al rojo de hasta casi $z=2$. De llevarse a cabo proyectos como este, en unos años quizás podríamos conocer con una exquisita precisión el estado exacto de expansión de nuestro universo.

■ LA ACCELERACIÓN CÓSMICA

Aceleración cósmica..., ¿por qué? y ¿cómo explicarlo? Mediciones precisas revelaron que las supernovas la son

más pálidas, y que se hallan en promedio entre un 10 y un 15% más alejadas, de lo que uno esperaría en un universo en desaceleración. Luego, la expansión cósmica se estaría acelerando a las mayores escalas visibles del universo en lugar de desacelerarse debido al frenado gravitatorio.

Esta aceleración cosmológica es difícil de explicar por la sola acción de los constituyentes materiales o de radiación conocidos. Para dar cuenta de estos hallazgos se deben invocar formas de energía no convencionales. La constante cosmológica Λ , introducida por Einstein en 1917, actúa como un componente de energía "repulsiva" (según muchos, ¡en el sentido completo del término!) y es uno de los candidatos para contrarrestar la atracción gravitatoria de la materia ordinaria.

Recordemos que Einstein, muy a su pesar, modificó su teoría original de la relatividad general para lograr obtener un universo estático (conforme a las observaciones de la época y también

a su postura filosófica); la repulsión generada por el "término de constante cosmológica" cumplía la misión.

Pero si lo pensamos fríamente, este tipo de energía es verdaderamente asombroso. Para usar una analogía simple, es como si yo midiese el peso de mi hija Lucila y ¡la balanza me indicara valores negativos! Lo primero que me vendría en mente es ver si no cometí un error. Pero luego de revisar una y otra vez, y no descubrir nada obvio, yo comenzaría a lucubrar sobre soluciones alternativas: ¿no estaría Lucila pesándose con un gran globo de helio en la mano?

Pues bien, en el caso de los resultados de las supernovas, el peso de Lucila es el análogo de la masa cósmica ordinaria, y su globo es el análogo de la constante cosmológica de Einstein. Sin globo, ella siente la aceleración hacia el centro de la Tierra, pero con un globo del tamaño adecuado, su peso sería exactamente compensado y ella se hallaría en ingravidez. Hagamos el globo apenas un poco más grande y Lucila comenzaría a acelerarse hacia arriba.

La constante cosmológica actúa entonces como un término efectivo de energía repulsiva, contrarrestando la tendencia de la materia ordinaria a atraerse gravitacionalmente y hacer colapsar el universo. Pero la incertidumbre teórica es tal, que no existe aún una teoría fundamental que pueda predecir sin ambigüedad su valor actual. Es más, en principio tanto valores negativos como positivos estarían permitidos. Y esto no hace sino complicar aún más las cosas, pues un valor de Λ negativo "ayudaría" a la desaceleración (en la analogía del globo, empujaría a Lucila hacia abajo). En cambio, un valor levemente positivo se "opondría" a la desaceleración (un globo pequeño). Un valor positivo mayor eliminaría completamente todo tipo de aceleración (Lucila comenzaría a despegarse de la balanza) resultando en la solución estática elegida por Einstein en 1917. Finalmente, un valor positivo aún mayor, y el universo y Lucila, comenzarían a acelerarse...

Las observaciones actuales empeoran este rompecabezas pues, como ya lo mencionamos, los datos de las supernovas indican que la contribución de Λ (u otra forma de energía

oscura) debe ser nada menos que del 70% de la densidad crítica. Esto indicaría que la energía oscura es la forma de materia-energía que más abunda en el universo.

Pero esto también nos lleva a otra de las preguntas que más intrigan a los cosmólogos: ¿por qué esta forma de energía domina el universo *justo ahora*? Recordemos que tanto la densidad de la materia no relativista como la de la radiación decrecen con la expansión de universo. Por ejemplo, durante la era de la nucleosíntesis primordial, cuando se formaron los núcleos más livianos, era la radiación la que dominaba. Y tanto la densidad de radiación como la densidad de materia decrecieron muchos órdenes de magnitud desde esos instantes primordiales hasta hoy. Por el contrario, la densidad de energía de la constante cosmológica se mantiene (precisamente) constante en el tiempo. En consecuencia, existe sólo un momento en toda la historia de nuestro universo en el que la contribución de la energía oscura se iguala (aproximadamente) con la contribución de la radiación o con la de la materia. ¿Cómo entonces se da la casualidad de que energía oscura y materia-energía ordinaria posean "casi" la misma

densidad en la actualidad? ¿Es que a la especie humana le ha tocado vivir en una época especial?

Notemos que esta coincidencia podría haber sucedido en cualquier otro momento de la larga historia de nuestro universo. En una analogía de Carl Sagan, nuestro cosmos tiene unos 14 mil millones de años, y si reemplazáramos ese lapso de tiempo por un año ficticio, es decir donde el Big Bang "sucedio" el 1ro de Enero a las 0 horas, los dinosaurios aparecerían recién el 24 de Diciembre, mientras que los primeros humanoides habrían descendido de los árboles tan sólo el 31 de Diciembre a las 19h 20m. ¿Cómo entonces, teniendo casi todo un "año" a su disposición, la energía oscura viene a dominar sobre la energía ordinaria en el "último par de horas" de nuestro año cósmico? De haber sucedido mucho tiempo antes, ¿la imagen de nuestro universo que ahora tenemos sería distinta? ¿Existiría el hombre? Como en efecto existimos, el cosmos no puede ser muy distinto. Pero, ¿qué mecanismo habría podido conducir a semejante coincidencia *antrópica*?

Bien, este tipo de frases es lo que incomoda a la mayoría de los cosmó-

logos de la actualidad. Invocar que ciertos fenómenos observacionales "son como son" sólo por el hecho de que debe existir un observador (como el hombre) para presenciarlos, se aleja de las prácticas usuales de las ciencias predictivas. Obviamente, el tema puede definirse más rigurosamente que como lo hemos hecho aquí, y la discusión de un tal *principio antrópico* lleva ya varios años y muchos más harán falta para determinar su verdadera relevancia en cosmología.

La bautizaron *quintaesencia*, y aquí vemos cómo más de dos mil años no han logrado borrar la influencia de Aristóteles (al menos en lo que hace a su terminología). Los campos de quintaesencia, a diferencia de Lambda, serían variables en el tiempo y tendrían un comportamiento que los haría ajustarse adecuadamente a todas las observaciones de los modelos del Big Bang. En particular, su densidad de energía se ajustaría "naturalmente" a valores comparables con los que indican las observaciones de supernovas, evitando de esta manera el "problema de la coincidencia" mencionado más arriba. Los campos de quintaesencia son hoy en día una atractiva posibilidad, aunque muchos estén aún incómodos también con esta proposición, ya que no existe por el momento una explicación teórica satisfactoria del porqué de su existencia y valor. Esta es una línea de trabajo muy activa en el presente y quizás un poco especulativa; dejaremos los detalles para otra ocasión.

■ FINALE

Apoyándose en los hombros de antiguos pensadores, los cosmólogos comienzan paulatinamente a correr el velo que oculta las semillas primordiales de los mundos y la dinámica del cosmos. Se nos ofrece así una nueva imagen del universo, que sin dudas deberá perfeccionarse en el futuro, pero que nos permite hoy y nos alentará siempre a buscar una visión cada vez más ajustada de la realidad. ¿Cuántas teorías actuales deberemos en el futuro remendar, o directamente desechar? Mucho camino queda por delante, y sólo un estudio científico serio del cosmos nos lo podrá revelar.

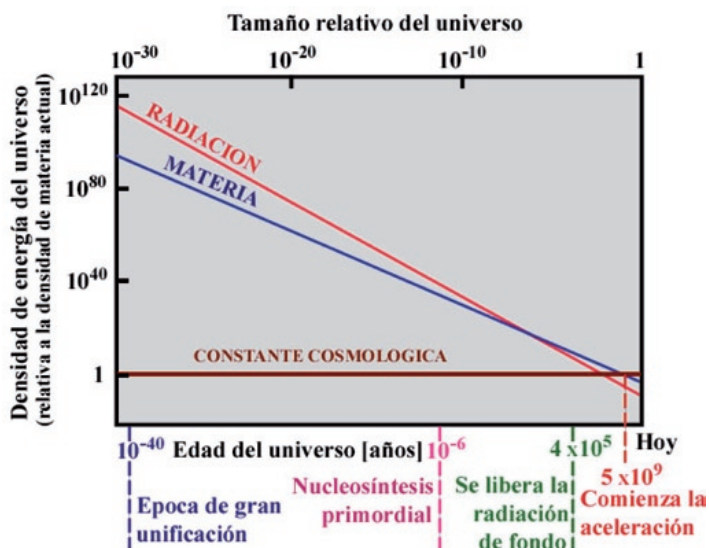


Figura 8. Una "coincidencia cósmica". La figura muestra esquemáticamente la evolución de las densidades de energía correspondientes a la radiación, a la materia no relativista y a la constante cosmológica. Las dos primeras varían por unos 120 órdenes de magnitud durante la casi totalidad de la vida de nuestro universo; la última densidad de energía, sin embargo, se mantiene constante. Uno de los grandes problemas de la cosmología actual es comprender por qué la línea correspondiente a la constante cosmológica cruza a las otras dos sólo en épocas recientes de la vida de nuestro universo.

■ GLOSARIO

Neutrino: (Fino, liviano, del Griego "leptos"). Partícula elemental eléctricamente neutra de la familia de los leptones muy liviana (hasta hace poco tiempo se pensaba que no tenía masa) y muy débilmente interactuante (sujeta solo a la interacción nuclear débil).

Año-luz: Es una medida astronómica de distancia, equivalente al recorrido de la luz en el vacío en un año (estrictamente, un año juliano de 365,25 días). Equivale a unas 63.241 unidades astronómicas y unos 9,5 billones de kilómetros ($9,46 \times 10^{12}$ km).

Enana blanca: Es una estrella pequeña, de débil luminosidad, densa y

"moribunda" (en las etapas finales de su evolución) que ha consumido la totalidad de su combustible nuclear y lentamente se va perdiendo de vista. Las estrellas cuya masa está por debajo de 1,4 veces la masa del Sol, se convierten normalmente en enanas blancas hacia el final de sus vidas. Una enana blanca típica es fría y densa, y cuenta con el 60% de la masa solar, pero es de tamaño apenas mayor que la Tierra. Son estrellas muy comunes: un 10% de las estrellas de nuestra galaxia serían de este tipo. La más cercana es Sirio B, a unos 8,7 años-luz de distancia. Ninguna es visible sin telescopio.

■ BIBLIOGRAFÍA

- Barrow, J. y Tipler, F. (1986). *The anthropic cosmological principle*, Oxford University Press.
- Gangui, A. (2005). *El Big Bang: la génesis de nuestra cosmología actual*, Editorial EUDEBA, Buenos Aires.
- Gangui, A. (2010). *No "explosion" in Big Bang cosmology*, in Proceedings of the Symposium 260, Valls-Gabaud, D. y Boksenberg, A. (eds), Cambridge University Press, IAU Symposia series (in press).
- Levinas, M. (1996). *Las imágenes del universo*, Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires.
- Núñez, C. (1997). *Notas celestes: un viaje por la Vía Láctea*, Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires.
- Weinberg, S. (1997) *Los tres primeros minutos del universo*, Alianza, Madrid.



CON TU AYUDA PODEMOS RESOLVERLO


Colaborá desde tu lugar con la Fundación Instituto Leloir para que investiguemos el cáncer, el Alzheimer, el dengue y el infarto, entre otras enfermedades. Sumate ahora con tu donación mensual de \$12 o más con tu tarjeta de crédito, para que juntos lleguemos a resolver problemas que nos afectan a todos. Ayudanos a que la ciencia argentina siga avanzando.

DONÁ DESDE \$12 X MES

www.leloir.org.ar
o al (011) 5238-7505



INSTITUTO LELOIR
FUNDACIÓN




INSTITUTO LELOIR
FUNDACIÓN

60 años produciendo conocimiento de excelencia

- 22 laboratorios en los que trabajan 170 investigadores, becarios y estudiantes.
- Repatriación de científicos argentinos.
- Evaluación trienal externa del desempeño de los investigadores.
- Biblioteca Nacional de Referencia en Bioquímica.
- Primera Agencia de Noticias Científicas y Tecnológicas Argentina.
- Convenios de vinculación tecnológica.

Av. Patricias Argentinas 435, Buenos Aires. (54-11) 5238-7500, www.leloir.org.ar



Retinopatía diabética

Mecanismos básicos y avances terapéuticos

Palabras clave: retinopatía diabética, factor de crecimiento del endotelio vascular (VEGF), angiogénesis
Key words: Diabetic retinopathy, vascular endothelial growth factor (VEGF), angiogenesis

La retinopatía diabética constituye una de las principales causas de ceguera a nivel mundial, constituyendo una de las complicaciones importantes en el paciente diabético. Conocer los factores de riesgo que pueden alterar su desarrollo, como un adecuado control de la presión arterial, contribuyen a atenuar dicha patología. El mantenimiento adecuado de la concentración de la glucosa en sangre de un paciente diabético retrasa el progreso de esta enfermedad y disminuye la manifestación de la enfermedad. No existen hasta el momento medicamentos eficaces para detener el progreso de esta patología. No obstante, gracias a nuevas técnicas aplicadas con el fin de dilucidar mecanismos básicos de este desorden metabólico, han dado lugar a la elucidación de numerosos factores que implicados en el desarrollo de la enfermedad, convirtiéndose en nuevos blancos terapéuticos.

■ **Gabriela Bravo,**
Carolina Flumian,
Martín Gómez y
Gabriela Levy

IBYME-CONICET. Laboratorio de Patología y Farmacología Molecular.
bravogabrielab@gmail.com

■ INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de digestión, los alimentos se procesan dando lugar a la liberación de glucosa, entre otros compuestos, la cual pasa a la sangre. La insulina, secretada por el páncreas, es la hormona encargada de facilitar la entrada de glucosa a las células del organismo para suministrar energía. La diabetes mellitus es un desorden crónico del metabolismo, causado por una baja producción de insulina (diabetes tipo I), o por su inadecuado uso

por parte del organismo (diabetes tipo II), ambos casos caracterizados por un aumento de los niveles de glucosa en sangre (hiperglucemia). En general, la diabetes causa diversas complicaciones, dañando frecuentemente al sistema ocular, renal, nervioso y vascular. Según un estudio realizado en el 2007, alrededor de 200 millones de personas padecen de diabetes y este número se espera que se duplique hacia el 2030 (Wild S. et al, 2007).

La retinopatía diabética (RD), complicación más frecuente de la diabetes, es

la principal causa de ceguera en países desarrollados. La misma se produce como consecuencia del daño de los vasos sanguíneos de la retina, tejido ubicado en la región posterior del interior del ojo, encargado de transformar la luz en señales nerviosas que son enviadas al cerebro (Ver Figura 1). Aproximadamente un 75% de los pacientes diabéticos muestran síntomas clínicos de retinopatía dentro de los 15 años de aparición de la diabetes, y más del 10% desarrollan discapacidad visual durante dicho período (Sjolie AK. et al, 1997).



Figura 1. Ejemplo de la visión de un paciente con retinopatía diabética (http://www.clinicadeojos.com.pe/imagen_retinopatia_diabetica.jpg).

■ MECANISMOS MOLECULARES INVOLUCRADOS EN LA RD

La hiperglucemia sostenida durante la diabetes induce una serie de cambios bioquímicos en la pared vascular, los cuales son responsables de la aparición de microangiopatías en la retina. Los mecanismos moleculares por los cuales se generan estos cambios no se encuentran aún bien definidos. Sin embargo, se ha sugerido que varias vías metabólicas están asociadas con la hiperglucemia y las complicaciones microvasculares. Entre ellas, las más importantes involucran el aumento de la actividad de la proteína quinasa C en la retina (PKC), la glicosilación no enzimática de proteínas que llevan a la formación de productos terminales de la glicación avanzada (AGEs), la acumulación de polioles, el daño oxidativo y diversas vías en las cuales participan factores del crecimiento celular.

Rol de la activación de PKC. El incremento de la actividad de varias isoformas de la PKC influye en la patogénesis de la RD (Ways DK. et al, 2000). La activación de PKC ocular, causa cambios celulares, los cuales generan un aumento en la permeabilidad de los vasos retinianos, alteraciones en el fluido sanguíneo de la retina y señalización celular a través del factor de crecimiento del endotelio vascular (VEGF). Esto último lleva a la formación de nuevos vasos sanguíneos o a la ramificación de vasos pre-existentes, proceso conocido como neovascularización (Xia P. et al, 1996).

Rol de AGEs. La hiperglucemia en pacientes diabéticos puede generar la formación de AGEs a través de glicosilaciones no enzimáticas de diversas proteínas. Estudios *in vivo* demostraron que la acumulación de AGEs se asocia con la formación de microaneurismas, y que el tratamiento con inhibidores de la formación de AGEs reducen el daño vascular de la retina (Wautier JL. et al, 2001).

Rol de la acumulación de polioles. Estudios experimentales demostraron que la acumulación de polioles en animales de experimentación, provoca cambios similares a los que se observan en humanos que padecen RD (Engerman RL. et al, 1984). En presencia de concentraciones aumentadas de polioles, se generan altos niveles de sorbitol a través de la actividad de la enzima aldosa reductasa. Se cree que este aumento en la concentración de sorbitol produce daño osmótico en la vasculatura de la retina (Gabbay KH. et al, 1975).

Daño oxidativo. La hiperglucemia y las vías bioquímicas mencionadas anteriormente, pueden generar la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS), las cuales producen estrés oxidativo y daño en los vasos de la retina. Ensayos *in vitro* demostraron que el aumento de los niveles de ROS se vincula con un aumento en la producción del VEGF (Obrosova IG. et al, 2001). Los mecanismos por los cuales ocurre este proceso aún no han sido completamente dilucidados. Estudios en animales y en humanos también sugieren que el tratamiento con antioxidantes, como la vitamina E, pueden prevenir algunos de

los daños vasculares asociados con la diabetes (Kunisaki M et al, 1995).

Rol de factores de crecimiento. Diversos estudios han demostrado la importancia de una serie de factores inductores del crecimiento celular en el desarrollo de cambios estructurales de la vasculatura de la retina, como el aumento de la permeabilidad vascular, la isquemia y la neovascularización ocular (Aiello LP. et al, 1994). Entre estos factores se encuentran el VEGF, el factor de crecimiento de tipo insulina 1 (IGF-1), el factor de crecimiento transformante β y el factor derivado del epitelio pigmentario.

■ ETAPAS CLÍNICAS DE LA RD

La retina es particularmente vulnerable al daño microvascular, debido a su alta demanda metabólica y de oxígeno, y a su dependencia de la integridad de la barrera hemato-retiniana. En la RD, el daño es causado tanto por fugas microvasculares provenientes de la rotura de la barrera hemato-retiniana interna como por la oclusión microvascular. Un resumen de los estados de la RD se muestra en la Tabla 1.

Existen dos tipos o etapas de la retinopatía: no proliferativa y proliferativa. **La retinopatía diabética no proliferativa (RDNP)**, se desarrolla primero y se caracteriza por hemorragias, filtración y exudados de la retina. En esta fase, la reducción de la agudeza visual puede ser moderada o nula, excepto cuando aparece edema de la mácula, o cuando los exudados y las hemorragias se localizan en esta región, como se menciona más adelante. Como la retina requiere altos niveles de oxígeno para su funcionamiento normal, los capilares son abundantes en las capas superficiales de la misma. En el desarrollo temprano de la enfermedad, y como consecuencia del aumento de la permeabilidad vascular inducido por factores como PKC y VEGF, los vasos sanguíneos en el ojo se vuelven más grandes constituyendo los microaneurismas. Éste es el primer síntoma clínicamente detectable de la RD. Los microaneurismas permiten la filtración del plasma hacia dentro de las capas de la retina, generando un edema y exudados entre las capas superficiales de la retina. Los exudados pueden ser

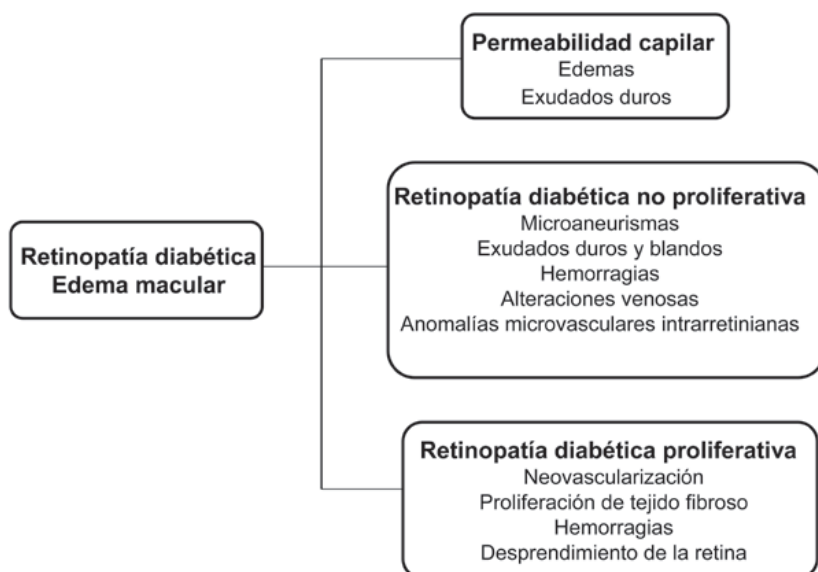


Tabla 1. Evolución de la retinopatía diabética.

duros o blandos. Los primeros son el resultado de la precipitación de lipoproteínas y otras proteínas que circulan por los vasos retinianos que se encuentran perforados en la RD. Éstos pueden invadir la mácula afectando la visión. Los exudados blandos, en cambio, provocan engrosamientos isquémicos de la capa de fibras nerviosas y producen el bloqueo de los vasos sanguíneos retinianos.

La etapa más severa y avanzada de la retinopatía, o **retinopatía diabética proliferativa (RDP)**, se caracteriza por la neovascularización del ojo como consecuencia del daño de la vasculatura producido en la RDNP. Este proceso ocurre tanto por mecanismos de vasculogénesis como por angiogénesis. El primero consiste en la formación de

novo de vasos sanguíneos, mientras que el último se inicia a partir de vasos pre-existentes en respuesta a estímulos normales o patológicos. Específicamente, la vasculatura de la retina responde a la hipoxia local con el fin de reperfundir las áreas de isquemia (Afzal A. et al, 2007).

Los nuevos vasos sanguíneos que se generan en esta etapa son frágiles, y crecen sobre la superficie de la retina, impidiendo el suministro de sangre a la misma. Además, la fragilidad de los mismos causa hemorragias, tanto en la retina como en otras áreas del ojo, como se observa en la Figura 2. La presencia de sangre en el humor vítreo, que es una sustancia gelatinosa que ocupa el compartimiento posterior del ojo, dificulta el paso de luz hacia la

retina. Una pequeña cantidad de sangre causa manchas flotantes, mientras que una hemorragia grande puede bloquear completamente la visión, permitiendo sólo la percepción de luz y oscuridad. Otra alteración que puede encontrarse en esta etapa es el desprendimiento de la retina debido a las cicatrices que produce la neovascularización en la superficie de ese tejido (Penn JS. et al, 2008).

El **edema macular (EM)** es una enfermedad relacionada con la RD, que se produce por una acumulación de líquido en la mácula, la cual es la zona más sensible de la retina. Es la causa más común de pérdida de visión central en la RD, y puede presentarse en cualquiera de sus etapas. Asimismo, el bloqueo de los capilares en este tejido generado por los exudados puede causar hipoxia localizada, disparando un aumento de la producción de factores pro-angiogénicos, incluyendo al VEGF. La liberación de estos factores da lugar a la pérdida de las uniones de células endoteliales vasculares, lo que genera nuevamente un incremento de la permeabilidad vascular, generando pequeñas cantidades de sangrados (hemorragias retinianas), y permitiendo el escape de líquido hacia la retina.

■ **INFLAMACIÓN VASCULAR**

Actualmente, existe evidencia que indicaría que la RD exhibe características compatibles con una enfermedad inflamatoria crónica. La misma se caracteriza por la presencia de angiogénesis, de tejido fibrovascular en consecuencia

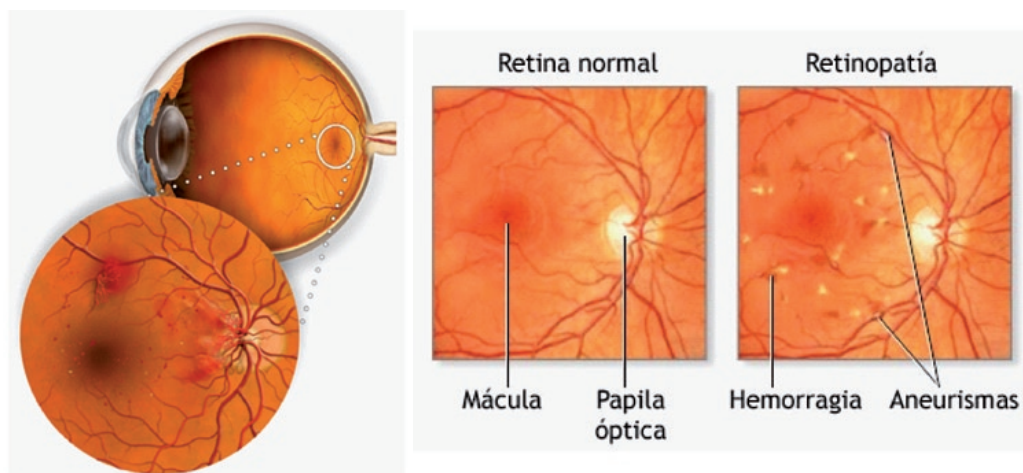


Figura 2. Retinopatía diabética proliferativa. El crecimiento de nuevos vasos sanguíneos frágiles dentro del ojo provoca el sangrado. Esto lleva a la pérdida progresiva de la visión debido a las hemorragias, a la formación de tejido cicatrizado, y finalmente, al desprendimiento de la retina (<http://www.seewithlasik.com/docs/diabetic-retinopathy.shtml>).

a la reparación del daño tisular, y de infiltrado de monocitos, linfocitos y células plasmáticas, y se produce por la persistencia de los agentes inflamatorios y la respuesta del organismo prolongada en el tiempo tendiente a eliminar los mismos. Particularmente en la RD, junto con el sangrado de los nuevos vasos, ocurre una reacción inflamatoria local con formación de tejido fibrovascular. Además, como se describió anteriormente, dentro de los cambios vasculares tempranos se encuentran el aumento de la permeabilidad vascular y la formación de microaneurismas, procesos asociados a un aumento de los niveles del VEGF. Los cambios tardíos son causados por un incremento de los mediadores inflamatorios locales, entre los que se incluye la molécula de adhesión leucocitaria ICAM-1 (Joussen AM. et al, 2004). Esta proteína pertenece a una familia de moléculas de adhesión involucrada en el reclutamiento de las células efectoras de la respuesta inmune, denominados leucocitos. Diversos estudios han demostrado que VEGF requiere de ICAM-1 para inducir cambios vasculares tempranos en la diabetes experimental. El aumento de la expresión de ICAM-1 en la retina coincide con el incremento de leucocitos en la vasculatura de la retina de pacientes diabéticos (McLeod et al, 1995). Ratones deficientes en los genes que codifican para ICAM-1, mostraron disminución de leucocitos adheridos a la vasculatura de la retina, así como de células endoteliales de la retina dañada (Joussen AM. et al, 2004). Estos datos y otros sugieren que la inflamación subclínica crónica generada por el sistema inmune en respuesta al sangrado de los vasos sanguíneos, jugaría un rol activo en la inducción de varias lesiones vasculares observadas en pacientes con RD. Más aún, la inflamación crónica es considerada un patrón constante del entorno hiperglucémico, observándose también evidencia de inflamación en muestras clínicas de pacientes con RD (Meleth AD. et al, 2005).

■ PARTICIPACIÓN DEL VEGF EN LA RD

El bloqueo de la función del VEGF puede prevenir el aumento de la permeabilidad inducida por diabetes,

tanto en pacientes como en modelos animales, lo que demuestra el rol directo de este factor en la RD (Miller JW. et al, 1997). Sin embargo, debido a las diversas funciones del VEGF, tanto como soporte neuronal, así como también promotor de la integridad de las células endoteliales, las acciones de los fármacos anti-VEGF pueden tener efectos no deseados. Un mejor entendimiento de los eventos moleculares específicamente vinculados con el aumento patológico de la expresión de VEGF es de fundamental importancia para el desarrollo de nuevas herramientas farmacológicas para regular la expresión del VEGF en la retina diabética.

Durante la diabetes, la ruptura de la barrera hemato-retiniana ocurre al nivel del endotelio vascular. La permeabilidad inducida por VEGF resulta de la interrupción de uniones célula-célula endotelial por iniciación de una cascada de actividades proteolíticas en la superficie celular. Esto altera las uniones célula-célula y célula-matriz celular, generando sitios de ramificación de los vasos sanguíneos debido al crecimiento de células endoteliales a través de la membrana basal, lo que provoca la neovascularización de la retina (Miller JW. et al, 1997).

La expresión genética de VEGF es un proceso finamente regulado. Su sobre-expresión tiene consecuencias patológicas graves en una gran variedad de enfermedades (Miller JW. et al, 1997). Como hemos visto hasta ahora, en la retina diabética son muchos los factores que pueden contribuir a la sobre-expresión de VEGF, incluyendo al factor inducible por hipoxia (HIF-1), factores de crecimiento como el factor de crecimiento 1 (IGF-1), el factor de necrosis tumoral alfa (TNF- α), el factor de crecimiento transformante beta (TGF- β), AGEs y las ROS, todos ellos incrementados en la diabetes (Penn JS. et al, 2008). Los mecanismos por los cuales estos factores contribuyen a la sobre-expresión del VEGF en la retina no se encuentran aún dilucidados. Sin embargo, en un estudio se observó como las ROS inducen la transcripción de VEGF por un proceso que involucra la actividad del transductor de señal y activador de la transcripción 3 (STAT3), un factor implicado en la estimulación

de la angiogénesis, que es estimulado por vías inflamatorias (Al-Shabrawey M. et al, 2008). Asimismo, el VEGF induce la activación de STAT3 promoviendo su expresión autocrina en las células endoteliales de la retina (Bartoli M. et al, 2000).

Por otro lado, la importancia de los eventos de regulación post-transcripcional en la regulación del VEGF en condiciones normales y patológicas se encuentra bien establecida (Penn JS. et al, 2008), pero aún no se determinó si estos mecanismos están involucrados en la sobre-expresión de VEGF inducida en condiciones de hiperglucemia. El término VEGF abarca a varias proteínas pertenecientes a dos familias, que son el resultado del splicing alternativo del ARN mensajero de un único gen de VEGF con 8 exones. Las dos familias diferentes se nombran de acuerdo con el sitio de empalme del exón terminal. Si se une al sitio de empalme proximal se denomina VEGFxxx, y si lo hace en el sitio de empalme distal se denomina VEGFxxx_b. El sitio de "splicing" terminal determina si las proteínas son pro-angiogénicas o anti-angiogénicas. Las isoformas que se encuentran en humanos son VEGF₁₂₁, VEGF_{121b}, VEGF₁₄₅, VEGF₁₆₅, VEGF_{165b}, VEGF₁₈₉ y VEGF₂₀₆. Las distintas isoformas del VEGF juegan roles diferentes en la retinopatía y, por ejemplo, la variante VEGF₁₆₅ es un potente inductor de la inflamación vascular de la retina, como también mediador de la supervivencia de células nerviosas, mientras que VEGF₁₂₁ promueve la supervivencia neuronal sin inducir inflamación vascular (Nishijima K. et al, 2007).

La expresión de VEGF se ha descrito principalmente como un evento paracrino, pero la habilidad autocrina del VEGF de estimular su propia producción en el endotelio vascular ha sido observada en hipoxia, tumores cerebrales, o durante la angiogénesis *in vitro* inducida por los AGEs (Penn JS. et al, 2008). El rol de la expresión autocrina de VEGF en la RD no se conoce aún, pero se cree que el crecimiento patológico de la microvasculatura de la retina observado durante la diabetes, se debería en parte al VEGF que induciría su propia sobre-expresión.

■ TERAPIAS EN USO Y EN DESARROLLO

En ensayos clínicos controlados se ha observado que la terapia clínica que provee un mantenimiento de los niveles de glucosa en sangre cercanos a los niveles normales, retarda significativamente el desarrollo de la RD, tanto en pacientes con diabetes de tipo 1 como de tipo 2. Además, el control de la presión sanguínea y de lípidos parece retrasar la progresión de la RD (Frank RN. et al, 2004). Desde el punto de vista oftalmológico, la prevención se basa en una detección precoz de la RD y un adecuado seguimiento. Para ello, se realizan estudios de fondo de ojo u oftalmoscopia de acuerdo al estado del paciente, y existen actualmente técnicas como la tomografía de coherencia óptica (OCT) que permite conocer la etapa en la que se encuentra la enfermedad. Sin embargo, estos controles son difíciles de lograr en varios pacientes, por lo que la retinopatía se desarrolla eventualmente durante la evolución de la diabetes, requiriendo de tratamientos eficaces para combatirla, los cuales se mencionan en la Tabla 2.

Métodos actuales para la prevención o tratamiento de la retinopatía diabética																											
Control	Niveles de azúcar en sangre Niveles de lípidos en sangre Presión sanguínea Oftalmoscopia Tomografía de coherencia óptica																										
Tratamientos clínicos actualmente en uso	Fotocoagulación láser Vitrectomía																										
Tratamientos en estudio o fase clínica	<table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>Estado actual</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Acetonido de triamcinolona</td> <td>Ensayo clínico randomizado completo</td> </tr> <tr> <td>Implante intravítreo de triamcinolona</td> <td>Fase I completa</td> </tr> <tr> <td>Becacizumab</td> <td>Ensayo clínico randomizado completo</td> </tr> <tr> <td>Ranibizumab</td> <td>Continúa fase III</td> </tr> <tr> <td>Pegaptanib</td> <td>Fase II completa</td> </tr> <tr> <td>Trampa de VEGF</td> <td>Fase I completa</td> </tr> <tr> <td>Sirolimus</td> <td>Continúa fase II</td> </tr> <tr> <td>Bevasiranib</td> <td>Fase II completa</td> </tr> <tr> <td>Nepafenac</td> <td>Serie de casos clínicos completo</td> </tr> <tr> <td>Etanercept</td> <td>Estudio piloto completo</td> </tr> <tr> <td>Ruboxistaurin</td> <td>Ensayo clínico randomizado completo</td> </tr> <tr> <td>Fenofibrato</td> <td>Ensayo clínico randomizado completo</td> </tr> </tbody> </table>		Estado actual	Acetonido de triamcinolona	Ensayo clínico randomizado completo	Implante intravítreo de triamcinolona	Fase I completa	Becacizumab	Ensayo clínico randomizado completo	Ranibizumab	Continúa fase III	Pegaptanib	Fase II completa	Trampa de VEGF	Fase I completa	Sirolimus	Continúa fase II	Bevasiranib	Fase II completa	Nepafenac	Serie de casos clínicos completo	Etanercept	Estudio piloto completo	Ruboxistaurin	Ensayo clínico randomizado completo	Fenofibrato	Ensayo clínico randomizado completo
	Estado actual																										
Acetonido de triamcinolona	Ensayo clínico randomizado completo																										
Implante intravítreo de triamcinolona	Fase I completa																										
Becacizumab	Ensayo clínico randomizado completo																										
Ranibizumab	Continúa fase III																										
Pegaptanib	Fase II completa																										
Trampa de VEGF	Fase I completa																										
Sirolimus	Continúa fase II																										
Bevasiranib	Fase II completa																										
Nepafenac	Serie de casos clínicos completo																										
Etanercept	Estudio piloto completo																										
Ruboxistaurin	Ensayo clínico randomizado completo																										
Fenofibrato	Ensayo clínico randomizado completo																										

Tabla 2. Métodos de prevención y tratamiento de la retinopatía diabética.

LÁSER

La fotocoagulación láser es el tratamiento recomendado para la RDP avanzada y para los casos de EM (Frank RN. et al, 2004). Este tratamiento funciona destruyendo el tejido retiniano y, por lo tanto, disminuyendo la demanda metabólica, bajando la hipoxia retiniana y la expresión de VEGF. Es importante saber que la fotocoagulación láser no recupera la visión perdida, sólo impide un deterioro mayor, por lo cual es imperativo el diagnóstico temprano de la RD para que no haya gran pérdida de la visión. Aunque la terapia efectuada en etapas relativamente tempranas de la enfermedad es efectiva en la mayoría de los pacientes, la pérdida de tejido de la retina puede disminuir la visión periférica, afectar la visión nocturna y cambiar la percepción del color. Más aún, debido a que persiste el problema de fondo que es la diabetes, la retinopatía ocasionalmente, progresa a pesar del tratamiento adecuado. Por lo tanto, es de gran importancia la búsqueda de nuevas terapias para prevenir y tratar la RD.

VITRECTOMÍA

Como se describió anteriormente, en la RDP se produce sangrado en la cavidad interna del ojo. Esta hemorragia suele aclararse con el tiempo de manera espontánea en la mayoría de los casos. Sin embargo, de no ocurrir esto se aconseja realizar un procedimiento quirúrgico, denominado vitrectomía, para remover la gelatina vítrea llena de sangre y, de esta forma, mejorar la visión. Este procedimiento también se utiliza para eliminar el tejido cicatrizado que se genera en los casos donde ocurre desprendimiento de retina.

AGENTES LOCALES

Corticosteroides

La aplicación intravítrea de corticosteroides, como acetónido de triamcinolona, se asocia con una mejora visual del EM en varios ensayos clínicos randomizados (Schwartz SG. et al, 2009). Se cree, puede tener beneficios cuando se los aplica a pacientes tratados con fotocoagulación láser. Las complicaciones

más comunes de este procedimiento son la formación de cataratas y el aumento de la presión intraocular, pero en la mayoría de los casos parecen ser manejables. La etiología de la respuesta a los esteroides no se conoce aún y no hay en la actualidad datos disponibles acerca de la indicación clínica de este tratamiento.

Para facilitar el tratamiento a largo plazo del EM, se están estudiando varios corticoides de liberación prolongada. Entre ellos se encuentran los sistemas de liberación sostenida, como el implante intravítreo de liberación del corticosteroide triamcinolona que se encuentra actualmente en fase clínica II. Otro implante estudiado es el del potente corticosteroide acetónido de fluocinolona, compuesto utilizado en dermatología para reducir la inflamación de la piel en el tratamiento del prurito. Este sistema, creado por los laboratorios farmacéuticos de Bausch & Lomb, fue diseñado para el tratamiento de inflamación ocular no infecciosa que afecta el segmento posterior del ojo, y se encuentra aprobado por la FDA para tal

fin. Sin embargo, la fase clínica III realizada en pacientes con EM mostró altas tasas de eventos adversos importantes, incluyendo glaucoma, por lo cual se están estudiando otras tecnologías en el sistema de implante y/o en las drogas para tratar esta patología. Actualmente, una versión de menor tamaño del acétonido de fluocinolona se encuentra en fase clínica III.

Antagonistas de VEGF

Como se describió anteriormente, el VEGF posee un rol importante en la RD, por lo que varios fármacos que poseen como blanco este factor son extensamente estudiados para el tratamiento de enfermedades que promueven la angiogénesis. Pegaptanib (*Magugen, Eyetech*) un aptámero que se une a la isoforma 165 del VEGF, y Ranibizumab (*Lucentis, Genentech*) un fragmento Fab de anticuerpo humanizado recombinante que se une a todas las isoformas de VEGF, son dos drogas aprobadas por la FDA para el tratamiento de la degeneración macular asociada a la edad (Penn JS. et al, 2008). El inconveniente que poseen estas drogas es que son moléculas grandes y complejas, limitadas por su aplicación invasiva intravítrea, y que la recurrencia de la neovascularización en la diabetes requiere inyecciones intravítreas frecuentes que acarrear altos costos. Por otro lado, a diferencia del tratamiento con corticoesteroides, no se observó el riesgo del aumento de la presión intraocular y de la formación de cataratas con el uso de estos fármacos.

Una opción más económica y disponible, también aprobada por la FDA para el tratamiento del cáncer colorectal metastásico y para el cáncer de mama metastásico, es Bevacizumab (*Avastin®, Genentech*), un anticuerpo humanizado recombinante contra todas las isoformas del VEGF. Ha ganado gran aceptación por cirujanos oftalmólogos para el uso "off label" en pacientes con neovascularización corneal como consecuencia de la RD (Cunningham ET. et al, 2005). El tratamiento con este fármaco está asociado con mejoras a corto plazo tanto en la agudeza visual de pacientes con EM como en las hemorragias intravítreas de pacientes con RDP. Requiere dosis repetidas, y el tiempo para observar resultados significativos se encuentra entre las 3 y 12 semanas. En pocos

casos se observaron efectos secundarios producidos por el uso del Bevacizumab, y los mismos fueron relacionados con el procedimiento de aplicación y no con la droga. Los estudios realizados hasta la fecha indican que el fármaco es de gran utilidad cuando se aplica en combinación con el tratamiento de fotocoagulación láser. Igualmente, la seguridad y eficacia de esta droga en el tratamiento del EM y de la RD no han sido aún establecidas y, como se mencionó anteriormente, el uso de la misma en estas patologías permanece "off label" (Schwartz SG. et al, 2009).

Actualmente, otros compuestos con actividad anti-VEGF están siendo estudiados como potenciales tratamientos de la RD. Aflibercept (Regeneron), también conocido como trampa de VEGF, es una proteína de fusión recombinante contra todas las isoformas del VEGF y contra el factor de crecimiento de la placenta. Este compuesto ha demostrado eficacia a corto plazo en el tratamiento del EM en ensayos clínicos de fase I. Sirolimus o rapamicina (Rapamune) es un agente inmunosupresor aislado de *Streptomyces hygroscopicus*, una bacteria actinomicética que inicialmente se estudió como antifúngico y que luego se descubrió su actividad antitumoral e inmunosupresora en modelos animales. Este compuesto posee actividades anti-VEGF, inhibiendo la neovascularización de la retina en modelos animales. Otro compuesto que se encuentra en fase clínica II es el Bevasiranib (OPKO), que es una molécula de RNA de interferencia con actividad anti-VEGF (Schwartz SG. et al, 2009).

Por otra parte, es de gran consideración los efectos secundarios que pueden generar las terapias anti-angiogénesis, no sólo en la vasculatura ocular sana, sino sus posibles efectos sistémicos. Debido a que el VEGF es un factor de supervivencia de todas las células endoteliales, la pérdida del mismo puede resultar en una incapacidad de la vasculatura residente para proliferar en respuesta a daño, y para mantener la morfología endotelial normal. Si las drogas alcanzan la circulación sistémica a través del humor vítreo, podrían bloquear al VEGF e interferir con la movilización de las células madre de la médula ósea. Con el objeto de lograr una terapia eficaz, se requiere un mayor

conocimiento de los eventos moleculares que se encuentran vinculados específicamente con el aumento patológico de la expresión del VEGF.

Otros agentes anti-inflamatorios

Además de los corticoesteroides, varios agentes anti-inflamatorios se encuentran en investigación para su uso en el tratamiento de la RD. Entre ellos, el Nepafenac (*Nevanac*), una droga anti-inflamatoria no esteroidea de aplicación tópica aprobada por la FDA, y el Etanercept (*Enbrel*), una proteína de fusión recombinante con actividad anti TNF- α , que ha sido aprobada por la FDA para el tratamiento de la psoriasis. Ambas drogas demostraron ser eficaces a corto plazo contra la RD en modelos animales. Sin embargo, no hay aún datos disponibles sobre ensayos clínicos de estos agentes (Schwartz SG. et al, 2009).

AGENTES SISTÉMICOS

Inhibición de PKC

En la diabetes se incrementa la formación de ROS a través de diversas vías. Una de ellas incluye a la activación de PKC en células endoteliales de la retina, que activa a la NADPH oxidasa y, por ende, la expresión de VEGF. La subunidad beta de la PKC puede ser importante en la patogénesis de la RD. A partir de ensayos clínicos en pacientes con RD se observó que un antagonista de PKC- β conocido como Ruboxistaurin (*Arxxant*) redujo la pérdida de la visión, la necesidad de tratamiento láser y la progresión del EM, mientras que aumenta la incidencia de mejoras visuales en pacientes con RDNP (Aiello LP. et al, 2006). Sin embargo, esta droga no se encuentra aprobada aún por la FDA para el tratamiento de la RD.

Fenofibrato

El fenofibrato es una sustancia derivada del ácido fíbrico que se utiliza como un agente modificador de lípidos. Su mayor acción es disminuir los niveles de triglicéridos del plasma, pero también reduce los niveles de colesterol LDL y aumenta los niveles de colesterol HDL. Estudios clínicos mostraron que los pacientes tratados con fenofibrato requieren menos tratamiento de fotocoagulación láser que los pacientes control. Sin

embargo, el pobre conocimiento actual acerca del mecanismo involucrado en el efecto benéfico de esta droga en el tratamiento de la RD puede limitar su impacto potencial en la práctica clínica (Schwartz SG., 2009).

Antioxidantes

Se encuentra bien establecido el rol del estrés oxidativo en la RD, como hemos visto anteriormente. Más aún, se ha demostrado que antioxidantes, como la vitamina E, previenen algunas de las disfunciones vasculares asociadas con la diabetes en modelos animales (Kunishi M. et al, 1995). En un estudio clínico, el tratamiento con altas dosis de vitamina E durante cuatro meses logró revertir las alteraciones en el fluido de sangre retiniano inducidas por la diabetes (Bursell SE. et al, 1999). Sin embargo, se requiere una definición más precisa de oxidantes inducidos por la diabetes, y sus blancos moleculares, con el fin de desarrollar tratamientos más efectivos. Los suplementos antioxidantes no se utilizan aún como práctica de rutina.

TRATAMIENTOS APLICADOS EN LA ARGENTINA

Actualmente, en nuestro país los métodos utilizados por los oftalmólogos para el tratamiento de la RD son la fotocoagulación láser, en el caso de la RDNP, y la técnica quirúrgica denominada vitrectomía, para la etapa proliferativa de la enfermedad. Si la RD se diagnostica en sus etapas tempranas, la fotocoagulación láser puede detener el daño. Sin embargo, estos procedimientos están orientados a frenar el avance de la enfermedad sin mejorar la visión. En combinación con estos tratamientos, existen casos en los cuales se aplican inyecciones intraoculares de Bevacizumab, con el objetivo de frenar la angiogénesis ocular. Este fármaco fue aprobado por la FDA y por la ANMAT para el tratamiento del cáncer colorrectal metastásico y de cáncer de mama metastásico. Posteriormente se comenzó a utilizar en inyecciones intraoculares para el tratamiento de la degeneración macular relacionada con la edad, y los resultados de múltiples estudios internacionales han demostrado el efecto beneficioso de este procedi-

miento. Si bien aún no ha sido aprobado por la ANMAT para su utilización en enfermedades oculares, el Bevacizumab se utiliza bajo el concepto de "off label". En estos casos, siempre que el paciente sea informado de la situación y de los posibles riesgos potenciales conocidos, y considerando que las dosis que se aplican para el tratamiento ocular son menores que para las patologías en las cuales el uso del fármaco se encuentra aprobado por la ANMAT, puede realizarse el tratamiento con el Bevacizumab con la previa aceptación de los Comités de Ética de Medicina.

CONCLUSIONES GENERALES

Una de las características de la diabetes miellitus es que el paciente permanece asintomático durante un extenso periodo pero en pocos meses la enfermedad puede manifestarse de manera descontrolada. Es por ello que resulta fundamental realizar un diagnóstico temprano de la RD, con objeto de comprobar los daños que pueden producirse en el ojo, para evitar las consecuencias de ésta patología, que puede ser motivo de ceguera. La diabetes es una enfermedad que permite que el paciente se involucre en el control, y por ende en la prevención de sus probables complicaciones, razón por la cual es de gran importancia la información que poseen las personas que padecen esta patología. Con respecto a la prevención, lo más importante es el control de los niveles de glucosa sanguíneos y otros análisis complementarios y, en aquellos casos en los que el tejido neuronal y los vasos aún no se encuentran alterados, el control semestral del fondo de ojo es fundamental para controlar una futura progresión de la enfermedad. Además, existe tecnología sofisticada, como el OCT, que permite estadificar de forma muy eficaz a la RD. Si la enfermedad progresa a su etapa proliferativa, el principal tratamiento a realizarse es la fotocoagulación láser. Esta técnica, si bien no recupera la vista, evita que continúe su deterioro. En el caso de la aparición de hemorragias de forma repetida o del desprendimiento de la retina, la técnica quirúrgica más utilizada es la vitrectomía. Con ella se puede acceder al interior del ojo para eliminar las posibles anomalías

que afectan la claridad de la visión. En combinación con estos tratamientos existen otras opciones enfocadas en el control del edema macular diabético, como es el ejemplo de las inyecciones intraoculares de corticoides y de fármacos anti-angiogénicos. Estos permiten la disminución de la inflamación y de la permeabilidad vascular. Además, junto con los nuevos avances en el estudio de mecanismos moleculares básicos de la RD, nuevos posibles blancos terapéuticos están siendo evaluados con el fin de mejorar las terapias actuales.

GLOSARIO

ANMAT: Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica de Argentina.

Anticuerpos: Glucoproteínas producidas por el sistema inmune para identificar y neutralizar antígenos. Están constituidos por unidades estructurales básicas, cada una de ellas con dos cadenas proteicas pesadas y dos livianas.

Antígenos: Sustancias que pueden ser reconocidas por anticuerpos o por linfocitos B y T. Son usualmente proteínas, ácidos nucleicos o polisacáridos provenientes de bacterias, virus y otros microorganismos.

Aptámeros: Ácidos nucleicos cortos que se unen a proteínas dianas de forma específica.

ARN de interferencia: Molécula de ARN pequeña, que suprime o disminuye la expresión de genes específicos mediante mecanismos intrínsecos de la célula.

Autocrina: Tipo de comunicación celular en la cual la secreción química afecta a la misma célula que secretó la sustancia.

Barrera hemato-retiniana: Barrera que separa al sistema vascular del ojo de la retina neurosensorial y que es impermeable al paso de moléculas de alto peso molecular, manteniendo las condiciones fisiológicas y metabólicas de la retina y contribuyendo a la transparencia del cuerpo vítreo, esencial para la función visual.

Colesterol LDL: Tipo de colesterol asociado a las lipoproteínas de baja densidad (generalmente conocido como "colesterol malo"). Es la principal

lipoproteína que transporta el colesterol desde hígado al resto del organismo.

Colesterol HDL: Tipo de colesterol asociado a la lipoproteína de alta densidad (generalmente conocido como "colesterol bueno"). Su función principal es transportar el colesterol desde los tejidos al hígado.

Corticosteroides: Clase de hormona del grupo de los esteroides y sus derivados, producidas por la corteza de las glándulas suprarrenales. Están implicadas en mecanismos fisiológicos que regulan la inflamación, el sistema inmune y el metabolismo de hidratos de carbono, entre otros.

Endotelio vascular: Tipo de epitelio de una sola capa, formado por células endoteliales, que recubre el interior de los vasos sanguíneos.

Enzima: Proteínas que tienen la capacidad de facilitar y acelerar las reacciones químicas que tienen lugar en los tejidos vivos

Estrés oxidativo: Desequilibrio entre la producción de oxígeno reactivo y la capacidad de un sistema biológico de reparar el daño resultante.

Exudados: Conjunto de elementos extravasados en el proceso inflamatorio, que se depositan en el intersticio de los tejidos o cavidades del organismo. Provocan el edema inflamatorio.

FDA: Administración de Alimentos y Fármacos de los Estados Unidos.

Fragmento Fab: Fragmento de anticuerpo cuyas uniones peptídicas son procesadas por enzimas proteolíticas. Comprende una mitad de cadena pesada unida a una cadena liviana y una región de reconocimiento del antígeno.

Glicosilación: Proceso químico en el cual se adiciona un glúcido a otra molécula.

Glicación: Glicosilación no enzimática.

Hiperglucemia: Cantidad excesiva de glucosa en la sangre, mayor a 110 mg/dl en ayunas.

Hipoxia: Estado de deficiencia de oxígeno en la sangre, células y tejidos del organismo.

Isoforma: Versión de una proteína que puede producirse a partir de genes diferentes pero relacionados entre sí, o derivar de un único gen por "splicing" alternativo.

Isquemia: Daño celular causado por una disminución transitoria o permanente

del riego sanguíneo y su consecuente disminución del aporte de oxígeno, de nutrientes, y eliminación de productos del metabolismo de un tejido.

Microaneurisma: Dilatación de los vasos sanguíneos, ocasionada por una degeneración de su pared, que ocasiona un incremento mayor del 50% con respecto su diámetro normal.

Paracrino: Tipo de comunicación celular que emplea mensajeros químicos, donde su secreción afecta a una célula vecina a la célula emisora.

Polioles: Alcoholes con varios grupos hidroxilos.

Proteína de fusión o quimérica: Proteína generada a través de la unión de uno o más genes. La traducción de este gen de fusión resulta en un polipéptido único con propiedades funcionales derivadas de cada una de las proteínas originales.

Proteína quinasa: Enzima que transfiere grupos fosfatos a otras proteínas, provocando su activación o desactivación según el caso.

Recombinante: Molécula de ADN generada a partir de la unión de secuencias de ADN provenientes de genes diferentes.

"Splicing" alternativo: Proceso de edición post-transcripcional que se produce tras la obtención del ARN mensajero primario, y que permite que un solo gen pueda codificar varias proteínas.

Sorbitol: Alcohol de azúcar. Su alta concentración en sangre se encuentra implicada en la retinopatía diabética.

Transcripción: Proceso de la expresión génica, mediante el cuál las secuencias de ADN son copiadas a ARN.

"Off label": Prescribir un medicamento para una condición para la cual no haya recibido aprobación por el organismo de regulación de medicamentos pertinente (como la FDA en los Estados Unidos o la ANMAT en la Argentina).

VEGF (Factor de crecimiento endotelial vascular): Proteína implicada en la vasculogénesis y en la angiogénesis.

■ BIBLIOGRAFÍA

Afzal A. et al. Retinal and choroidal microangiopathies: Therapeutic Opportunities. *Microvascular Research*. 74:131-144; 2007.

Aiello LP. et al. Vascular endothelial growth factor in ocular fluid of patients with

diabetic retinopathy and other retinal disorders. *The New England Journal of Medicine*. 331:1480-1487; 1994.

Aiello LP. et al. Effect of ruboxistaurin on visual loss in patients with diabetic retinopathy. *Ophthalmology*. 113:2221-2230; 2006.

Al-Shabraway M. et al. Mechanisms of Statin's protective actions in diabetic retinopathy: role of NAD(P)H oxidase and STAT3. Role of NADPH oxidase and STAT3 in statin-mediated protection against diabetic retinopathy- *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 49:3231-3238; 2008.

Bartola M. et al. Vascular endothelial growth factor activates STAT proteins in aortic endothelial cells. *The Journal of Biological Chemistry*. 275: 33189-33192.

Bursell SE. et al. High-dose vitamin E supplementation normalizes retinal blood flow and creatinine clearance in patients with type 1 diabetes. *Diabetes Care*. 22:1245-1251;1999.

Caldwell RB. et al. Vascular endothelial growth factor and diabetic retinopathy: role of oxidative stress. *Drug targets*. 6:511-524; 2005.

Cunningham ET. et al. A phase II randomized double-masked trial of pegaptanib, an anti-vascular endothelial growth factor aptamer, for diabetic macular edema. *Ophthalmology*. 112:1747-1757; 2005.

Du Y. et al. Hyperglycemia increases mitochondrial superoxide in retina and retina cells. *Free Radical Biology & Medicine*. 35:1491-1499; 2003.

Engerman RL. et al. Experimental galactosemia produces diabetic-like retinopathy. *Diabetes*. 33:97-100; 1984.

Frank RN. Diabetic retinopathy. *The New England Journal of Medicine*. 350:48-58; 2004.

Gabbay KH. Hyperglycemia, polyol metabolism and complications of diabetes mellitus. *Annual Review of Medicine*. 26:521-536; 1975.

Joussen AM. et al. A central role for inflammation in the pathogenesis of diabetic retinopathy. *The FASEB Journal*. 18:1450-1452; 2004.

Kunisaki M. et al. Vitamin E prevents diabetes-induced abnormal retinal blood flow via the diacylglycerol-protein kinase C pathway. *American Journal of Physiology*. 269:E239-E246; 1995.

McLeod D. et al. Enhanced expression of intracellular adhesion molecule-1 and P-selectin in the diabetic human retina and choroid. *American Journal of Pathology*. 147:642-653; 1995.

Meleth AD. et al. Serum inflammatory markers in diabetic retinopathy. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 46:4295-4301; 2005.

- Miller JW. et al. Vascular endothelial growth factor in ocular neovascularization and proliferative diabetic retinopathy. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*. 13:37-50; 1997.
- Nishijima K. et al. Vascular endothelial growth factor-A is a survival factor for retinal neurons and a critical neuroprotectant during the adaptative response to ischemic injury. *The American Journal of Pathology*. 171:53-67; 2007.
- Obrosova IG. et al. Antioxidants attenuate early up regulation of retinal vascular endothelial growth factor in streptozotocin-diabetic rats. *Diabetología*. 44:1102-1110; 2001.
- Penn JS. et al. Vascular endothelial growth factor in eye disease. *Progress in Retinal and Eye Research*. 27:331-371; 2008.
- Schwartz SG., et al. Pharmacotherapy for diabetic retinopathy. *Expert Opinion on Pharmacotherapy*. 10:1123-1131; 2009.
- Sjolie AK. et al. Retinopathy and Vision Loss in Insulin-Dependent Diabetes in Europe. *Ophthalmology*. 104:252-260; 1997.
- Wautier JL. et al. Advanced glycation end products, their receptors and diabetic angiopathy. *Diabetes & Metabolism*. 27:535-542; 2001.
- Ways DK. et al. The role of protein kinase C in the development of the complications of diabetes. *Vitam Horm*. 60:149-193; 2000.
- Wild S. et al. Global prevalence of diabetes: estimates for the year 2000 and projections for 2030. *Diabetes Care*. 27:1047-1053; 2007.
- Xia P. et al. Characterization of vascular endothelial growth factor's effect on the activation of protein kinase C, its isoforms, and endothelial cell growth. *Journal of Clinical Investigation*. 98:2018-2026; 1996.

ASOCIACIÓN QUÍMICA ARGENTINA / CURSOS

TEMAS

- Como asegurar la calidad de los resultados microbiológicos.
Lic. Mónica Lagomarsino y Sergio Iglesias
- Remediación ambiental de sitios industriales contaminados.
Lic. Witold Kopytynski
- La Gestión Integral de Residuos Peligrosos.
Lic. Silvia Oliviero

La inscripción a los cursos incluye libre acceso a nuestra Biblioteca durante su duración.



**Informes e Inscripción: Asociación Química Argentina
Sánchez de Bustamante 1749 (C1425DUI) Buenos Aires.
Telefax: 4822-4886 - Int. 29. o por e-mail: cursos@aqa.org.ar,
detallando: nombre y apellido del inscripto, empresa, rubro,
teléfono y temas.**

Premio Año 2010 Fundación Florencio Fiorini

**Al mejor trabajo científico original e inédito sobre:
Nuevos desarrollos diagnósticos y/o terapéuticos en cáncer**

**El premio consistirá en 12.000 pesos y diploma
Inscripción: del 3 de Mayo de 2010 al 31 de Agosto de 2010**

LALCEC

LIGA ARGENTINA DE LUCHA CONTRA EL CÁNCER

Informes e Inscripción: **Secretaría de LALCEC**
Aráoz 2380 - C1425DGJ - Cap. Fed.
Tel./Fax: 4832-4800. E-mail: info@lalcec.org.ar
www.lalcec.org.ar - www.fff.org.ar



Roffo

Instituto de Oncología Ángel H. Roffo
Universidad de Buenos Aires



XXVI JORNADAS DE ONCOLOGÍA

“La investigación una herramienta para el tratamiento del paciente oncológico”

Buenos Aires, 31 de agosto al 3 de septiembre de 2010

Temas importantes que trataremos durante las jornadas:

- MODELOS ANIMALES PARA EL ESTUDIO DE DIFERENTES PATOLOGÍAS TUMORALES
- IMPORTANCIA DE LOS BIOBANCOS EN LA INVESTIGACIÓN Y TRATAMIENTO DE PACIENTES ONCOLÓGICOS
- TUMORES GASTROINTESTINALES
- CÁNCERES UROLÓGICOS
- CÁNCER HEMATOLÓGICO
- CÁNCER DE MAMA
- ENFOQUE MULTIDISCIPLINARIO EN EL TRATAMIENTO DE LA METÁSTASIS
- CÁNCER DE CABEZA Y CUELLO
- CÁNCER DE OVARIO
- MELANOMA

INSCRIPCIÓN SIN CARGO

Jornadas de rehabilitación oncológica

Jornadas de Psico-socio-oncología y de cuidados Paliativos

Jornadas de enfermería

Jornadas de médicos residentes

Jornadas de personal técnico

INVITADOS EXTRANJEROS CONFIRMADOS

Dr. GM Hortobagyi

Department of Breast Medical Oncology University of Texas
M.D. Anderson Cancer Center, Houston Texas, USA

Dr. Jaume Reventós

Director de la Unidad de Investigación Biomédica
Hospital Vall d'Hebron, Barcelona, España

Dr. Julio Aguirre-Ghiso

Director del Departamento de Medicina
División Hematología y Oncología
Mount Sinai School of Medicine, New York University, USA

Dr. Armando Melani

Hospital Pio XII
Barretos, San Pablo, Brazil

LÍMITE PARA PRESENTACIÓN DE COMUNICACIONES CIENTÍFICAS CON OPCIÓN A:

PREMIO PÓSTER O MEJORES TRABAJOS CIENTÍFICOS:

"Eugenia Sacerdote de Lustig" en Investigación Básica

"Abel Canónico" en Investigación Clínico-quirúrgica

"Noemí Fisman" en Psico-Oncología

2 de Julio de 2010

Consultar reglamento en la página web de las jornadas: www.institutoroffo.com.ar

Colaboran:



Fundación Centro
Diagnóstico Nuclear

Secretaría

Anexo - Aranguren 551, PB "B" - (C1405CRK) - Ciudad Autónoma de Buenos Aires
Tel.: (54) 11 4902 1017 / 4903 7072 - E mail: admin@anajuan.com

Los matemáticos, su oficio y su saber: entre la armonía de las esferas y el arrebatado inspirador

Palabras clave: matemática, matemáticos, apolíneo, dionisiaco, orden, caos, armonía universal, belleza
Key words: mathematics, mathematicians, apollonian, dionysian, order, chaos, universal harmony, beauty

A propósito del par dialéctico *apolíneo-dionisiaco*, que Friedrich Nietzsche desarrolla con maestría y hermosura en *El nacimiento de la tragedia en el espíritu de la música* –relacionando, como es sabido, al primer elemento con la armonía, la forma y la belleza, y al segundo con la fuerza, la pasión, la desmesura– se me ocurre que en matemáticas, así como en la interacción de éstas con las artes, la filosofía o, incluso, las demás ciencias, la presencia y el juego de esos dos principios no siempre está claramente expresada; su lectura, de ser posible, no siempre permite construir un argumento unívoco sobre los significados y los símbolos que se juegan en el hacer del matemático, tanto en sus motivaciones e inspiraciones como en su método y, desde luego, en sus resultados. Paso a explicarme.

■ Enrique Segura

esegura@dc.uba.ar

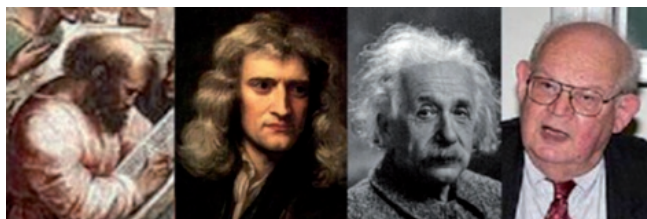
L'Universo è scritto in lingua matematica
Galileo Galilei, *Il Saggiatore*

Tal vez suene un poco sesgado lo que anotaré a continuación: la cabeza de los matemáticos es bastante parecida a través de los tiempos, acaso mucho más que la de los médicos o la de los poetas. De hecho, no me parece muy diferente la actitud casi religiosa con la que Pitágoras de Samos, seis siglos antes de Nuestro Señor, dirige su mirada a las relaciones entre los astros o los sonidos de una lira, y ve su sistema de armónicos hecho materia y sonido, de la que profesa Benoit Mandelbrot cuando, ya en vida de muchos de nosotros, enseña que “la Naturaleza es fractal”, pasando por

Sir Newton cuando afirma que “Este bellísimo sistema del Sol, planetas y cometas sólo podría proceder del criterio y dominio de un Ser inteligente” (1) o Albert Einstein cuando se refiere a las matemáticas como el saber que “nos lleva a la región de la necesidad absoluta, a la que no sólo nuestro mundo, sino todos los mundos posibles, deben someterse” (2). En todos estos casos veo alentar la idea (¿o diré más bien la convicción o aun la fe?) de que el Universo está *governado* por un orden inmanente que es matemático, y de que la tarea de quien ejerce esta disciplina es descubrir y

describir laboriosa, metódicamente esa legalidad necesaria y regular. Así, los matemáticos parecieran estar, en principio, inspirados por un numen apolíneo más que dionisiaco: buscadores y adoradores quasi idólatras de lo simple, armónico y permanente

Todo lo antedicho es, en su idealismo arrebatado, ampliamente controvertible, y de hecho ha chocado con opiniones no desdeñables de pensadores de casi toda época. Citemos, apenas, a un relevante teórico de la belleza como lo fue George Santayana, pragmatista además de metafísico (¿?), que en 1896 escribió: “La



Pitágoras, Newton, Einstein, Mandelbrot: épocas y saberes diferentes, y casi la misma, religiosa actitud en la búsqueda científica de las leyes y regularidades immanentes del Universo.

belleza y la corrección dependen de nuestro juicio y de nuestra emoción; en ningún sentido existen en la naturaleza o se imponen a ella. La naturaleza se presenta siempre movida por leyes mecánicas. Los tipos de cosas existen en virtud de lo que, a juzgar por nuestro criterio, es mero azar, y son nuestras facultades las que deben adaptarse a nuestro ambiente y no nuestro ambiente a nuestras facultades." (3) Según esto, no habría lugar en la Naturaleza para la intervención de un hacer humano ordenador y dador de belleza; independientemente del método empleado, los resultados serían ajenos al control y a la vocación de quien arribó a ellos.

Por otro lado, aun cuando una posición de extremo idealismo (al estilo de los pitagóricos, Newton o Einstein) me fuere provisoriamente concedida en tanto observación general ("para ver a qué apunta, con qué se sale"), se trataría de una regla con más excepciones que confirmaciones. Ocurre que si combinamos los diversos modos de practicar el método de investigación matemática con las variantes, muchas veces imprevisibles, en las consecuencias prácticas de los resultados obtenidos, podemos obtener un espectro numeroso de escenarios, algunos más predominantes que otros según la época o el lugar. Aun si tomamos tan sólo los casos extremos (que es lo que haremos con el fin de hacer posible, manejable la ilustración que intentamos), encontramos al menos cuatro posibilidades, a saber:

i) La forma de trabajo, el método era apolíneo, i.e. ordenado y reglado de antemano y los resultados obtenidos, simples y elegantes, esto es, daban cuenta de un comportamiento también apolíneo de algún subsistema de objetos y procesos matemá-

ticos y, eventualmente, de una parte del mundo natural a cuya descripción o modelado podían aplicarse.

ii) El método era apolíneo, pero los resultados, a la larga o a la corta, resultaron en la ruptura de alguna regularidad, no aportaron orden ni simplicidad, sino más bien exceso o infinitud, o caos, abandono obligado de verdades antiguas y nobles. Esto es, las consecuencias fueron dionisiacas.

iii) Inversa de la anterior: método, inspiración desordenada, excesiva, pasional; consecuencias paradójicamente bellas y armónicas.

iv) Modo, estilo de trabajo sin vocación de belleza, pragmático tal vez; consecuencias acordes (aunque útiles a menudo). El numen dionisiaco presidiendo todo el proceso creativo.

A continuación presento un ejemplo de cada una de estas cuatro situaciones "extremas" (¿podrían representarse como los vértices de un cuadrado?).

i) ¿Cuándo es bello un teorema? ¿Cuando su tesis, *lo que dice*, esto es, lo que postula (y demuestra apodícticamente) da cuenta de una propiedad elegante, cerrada, concebible del mundo de las formas y las estructuras posibles? No necesariamente, creo yo. También puede haber belleza en el método, en la destreza, en el donaire con que se ejecuta esa demostración, esto es, los pasos (deductivos, inductivos, constructivos) que permiten arribar a la conclusión buscada –que puede ser, ella misma, hermosa también. Vean, si no, el siguiente ejemplo (que daría cuenta, creo yo, del primer escenario descrito):

Un número primo es aquel que sólo puede ser dividido exactamente por sí mismo o por el número 1. Entre este último y 1000, hay 168 primos; entre 1001 y 2000 hay 135; entre 2001 y 3000, contamos 127, entre 3001 y 4000, 120. Sí, tal vez ya lo adivinaste: la frecuencia con que aparecen los números primos decrece a medida que los buscamos de mayor tamaño. ¿Llegará, entonces, un momento, un punto de la recta (discreta, de los enteros positivos, se entiende) en que nos libremos por completo de ellos? No, porque son infinitos, y el primero en demostrarlo fue Euclides, a quien nadie le disputaría, creo, su condición de "pater aevi apostolici" de las matemáticas. El razonó: si n fuera el último número primo, multipliquémoslo por todos los primos menores a él y sumémosle 1. El nuevo número es mayor que n . ¿podría *no ser* primo? En ese caso, dado que ninguno de los primos menores puede dividirlo exactamente (¡el resto sería 1 por construcción!), debería contener algún otro factor primo mayor que n , lo cual implicaría que ese número fue erróneamente omitido en la construcción antedicha.

Esta es una demostración bella, elegante, "conversable" de un hecho que, desde una concepción de lo bello como lo ordenado, parsimonioso o armónico, indudablemente también lo es. Los números primos, esos autistas irreductibles, con ser infinitamente muchos, deben resignar su presencia en la recta numérica a una regular, homogénea pérdida de frecuencia, como una dilución sin esperanzas, pero sin un número de Avogadro en el horizonte que, abruptamente, dictamine su cancelación sin dejar rastros. Aquí la regularidad es eterna: cada vez habrá que andar más para encontrarnos con el próximo, pero siempre estará aguardándonos, un poco "más acá del infinito" (4).

ii) Un sabio (porque sin duda lo era) que, mucho antes que Euclides, aspiró rotundamente a la identidad belleza-verdad, fue Pitágoras, el de Samos. El y sus discípulos (la "Hermandad") llegaron por medios parsimoniosos y ordenados (tanto en su oficio cotidiano como en la ascética personal que

profesaban) a la célebre *Teoría de armónicos*, con el “Círculo de Quintas” en su centro, construcción apolínea si las hay, y que, estrictamente basado en razones enteras entre los sonidos de la escala musical, estimaron aplicable a todos los órdenes del mundo natural.

Pero, metódicos y puntuales como eran, llevaron sus estudios matemáticos hasta un extremo del que no pudieron volver, y que acabó por darles un dolor de cabeza: descubrieron que había cantidades imposibles de representar como la división entre dos números naturales (i.e. los que usamos para contar: 1, 2, 3, . . .). Cómo arribaron al hallazgo, no parece estar claro. Acaso el de Samos, o algún estudiante aventajado, en un ensayo de aplicación del Teorema (así, con mayúsculas, para diferenciarlo de los muchos otros teoremas que la Escuela enunció y demostró), se encontró con que, para un triángulo rectángulo de catetos unitarios, la medida de la hipotenusa -raíz cuadrada de 2- no podía ser expresada mediante ninguna sucesión de cifras. Habían nacido, o se habían hecho visibles, los números *irracionales*, objetos tan monstruosos como aparentemente inútiles e injustificables en un mundo físico que, como poco después Platón habría de enseñar en Atenas, no sería más que un imperfecto reflejo de ese otro mundo de formas puras e incorruptibles.

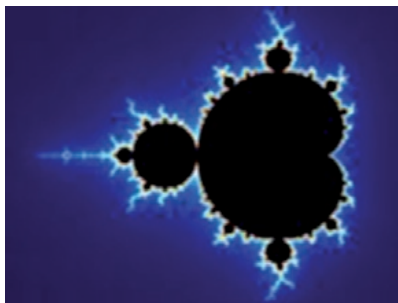
Pero los siglos habrían de avanzar, y con ellos la ciencia y, en particular, las matemáticas. Y, como fatalmente parece cumplirse más tarde o más temprano, el sino de los “monstruos” irracionales los reveló como objetos útiles en una multiplicidad de dominios técnicos y artísticos (para una discusión más exhaustiva del papel desempeñado por los números irracionales en el desarrollo de los sistemas modernos de afinación en la música occidental a partir del Renacimiento, cf. (5)).

iii) Otra forma de profesar belleza en el quehacer matemático es, se me ocurre, en la creación, en la definición económica, austera de algún objeto que exhiba algo más que utilidad práctica o propiedades solemnes, eternas, universales. Tales, por ejem-

plo los *fractales* (antes y después de Mandelbrot quien, si no es su progenitor, sí amerita el epíteto de ordenador y promotor privilegiado de esa raza de entes matemáticos) y, en especial, el llamado *conjunto de Mandelbrot*, algo así como el “Mis(s)ter) Universo del mundo fractal”. Dada la ecuación cuadrática de recurrencia:

$$z(n+1) = z(n)*z(n) + c$$

en el plano complejo, el conjunto de Mandelbrot se define como el de los valores de c tales que la órbita de 0 de la sucesión de puntos resultante de la iteración permanece acotada. Esta definición no es, a mi juicio, particularmente bonita: su comprensión presupone, para empezar, conocimientos matemáticos de un cierto nivel; para continuar, su representación requiere el concurso de una computadora y, para concluir, el análisis y demostración de sus propiedades supone formación técnica específica y métodos acordes. Y así y todo, el objeto matemático resultante es curioso y bello. Y exhibe, al mismo tiempo, propiedades interesantes de estudiarse.



El conjunto de Mandelbrot (en negro).

Más en general, los conjuntos fractales comparten una serie de atributos que los hacen atractivos y, ahora sí, seriamente considerables como modelos del comportamiento de la Naturaleza, o de nuestra forma de percibirla (a todo esto, ¿qué diablos es “la Naturaleza”?). Mencionemos algunos:

Autosimilaridad: es decir, todo fractal es idéntico o parecido a cualquiera de sus partes, y cualquiera de esas partes lo es, a su vez, a cualquier-

ra de sus (sub)partes. Esta propiedad los erige en buenos candidatos a modelar diversos procesos o hechos de la realidad natural. Por ejemplo, las costas (litorales marítimos o fluviales) y las superficies terrestres son estadísticamente autosimilares. Este hecho conlleva un comportamiento que ha llegado a desconcertar a más de un cartógrafo: según la precisión de los instrumentos de observación y medición -de ahí lo apuntado más arriba sobre “el comportamiento de la Naturaleza o nuestra forma de percibirla”-, la costa atlántica de la Argentina (o de cualquier otro país) puede medir 2.000 o 5.000 kilómetros (por así decir, no tomen estas cifras muy en serio) (6).

Esta propiedad de *autosimilaridad* también incitará, en más de un lector, reminiscencias de la bella hipótesis de *autopromediación* (self-averaging) que, en mecánica estadística, imagina mundos, sistemas de infinitamente muchas partículas, con el gallardo atributo de que cualquier propiedad del sistema vale lo mismo promediada sobre distintos subconjuntos (ensembles) lo suficientemente alejados en el espacio que sobre distintas observaciones de un mismo subconjunto lo suficientemente distanciadas en el tiempo.

Invariancia por cambios de escala (“escalabilidad”): si se los dilata (o contrae) multiplicándolos por un factor común, conservan su estructura, sus propiedades y, lo más importante -ya que de belleza hablamos- su estructura.

Dimensión de Hausdorff (HD) no entera: sin entrar en tecnicismos, motivemos intuitivamente el concepto de HD diciendo que un punto tiene $HD = 0$, una línea tiene $HD = 1$, un plano $HD = 2$, etc. Bien, ¿qué hay en el mundo de los objetos geométricos, que posea, intuitivamente, una dimensión de Hausdorff fraccionaria entre 1 y 2? Sin ser los únicos, los conjuntos fractales poseen, en general HD no entera.

iv) Es poco probable que alguien pueda proponer una figura matemática más emblemáticamente teñida

del espíritu dionisiaco. Me refiero a Kurt Gödel, quien pasa por ser el responsable del procaz y definitivo desbaratamiento de toda esperanza de completitud y coherencia interna de un edificio conceptual construido laboriosamente durante 2500 años.

Ya en 1900, David Hilbert, en el segundo de sus famosos 23 problemas, (se) preguntó si es posible demostrar que la aritmética axiomática de Peano es *consistente*, i.e. ninguna sucesión de pasos lógicos basados en sus axiomas puede conducir a resultados contradictorios. En otros términos, el Programa de Hilbert consistía en la búsqueda de un conjunto completo y consistente de axiomas para toda la matemática. Por aquellos años (década de 1920), la disciplina atravesaba una crisis fundacional: los tempranos intentos de esclarecer y establecer sus fundamentos adolecían de paradojas e inconsistencias (cf. Frege, Russell, etc.)

Pero esta aspiración del alemán, apolínea, de orden, la más esperable de un matemático “bien élevé”, según nuestra visión, iba a ser desbancada pocos años después por otro alemán (originariamente austríaco), el mentado Gödel, quien, en dos teoremas (los “teoremas de incompletitud”) de 1931, esto es, con sólo 25 años de edad y apenas uno de doctorado, estableció las limitaciones inherentes a todo sistema formal de interés matemático. El primer teorema afirma que:

Cualquier teoría efectivamente generada (i.e. su conjunto de axiomas es recursivamente enumerable) capaz de expresar la aritmética elemental no puede ser consistente y completa a la vez. En particular, para cualquier teoría formal consistente, efectivamente generada que prueba ciertas verdades aritméticas básicas, hay una proposición aritmética que es verdadera, pero no demostrable en la teoría.

Ese es el más popular. Pero el segundo es parejamente significativo:

Sea T una axiomatización efectivamente generada de la teoría de números. Entonces la consistencia de T no puede ser demostrada como un teorema de T , i.e. si la proposición “ninguna proposición falsa puede ser derivada de los axiomas de T ” puede ser derivada de los axiomas de T , entonces T es inconsistente.



David Hilbert (izquierda) y su colega (¿doppelganger dionisiaco?) Kurt Gödel.

A más de la importancia que se les atribuye en filosofía de las matemáticas, lo cierto es que, desde el punto de vista de la vocación de armonía y autocontención del edificio matemático, el “aporte” de Gödel resultó devastador. Haciendo gala del más insolente espíritu dionisiaco, su quintaesencia diríamos, estos resultados mostraron con soez evidencia y la más impía ausencia de recato platónico, la imposibilidad del Programa de Hilbert de fundar integralmente las matemáticas en su totalidad

■ MÁS ALLÁ DE LA DIALÉCTICA APOLÍNEO-DIONISIACO

Un chiste para matemáticos: el Dr. B., del Departamento de Matemáticas, estaba exultante, ya acariciaba la medalla Fields: tras años de trabajo y estudio, creía haber encontrado finalmente una técnica matemática para curar el catarro común. Sus colegas, invariablemente, lo escucharon aquella mañana con una mezcla ecuaníme de ironía, condescendencia e incredulidad. Finalmente, uno de ellos, con quien se profesaban alguna mayor confianza, se animó a decirle: “Pero, estimado colega, aun aceptando lo insólito de tu método terapéutico, curar el catarro común no es algo relevante para la ciencia médica (aunque sí lo sea, tal vez, para que las empresas reduzcan sus costos en días de trabajo perdidos por sus empleados)”. Entonces B. –y ahora le tocó a él el dulce ejercicio de la ironía condescendiente– replicó con estudiada morosidad: “Es que . . . también

he logrado desarrollar por completo una segunda técnica, y ésta no se la he mostrado a nadie, . . . ni lo haré hasta tanto sea publicada: es posible reducir cualquier otra enfermedad al catarro común”.

La humorada –que no recomiendo intentar en una reunión en la que los matemáticos no sean, por lo menos, mayoría simple– refleja maravillosamente una de las cualidades más apreciadas en las comunidades matemáticas de todos los tiempos a la hora de calificar como “bello” a un resultado o una teoría o un cuerpo de conceptos en la disciplina: su economía de recursos en relación con su potencia descriptiva o representativa. En otros términos: un resultado matemático será tan bello cuanto reducido sea el bagaje de axiomas o hipótesis adicionales o resultados previos en los que se base, en relación con la generalidad o universalidad de sus implicancias, ya sean éstas teóricas o prácticas. Y existen, por cierto, diversos ejemplos en la historia de la disciplina que dan cuenta de esta aspiración secular, estética no menos que cognoscitiva. Uno de esos “casos testigo” es, probablemente, el de la *cibernética*. Fundada en 1948 por Norbert Wiener con su libro *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, prácticamente no existe dominio de la ciencia moderna en el que no se la haya aplicado, desde que su objetivo primordial es el estudio de cómo cualquier sistema digital, mecánico o biológico procesa la información y reacciona ante ella y cambia o puede ser cambiado de modo de realizar esas tareas en forma

óptima. Más que preguntarnos en qué terrenos del conocimiento ha influido la cibernética, sería sensato preguntarnos en cuál no lo ha hecho, puesto que a través de distintos aspectos de su amplia concepción teórica, han recibido sus aportes desde las ciencias formales (otras áreas de la matemática, como sistemas dinámicos, teoría de la información, modelos conexionistas, sistemas complejos), pasando por la computación (simulación, robótica), la ingeniería (ingeniería biomédica, ergonomía, sistemas adaptativos) y la biología (biocibernética, homeostasis, biología de sistemas, con especial énfasis en las teorías de realimentación negativa y cómo los sistemas biológicos se adaptan a su entorno) hasta incluso la psicología y las ciencias sociales (incluyendo aplicaciones en administración y modelos económicos).

Digresión: ¿Eligen los matemáticos las hipótesis y las teorías por su belleza?

Abusando de Hegel (o haciéndole honor): ¿es el camino del conocimiento el de la progresiva conquista de las verdades arcanas del Universo, o más bien el de una construcción estéticamente aceptable, soportable, de nuestra concepción del mundo?

Robert C. Bless, al referirse a Copérnico en su libro *Discovering the Cosmos*, aboga decididamente por la segunda postura. Según su visión, todo científico tiende a someter su teoría al “difuso, subjetivo test de belleza o elegancia” para considerarla aceptable, y buscará alternativas a una teoría “fea” aun cuando ésta dé adecuada cuenta de las evidencias experimentales. En el caso de Copérnico, Bless mantiene que sus objeciones al sistema geocéntrico de Ptolomeo incluían las de carácter estético, y cita del *Commentariolus*: “Es como si, en sus dibujos, un artista pusiera juntos manos, pies, cabeza y otros miembros de modelos muy diferentes, estando cada parte admirablemente dibujada en sí misma, pero sin relación común a un único cuerpo: al no coincidir en absoluto una con otra, el resultado sería un monstruo más que un hombre”. La búsqueda de belleza habría guiado –o contribuido–, en última instancia, a romper con dos milenios de tradición geocéntrica (7).

■ DE LO [ROTUNDAMENTE] FEO EN MATEMÁTICAS: ALLÍ DONDE CASI TODOS SE PONEN DE ACUERDO

Y . . . sí, no hay más remedio que una referencia breve, piadosa al *Teorema de los Cuatro Colores* y la primera de sus demostraciones que todavía hoy –con ciertas, menores enmiendas– es aceptada o, al menos, no universalmente refutada en su validez.

Recordemos que el teorema de marras, enunciado por primera vez en 1852, puede expresarse más o menos informalmente en los siguientes términos: cualquier mapa, i.e. subdivisión de una superficie plana en regiones contiguas, puede ser pintado utilizando a lo sumo cuatro colores diferentes, de modo que ningún par de regiones adyacentes compartan el mismo color. Hasta que fue finalmente probado por Appel y Haken en 1976, la ajetreada existencia de este enunciado conoció una nutrida sucesión de presuntas demostraciones que resultaron incorrectas, así como de intentos de poner en evidencia su falsedad por medio de contraejemplos (falsos, desde luego). Pues bien, sin adentrarnos en la ponderación de los méritos estéticos de tales ensayos –con variadísimos grados de elegancia formal y sutilezas técnicas que en algunos casos permitieron a algunos de ellos “pasar por buenos” durante años incluso–, notemos (o recordemos, ya que es ampliamente conocido) que la demostración de Appel y Haken, todavía aceptada después de más de 30 años, sólo fue posible merced al concurso de una computadora y un conjunto no trivial de programas a ser ejecutados en ella. La polémica en el ámbito académico no se hizo aguardar, con una tonalidad marcadamente epistemológica, cuyo punto puede resumirse en la cuestión: ¿es *matemáticamente* válida una demostración cuya corrección no puede ser establecida paso a paso por un humano? Se me dirá: eso no tiene nada que ver con las cualidades estéticas de la prueba. Y yo creo que sí lo tiene, desde que la disputa acerca de la validez del método presentado fue bajando de tono a medida que transcurrían los años y no aparecía ninguna opción no computarizada que

despachara la cuestión epistemológica que se discutía. Y, ¿por qué creen que la controversia fue tan cerril en los primeros tiempos? Es claro que para los años '70, ningún científico podía dudar seriamente de la verificabilidad del correcto funcionamiento de una computadora digital. No, la resistencia de los matemáticos era (en gran medida, al menos) *cultural*, y respondía a su innato sentido de lo que, reiteradamente, he caracterizado a través de estas líneas como elegancia, fineza. Buen gusto, si se quiere. Y en ese sentido, nada más alejado de los cánones que habitualmente manejan los matemáticos –insisto, como escribí más arriba, en que todos ellos comparten una cierta *forma mentis*– que la fuerza bruta y ciega de una máquina de calcular electrónica (8).

■ CUANDO LOS MISMOS ARTISTAS BUSCAN BELLEZA EN LAS MATEMÁTICAS

¿Es legítimo afirmar que son los artistas quienes, en última instancia, poseen los títulos (epistemológicos, perceptuales, espirituales) para sancionar la belleza, el interés estético de un objeto matemático? Bueno, tal vez no incondicionalmente, pero convenbamos en que si un cierto concepto o idea simple, abstracta, logra concitar a través de las épocas y los lugares la atracción y hasta la fascinación de un número considerable de creadores en distintos capítulos del arte, tanto a priori (“apliquemos este concepto a nuestras técnicas y a sus productos”) como a posteriori (“esta obra es bella porque responde, en forma o contenido a este, o porque en ella se reconoce el empleo de una técnica basada en tal concepto”), entonces nos es lícita la metonimia de atribuir belleza también al objeto o abstracción matemática en sí misma. Y el ejemplo que tengo en mente (alguno lo habrá sospechado) es el de la *sección áurea*: la división de una magnitud en dos partes o segmentos, de modo que la razón entre el mayor de los segmentos obtenidos y el menor sea igual a la razón entre la magnitud original y el mayor de los segmentos resultantes de la partición. El valor de esta sección

o razón es un número irracional, de valor aproximado a 1.6180339887.

En efecto, son casi incontables los artistas que aplicaron la sección áurea en sus producciones, o los estudiosos que creyeron descubrirla en creaciones anteriores a su época. Para citar sólo algunos ejemplos, en arquitectura, desde quienes vieron en la Acrópolis de Atenas (Partenón incluido) muchas relaciones aproximadas a la sección áurea, hasta Le Corbusier, quien la usó en su sistema *Modulor* para el diseño de proporciones arquitectónicas a la medida de las necesidades humanas: "La Matemática es la estructura majestuosa concebida por el hombre para asegurarse la comprensión del Universo" (9). O en pintura, desde las ya seculares buscas de la refulgente proporción por parte de inúmeros eruditos en las obras de Leonardo (sin excluir, por cierto, la Mona Lisa) hasta su proclamada y efectiva aplicación por parte Salvador Dalí en *La Última Cena* o de Piet Mondrian en sus pinturas geométricas. Y en música, desde luego, varios grandes de los siglos XIX y XX -Bartok, Debussy, Satie e incluso Chopin-, en cuyas obras los estudiosos detectan secuencias que sugieren un arreglo según la sección áurea. Es también de remarcar la numerosa ocurrencia del caso opuesto: el de artistas de menor monta que, inversamente, debieron tomarse la molestia de anunciar primero que iban a componer conforme a dicha proporción. Y hay todavía una tercera variante: la atribución, a menudo liberal, dadivosa, por parte de un (a veces gran) artista, a otro que lo antecede, de hallazgos previos de la misma concepción innovadora que se está proponiendo. A propósito de la razón áurea, un ejemplo paradigmático es, acaso, el de Leonardo y su famoso dibujo conocido como *Hombre de Vitruvio*, en el cual no sólo plasma, a partir de las indicaciones dadas por el genial arquitecto de Julio César, el canon de las proporciones humanas, sino que además le otorga al romano el haberlo precedido en la introducción de la sección áurea en sus estudios de las proporciones ideales del cuerpo humano, a ser aplicadas, a la vez, en la construcción de los templos (10).



El Hombre de Vitruvio, dibujado por Leonardo da Vinci (1487) a partir de las proporciones indicadas por el arquitecto homónimo (Galería de la Academia, Venecia).

■ Y PODRÍAMOS SEGUIR, Y SEGUIR . . .

. . . y seguir, y no nos aburriríamos, creo (bueno, yo no me aburriría) de encontrar más y más situaciones y ejemplos de los variadísimos (y es tal vez por eso que no cansan) puentes entre belleza -natural y artificial- y matemáticas, en su método y en sus resultados; en sus deferencias para con nuestra vida cotidiana no menos que en su filosofía y su mística.

¿Habremos de acordar, al menos transitoriamente, con el Galileo de nuestro epígrafe, que vio a nuestro Universo como un Gran Libro escrito por su Creador en símbolos matemáticos?

noviembre de 2009

■ NOTAS AL PIE

- (1) Newton, I., *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, L. III (1687).
- (2) Citado en Pappas, T., *La Magia de la Matemática* (trad. De Mirta Rosenberg), p. 71. Madrid: Zugarto, 1996.
- (3) Santayana, G., *El sentido de la belleza. Esbozo de una teoría estética* (trad. de J. Rovira Armengol). Buenos Aires: Losada, 1969.
- (4) Para dar una idea de cuán disputable es la apreciación de la belleza de un objeto o entidad matemática, ayude mi confesión de que este último párrafo vino a sustituir a otro, que originalmente rezaba: "Esta es una demostración bella, elegante, 'conversable' de un hecho que dudosamente lo es. Los números primos son inagotables, como una dilución sin esperanzas, sin un número de Avogadro en el horizonte que

nos autorice a esperar la pureza, la regularidad final. Y encima inherentemente autistas, irreductibles a cualquier expresión o representación equivalente. Incapaces de simbolización alguna (¡qué vergüenza hablar así!). Aunque, claro, esos entes dionisiacos, desaforados son, admitámoslo a nuestro pesar, sumamente útiles para la vida cotidiana. Baste, para ilustrar tal aserto, recordar que toda la comunicación de información sensible (bancaria, e-mails, informes clasificados entre embajadas y organismos de seguridad, etc. -un largo etc.) puede encriptarse y transmitirse con la confianza en que no será -o, al menos, será con baja probabilidad- interceptada y utilizada en su provecho por el "enemigo" (o el chorro o el chantajista) gracias a que ellos (los primos) son muchos y tan grandes como se los busque, de modo que, aun cuando la capacidad y velocidad de cálculo de las computadoras se incrementa día a día con prisa pero sin pausa, siempre existirán números primos aptos para, multiplicados entre sí (base de la criptografía de clave pública) capaces de "vérselas" con el bravucón de turno de Intel o AMD".

- (5) E. C. Segura; *Racionales e Irracionales, Apolo y Dionisos. De Pitágoras a J. S. Bach*; Ciencia e Investigación, 59 (3): 46-49 (2010).
- (6) B. Mandelbrot amerita, entre otros logros, el haber convocado la atención de la ciencia sobre lo que podríamos denominar el carácter "rugoso" o "no suave" de los objetos del mundo real. Esta aptitud como modelos formales de supuestos "fractales naturales" (costas, montañas, ríos, pero también la estructura de las plantas y los órganos animales, así como el agrupamiento de las galaxias y hasta el movimiento browniano) los tornarían, en la mirada de Mandelbrot, modelos útiles a la vez que bellos; de hecho, él considera a los fractales descripciones más próximas a la "realidad objetiva" (?) que la idealizada concepción de la geometría euclidiana tradicional. En la introducción a *La geometría fractal de la naturaleza*, leemos: "Las nubes no son esferas, las montañas no son conos, las líneas costeras no son círculos, y la corteza de los árboles no es suave, ni el relámpago viaja en una línea recta".
- (7) Bless, R. C., *Discovering the Cosmos*, p. 105; Sausalito, University Science Books, 1996.
- (8) Confío en haber dejado claro que mis argumentos (o intentos de motivar la polémica, más bien) se preocupan, no por el Teorema en sí mismo, sino por la manera de demostrarlo.
- (9) Le Corbusier (Charles Edouard Jeanneret, llamado), *Modulor*, p.71; en *The Modulor and Modulor 2*, trad. inglesa de Peter De Francia y Anna Bostock, dos volúmenes, Basilea: Birkhauser, 2000.
- (10) Marco Vitruvio Pollione, *De Architectura*, Libro III, Cap. 1.

PREMIO

Dr. Eduardo Braun Menéndez

Bicentenario 2010

Al mejor trabajo de divulgación científica en castellano referente a **Ciencia–Tecnología-Educación**, desarrollado de manera clara, didáctica y en términos comprensibles para el público en general.

El premio consistirá en la suma de \$ 2000, un diploma y la publicación del trabajo en la revista Ciencia e Investigación.

DISPOSICIONES GENERALES

Los trabajos deberán ser inéditos y los originales entregados en versión word (extensión “doc”) en un CD junto a una versión impresa, los cuales deberán ser individualizados con un seudónimo. En un sobre aparte, cerrado y lacrado, se consignarán: el nombre y documento de identidad del autor (o autores), dirección, teléfono, e-mail y en la parte exterior, el seudónimo, como así también una dirección postal a la que se podrá remitir el acuse de recepción del trabajo con el nombre del premio.

El texto, incluyendo el titulado, resumen, glosario, bibliografía y leyendas, no podrá exceder de 10.000 palabras, letra Times New Roman tamaño 12 y espacio simple. Las páginas deben numerarse (arriba a la derecha) en forma corrida. El texto, incluirá un sumario, en castellano e inglés que no deberá exceder de 250 palabras para cada idioma. La copia impresa deberá estar en papel A4. El material gráfico (que será agregado al final del escrito deberá ser de alta calidad, preferentemente a 300 dpi al tamaño real) se presentará como: a) figuras (dibujos e imágenes en formato JPG) y se numerarán correlativamente (Ej. Figura 1) y b) tablas numeradas correlativamente independientemente de las figuras (Ej. Tabla 1). Si las ilustraciones no fueran originales se deberá citar su origen en la leyenda correspondiente (cita bibliográfica o de página web). En el texto del trabajo se indicará el lugar donde el autor ubica cada figura y cada tabla (poniendo en la parte media de un renglón Figura 1 o Tabla 1, en negrita y tamaño de letra 14).

La lista de trabajos citados en el texto o lecturas recomendadas, deberá ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el apellido del primer autor, seguido por las iniciales de los nombres, título completo de la misma, título completo de la revista o libro donde fue publicado, volumen, página y año de publicación, este último entre paréntesis. Ej. Benin L.W., Hurste J.A. y Eigenel P. The non lineal hypercycle. Nature 277, 108–115 (2008).

Los trabajos deberán ser remitidos antes del **15 de octubre de 2010** a la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC), Av. Alvear 1711 4to. Piso, (C1014AAE) Buenos Aires. Para cualquier otra información remitirse al CE: secretaria@aargentinapciencias.org o al TE: 54- 011 4811-2998.

El premio se entregará en acto público.

PREMIO Dr. Eduardo Braun Menéndez 2008

La Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias, entregó el Premio "Eduardo Braun Menéndez" 2008, al Dr. Javier Ignacio Amalvy, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, por su trabajo titulado "Nociones de Nanociencia y Nanotecnología y sus Aplicaciones en Pinturas y Productos Relacionados". El evento tuvo lugar el 17 de Septiembre.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Ciencia e Investigación, órgano de difusión de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC), es una revista de divulgación científica y tecnológica destinada a educadores, estudiantes universitarios, profesionales y público en general. La temática abarcada por sus artículos es amplia y va desde temas básicos hasta bibliográficos: actividades desarrolladas por científicos y tecnólogos, reuniones nacionales e internacionales, entrevistas, historia de las ciencias, crónicas de actualidad, biografías y comentarios bibliográficos. Desde el año 2009 la revista tiene difusión on line (www.aargentinapciencias.org)

PRESENTACIÓN DEL MANUSCRITO

El artículo deberá presentarse en un CD junto a una impresión en papel A4 escrito con procesador de texto word (extensión «doc») en castellano, a doble espacio, con márgenes de por lo menos 2,5 cm. en cada lado, letra Time New Roman tamaño 12. Las páginas deben numerarse (arriba a la derecha) en forma corrida, incluyendo el texto, glosario, bibliografía y las leyendas de las figuras. Colocar las ilustraciones (figuras y tablas) al final en página sin numerar. Por tratarse de artículos de divulgación científica aconsejamos acompañar el trabajo con un glosario de los términos que puedan resultar desconocidos para los lectores no especialistas en el tema.

La primera página deberá contener en el orden siguiente: Título del trabajo, nombre de los autores, institución a la que pertenecen y lugar de trabajo, correo electrónico de uno solo de los autores (con asterisco en el nombre del autor a quién pertenece), al menos 3 palabras claves en castellano y en inglés. La segunda página incluirá un resumen o referencia del trabajo, en castellano y en inglés, con un máximo de 250 palabras para cada idioma. El texto del trabajo comenzará en la tercera página y finalizará con el posible glosario, la bibliografía y las leyendas de las figuras. La extensión de los artículos que traten temas básicos no excederá las 10.000 palabras, (incluyendo título, autores, resumen, glosario, bibliografía y leyendas). Otros artículos relacionados con actividades científicas, bibliografías, historia de la ciencia, crónicas o notas de actualidad, etc. no deberán excederse de 6.000 palabras.

El material gráfico deberá ser de alta calidad, preferentemente a 300 dpi al tamaño real, se presentará como: a) figuras (dibujos e imágenes en formato JPG) y se numerarán correlativamente (Ej. Figura 1) y b) tablas numeradas correlativamente independientemente de las figuras (Ej. Tabla 1). Las ilustraciones de no ser originales deberán citarse sus orígenes en la leyenda correspondiente (cita bibliográfica o de página web). En el texto del trabajo se indicará el lugar donde el autor ubica cada figura y cada tabla (poniendo en la parte media de un renglón Figura 1 o Tabla 1, en negrita y tamaño de letra 14). La lista de trabajos citados en el texto o lecturas recomendadas, deberá ordenársela alfabéticamente de acuerdo con el apellido del primer autor, seguido por las iniciales de los nombres, título completo de la misma, título completo de la revista o libro donde fue publicado, volumen, página y año de publicación, este último entre paréntesis. Ej. Benin L.W., Hurste J.A. y Eigenel P. The non lineal hypercycle. Nature 277, 108 – 115 (2008).

Tanto la versión CD como la impresa deberá incluir una carta dirigida al Director del Comité Editorial de la revista Ciencia e Investigación solicitando su posible publicación y remitirse a: **AAPC, Revista Cel, Av. Alvear 1711, 4ºP (C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires.**

Todos los artículos serán arbitrados. Una vez aprobado para su publicación, la versión corregida (con las críticas y sugerencias de los árbitros) debe ser nuevamente enviada por los autores.

¡¡Oferta!!
Pipetas y
Artículos
Plásticos

bastante publicidad



ThermoForma

ThermoLabsystems



Nikon



ThermoSorvall



ThermoSorvall



Para encontrar todas las soluciones
en instrumental, no hace falta investigar.

 **microlat**
instrumental científico

Carlos Pellegrini 755 - Piso 9 - Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Tel./Fax: 4326 5205 - 4322 6341 - www.microlat.com.ar



Thermo

TMC



FOTODYNE

conviron

HITACHI

TELEDYNE ISCO
A Teledyne Technologies Company



Molecular Devices



Biodynamics

- Reactivos para Biología Molecular
- Instrumentos para Laboratorio
- Tips, Microtubos y Micropipetas
- Cultivo de Células

Biodynamics S.R.L. - Av. de Mayo 1370 Piso 15 (Torre)
C1085ABQ Buenos Aires - ☎(11) 4383-3000
info@biodynamics.com.ar - www.biodynamics.com.ar

PROGRAMA DE BECAS Y SUBSIDIOS A LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Iguazú Jungle Explorer

2007



F H N
FUNDACIÓN
DE HISTORIA NATURAL
FÉLIX DE AZARA

En nuestro compromiso con el desarrollo científico,
la exploración del país y nuestros verdaderos talentos.

Subsidio de Investigación a la Trayectoria Científica



Dr. José F. Bonaparte.

Desde 1959 el doctor José Fernando Bonaparte orientó sus investigaciones a los vertebrados mesozoicos, las cuales tenían por entonces pocos precedentes en Sudamérica. Con los años sus descubrimientos han llamado la atención de los más destacados especialistas de todo el mundo. Es autor de más de 150 trabajos científicos y 4 libros de divulgación. Obtuvo becas para perfeccionamiento e investigación en el exterior de la Deut la Fundación J. S. Guggenheim, de la Fundación Alexander von Humboldt, del British Council, de la Deutsche Akademie Austauschdienst y del Field Museum, entre otros organismos. Fue subsidiado en sus expediciones por distintas entidades nacionales y extranjeras como: la Fundación Instituto Miguel Lillo de la Universidad Nacional de Tucumán, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, el Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia" y el Centro Studi Ricerche Ligabue. También fue subsidiado por la National Geographic Society durante nada menos que 16 años consecutivos y por The Dinosaur Society en distintas oportunidades. Debido a su trayectoria fue requerido para dar conferencias y cursos en prestigiosas universidades y museos del extranjero como: la Universidad de Harvard, la Universidad de California (Berkeley), el Museum für Naturkunde de Berlín, la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, el Indian Statistical Institute de Calcutta, la Universidad Autónoma de Madrid, el Staatssammlung für Palaontologie de Munich y la Fundacao Zoobotánica de Porto Alegre, además de sus tantas disertaciones en congresos internacionales. Se le han otorgado diversas distinciones tanto en el país como en el exterior: Associate Vertebrate Paleontology de la Universidad de Harvard en 1968; Delegado ante el II Symposium Internacional de Gondwana, África del Sur en 1970; Arnold Guyot Memorial Award de la National Geographic Society en 1989; Forschungspreisträger (portador del galardón de la investigación) de la Fundación Alexander von Humboldt de Alemania en 1992; Premio de la Fundación Konex en 1993; Premio "Ángel Cabrera" de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en 1994; Miembro Honorario de la Asociación Geológica Argentina en 1995 y Premio al Mérito Paleontológico de la Asociación Paleontológica Argentina en 1996.

Beca Avanzada de Doctorado



Lic. Sebastián Apesteguía.

Es Licenciado en Ciencias Biológicas de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo, de la Universidad Nacional de La Plata y se encuentra finalizando su doctorado en Ciencias Naturales. Ha trabajado desde hace 17 años en el Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia, donde es Investigador Adscripto. Dirige el Área de Paleontología de la Fundación Azara y dirigió el Proyecto Parque Cretácico en Sucre, Bolivia. Ha realizado trabajos de Evaluación de Impacto Paleontológico en proyectos mineros e hidroeléctricos. Su principal línea de investigación está dirigida al estudio de los reptiles cretácicos de Patagonia y las relaciones de las faunas cretácicas sudamericanas. Ha realizado más de 30 campañas paleontológicas, principalmente en la Patagonia, pero también en el norte argentino y el norte de los Estados Unidos de América, para lo que recibió subsidios de "The Jurassic Foundation" desde 2002 y de SECyT (2006). Publicó trabajos científicos en algunas de las revistas científicas más prestigiosas del mundo, y es además autor de 4 libros de divulgación y numerosos artículos de difusión científica. Ha nominado 5 nuevos animales fósiles y descubierto 5 nuevas localidades fosilíferas.

Beca Inicial de Doctorado



Lic. Pablo Gallina.

Es Licenciado en Ciencias Biológicas de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo, de la Universidad Nacional de La Plata y se encuentra iniciando su doctorado en Ciencias Naturales. Su principal línea de investigación está dirigida al estudio de los dinosaurios saurópodos. Ha publicado varios trabajos científicos sobre el tema en revistas especializadas.

Beca de Grado



Est. Débora A. Rodríguez.

Es estudiante avanzada de la carrera de Antropología de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires. Participó en distintos proyectos de investigación desde el año 2002 y cursó estudios con orientación hacia la antropología biológica y forense, en la Universidad de Buenos Aires y la Universidad de la Policía Federal Argentina.

Programa desarrollado conjuntamente entre la Fundación de Historia Natural Félix de Azara y la empresa Iguazú Jungle Explorer

www.fundacionazara.org.ar

ESPECTROMETRIA DE MASA



www.bdal.de



MALDI TOF/TOF
Autoflex III



ESI - TOF MS
microTOF-Q-II

MALDI TOF/TOF
MAXIMA PERFORMANCE
Autoflex III



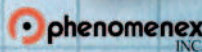
UHR - TOF
ULTRA ALTA
RESOLUCION - TOF
MAXIS



FTMS
POR TRANSFORMADA
DE FOURIER
APEX-ULTRA



TRAMPA IONICA
HCTULTRA



Representante Exclusivo



Un Equipo con Capacidad de Respuesta

Bio Esanco S.A. - Tacuarí 615 - C1071AAM - C.A.B.A. - Argentina
Tel.: 54(011) 5237-1111 / Fax: 54(011) 5236-6638
info@biosanco.com.ar / www.biosanco.com.ar

GE Healthcare

Más de 90 Reactivos de laboratorio en stock con entrega inmediata.

Consulte nuestros precios y promociones en www.gelifesciences.com

Recuerde que también distribuimos en Argentina:

- **Agilent:** Expresión génica / CGH
- **Stratagene:** Real Time PCR
- **USB:** Consumibles / Ultrapuros

Sales.ar@ge.com

(011)4576 3030

