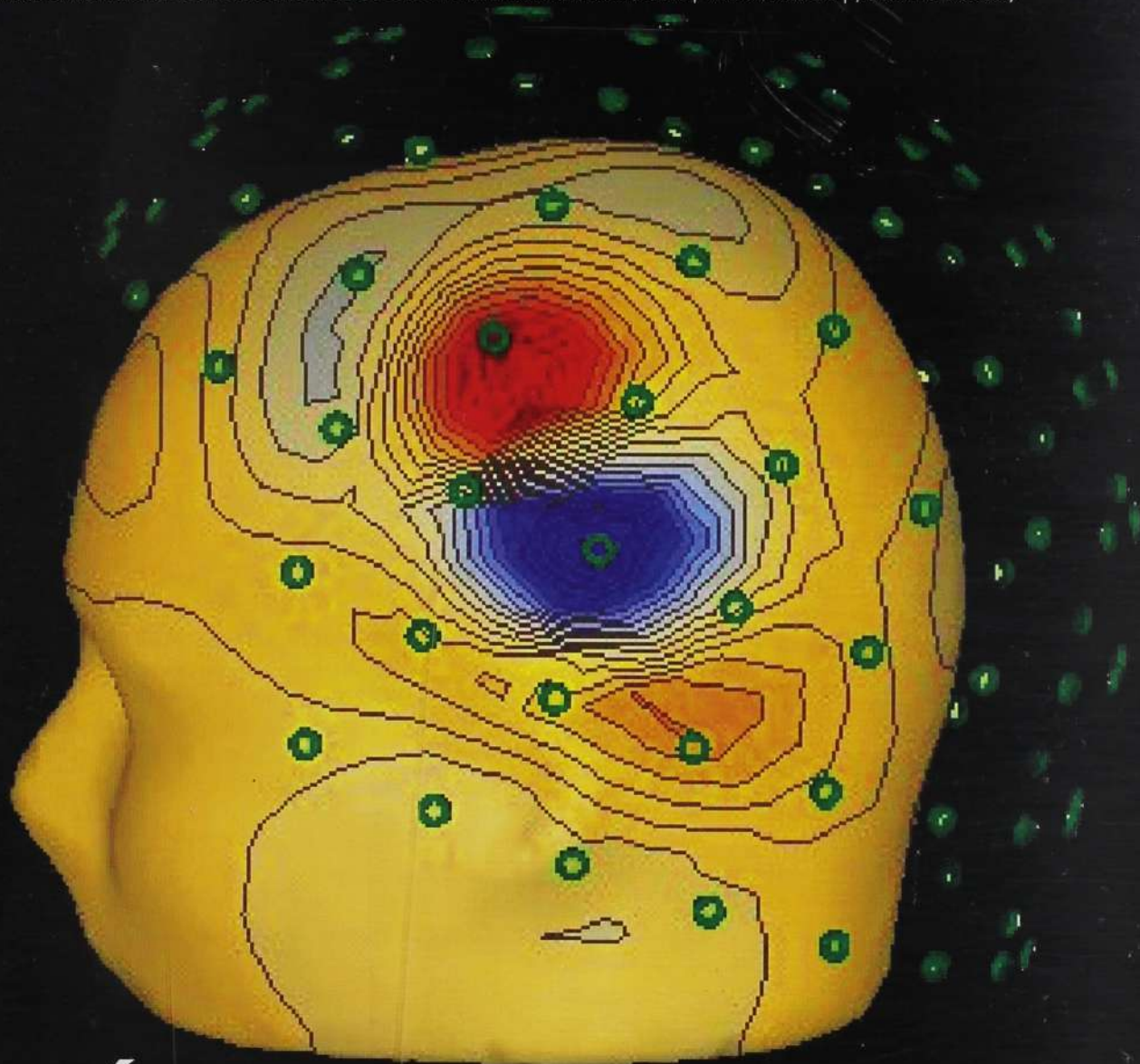




Cinvestav

26

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL | VOL. 26, NÚM. 01 | ENERO - MARZO 2007



FÍSICA MÉDICA

Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

Especialidades:

Bioelectrónica
Comunicaciones
Electrónica del Estado Sólido
Mecatrónica

Fechas importantes 2007:

Maestría:

Entrega de documentos: Abril y Mayo

Cursos propedéuticos: 14 de Mayo a 8 de Junio

Exámenes: 11 y 12 de Junio

Entrevistas: 18 a 22 de Junio

Inicio: 27 de Agosto

Doctorado:

Inicio: 27 de Agosto

Informes:

Coordinación de admisión

Dr. Carlos Alvarado Serrano
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Av. Instituto Politécnico Nacional 2508
Col. San Pedro Zacatenco
07360, México D.F.

Tel.: 5061-3800 ext. 6200, 6505, 6503

Fax: 5061-3981

Email: casbe@cinvestav.mx

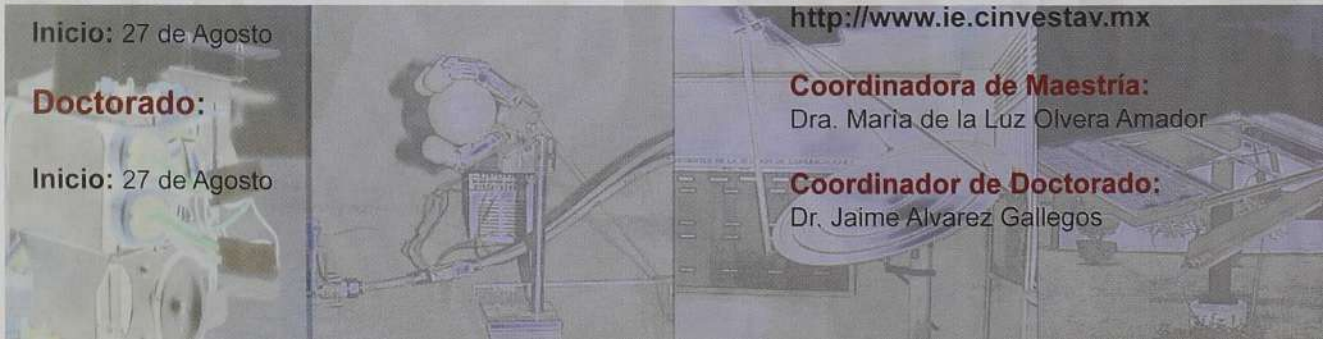
<http://www.ie.cinvestav.mx>

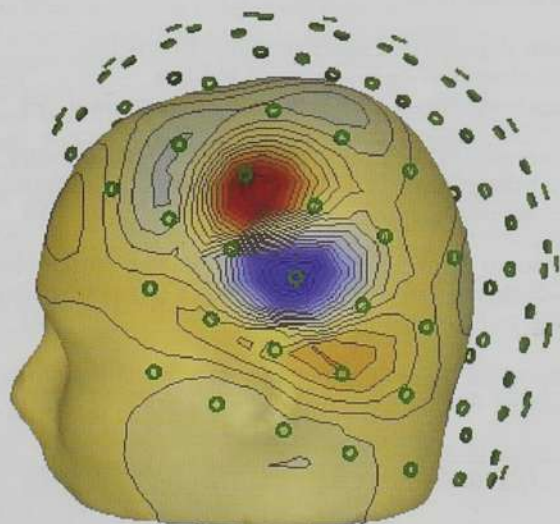
Coordinadora de Maestría:

Dra. Maria de la Luz Olvera Amador

Coordinador de Doctorado:

Dr. Jaime Alvarez Gallegos





ACTIVACIÓN DE UN FOCO EPILÉPTICO DE TIPO JACKSONIANO MEDIDO CON MAGNETOENCEFALOGRAFÍA.

Contenido

Editorial	
Luz Manuel Santos Trigo	3
Presentación	
Gerardo Herrera Corral	4
Los aceleradores de partículas y la medicina	
Gerardo Herrera Corral	6
Procesamiento de señales magnéticas del corazón y del cerebro fetales	
David Gutiérrez Ruiz	10
Imagenología y detectores en medicina	
Luis Manuel Montaña Zetina	16
La variación del ritmo cardíaco	
Jesús Guillermo Contreras	24
Radiología: un siglo de desarrollo	
Rosa Elena Sanmiguel	28
La física de las radiaciones y la dosimetría	
Hilda Mercado Uribe	38
Acción del espectro electromagnético visible como elemento de diagnóstico médico	
Ernesto Suaste Gómez y Ma. Dolores Rodríguez Guzmán	44
Inmunobiología de las mucosas, un nuevo enfoque de la protección y la adaptación al medio de nuestro organismo	
Marco Antonio Vega López	54
El proceso de la convergencia europea en educación superior: una oportunidad para la comunidad latinoamericana	
Rodrigo Trujillo González	60
Discurso de toma de protesta como Director General del Cinvestav del Dr. René Asomoza Palacio	
	76
Discurso de despedida de la Dra. Rosalinda Contreras Theurel	
	78

La revista *Cinvestav* antes *Avance y Perspectiva*, órgano oficial del Cinvestav (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados) es una publicación trimestral dedicada a la difusión y divulgación de la actividad científica y de la vida académica del Centro. Los artículos publicados son responsabilidad de sus autores. Se autoriza la publicación parcial o total del material publicado con el requisito de que se cite la fuente. La edición correspondiente a enero-marzo 2007, volumen 26, número 1 se terminó de imprimir en marzo de 2007. Tiraje: 5000 ejemplares. Certificado de Reserva de Derecho de Autor 04-2006-051210075200-102, expedido por la Dirección General de Derechos de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Certificado de Licitud de Título 13538 y Certificado de Licitud de Contenidos 11111, otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1870-5499. Negativos, impresión y encuadernación: Lito Laser S.A. de C.V., Primera Privada de Águiles Serdán núm. 28, Col. Santo Domingo Azcapotzalco, CP 02160, Del. Gustavo A. Madero, México DF. Sede del Cinvestav: Av. Instituto Politécnico Nacional núm. 2508, Col. San Pedro Zacatenco, CP 07360, Del. Gustavo A. Madero, México DF. Web del Cinvestav: www.cinvestav.mx



Cinvestav

CINVESTAV

René Asomoza Palacio
DIRECTOR GENERAL

Arnulfo Albores Medina
SECRETARIO ACADÉMICO
Apartir del 12 de abril de 2007

Marco Antonio Meraz Ríos
SECRETARIO DE PLANEACIÓN
Apartir del 12 de abril de 2007

Víctor Gabriel Gutiérrez Lugo
SECRETARIO ADMINISTRATIVO

Jania Argüelles Castro
JEFA DE DIFUSIÓN

REVISTA CINVESTAV

Luz Manuel Santos Trigo
DIRECTOR EDITORIAL

Gordana Segota
Carlos Martínez
CORRECCIÓN DE ESTILO

SERIF

Héctor Montes de Oca
Carolina Rodríguez
DISEÑO

SUSCRIPCIONES Y DISTRIBUCIÓN
revista@cinvestav.mx
T/F (55) 50 61 33 71

CONSEJO EDITORIAL

Marcelino Cerejido Mattioli
FISIOLOGÍA

Carlos Coello Coello
SECCIÓN DE COMPUTACIÓN

Antonio Fernández Fuentes
UNIDAD SALTILLO

Eugenio Frixione Garduño
SECCIÓN DE METODOLOGÍA
Y TEORÍA DE LA CIENCIA

Gabriel López Castro
FÍSICA

Luis Enrique Moreno Armella
MATEMÁTICA EDUCATIVA

José Luis Naredo Villagrán
UNIDAD QUERÉTARO

Rodrigo Tarkus Patiño Díaz
UNIDAD MÉRIDA

Ángeles Paz Sandoval
QUÍMICA

Betzabet Quintanilla Vega
SECCIÓN EXTERNA DE TOXICOLOGÍA

Eduardo Remedi Alione
INVESTIGACIONES EDUCATIVAS

Arturo Sánchez Carmona
UNIDAD GUADALAJARA

Editorial

La revista *Cinvestav*, que inicia con este número su segundo año de la nueva época, reafirma el compromiso de establecer un vínculo directo entre la comunidad académica de la institución y la sociedad en su conjunto. Además de informar a un público amplio sobre el desarrollo y productos de investigación científica y tecnológica, los contenidos de la revista intentan identificar y fomentar la discusión acerca de los temas relevantes alrededor de las disciplinas y el desarrollo de la sociedad.

El conocimiento disciplinar (las matemáticas, las ciencias naturales, la historia, las ciencias sociales, la tecnología y las artes) es uno de los grandes aportes de la humanidad, que fue desarrollado gradualmente durante muchos años por individuos y grupos académicos.

Las disciplinas representan las formas más avanzadas de pensar y explorar la naturaleza y el desarrollo del ser humano. La tarea de las escuelas, las instituciones y los centros de investigación es proveer condiciones que ayuden a los estudiantes a desarrollar o construir hábitos, recursos, conocimientos y formas de pensar asociados con estas disciplinas.

La tendencia actual en el estudio y desarrollo de la ciencia y la tecnología destaca la importancia y la necesidad de establecer programas de formación y de trabajo interdisciplinarios en los que participen grupos de distintas áreas o disciplinas. ¿Cómo educar y formar a los estudiantes para desarrollar ese pensamiento multidisciplinario? Esta es una pregunta fundamental que se debe abordar en el contexto del proyecto global de educación del país.

En un plano global, es evidente que esta sociedad con notables desarrollos tecnológicos y avances científicos demanda que sus miembros se informen acerca del impacto y alcance de esos procesos en un ámbito general. Es decir, como parte de esta sociedad, cada individuo debe constantemente reflexionar acerca de cómo la ciencia y la tecnología moldean nuestro ambiente intelectual, cultural y material. ¿Qué tipos de recursos, habilidades y conocimiento necesita un individuo desarrollar o construir para que pueda comprender y valorar los principios del desarrollo de la ciencia y la tecnología? ¿Cómo seleccionar información relevante, formular preguntas, buscar evidencias y explicar diversos fenómenos o eventos relacionados con la ciencia y la tecnología? Estas preguntas no sólo son relevantes en el ámbito académico; también deben ser parte de la reflexión y componente fundamental de un proyecto educativo y cultural de la sociedad.

En este número de la revista *Cinvestav* se distingue el esfuerzo por abordar desde campos o disciplinas distintas, la ingeniería y la física fundamentalmente, temas relacionados con el área de la medicina. Los contenidos representan una muestra de las nuevas líneas de trabajo e investigación que se desarrollan desde una perspectiva multidisciplinaria. Le agradezco al Dr. Gerardo Herrera por coordinar los trabajos que se engloban en el tema de la física médica.

Luz Manuel Santos Trigo
msantos@cinvestav.mx

Presentación

En su famoso libro *El crecimiento y la forma*, a principios del siglo pasado D^r Arcy Wentworth Thompson escribía:

Qué tan lejos llegarán las matemáticas en describir y la física en explicar la fábrica del cuerpo, nadie puede predecirlo. Puede ser que las leyes de la energía y todas las propiedades de la materia, y toda la química de los coloides sean insuficientes para entender el cuerpo como lo son para comprender el alma...

La conciencia no se explica por todas las conexiones nerviosas y neuronas de los fisiólogos; pero tampoco preguntamos a la física cómo es que la bondad se refleja en el rostro de un hombre y la maldad se traiciona a sí misma en los gestos de otros. Pero en la construcción, crecimiento y funcionamiento del cuerpo como en todo lo que es terrenal, la física es, en mi muy humilde opinión, nuestra única maestra y guía.

Wentworth dio pie a una corriente de pensamiento académico que llamó la atención al papel de la física en la forma del mundo viviente, más allá de la evolución que hasta entonces era considerada, con exageración, como determinante en la biología.

La física médica se refiere a la aplicación de la física al funcionamiento del cuerpo, así como a sus aplicaciones en la práctica médica. En este número, algunos investigadores describen los temas en que se ocupan aplicando sus conocimientos en física a la medicina.

El uso de los aceleradores en los hospitales ha despertado un vertiginoso desarrollo en la investigación de la física médica. Las posibilidades son espectaculares. Durante los próximos años, México deberá incursionar en el desarrollo de las tecnologías correspondientes, si no queremos quedar, nuevamente, en el atraso que nos lleve a comprar la instrumentación médica de los países más avanzados. El artículo "Los aceleradores de partículas y la medicina", elaborado por el Dr. Gerardo Herrera, es una expresión de lo que consideramos debe ser la gestión tecnológica en los próximos años en nuestro país.

El diagnóstico depende siempre de una buena interpretación de señales. En el mundo moderno, estas señales provienen de aparatos de medición. Pero, ¿qué tanta información es posible extraer de la señal que proviene de

un aparato? Es la pregunta que motiva a los practicantes del activo campo del procesamiento de señales. El Dr. David Gutiérrez nos cuenta algo de su trabajo en esta área con el artículo "Procesamiento de señales magnéticas del corazón y cerebro fetal".

El Dr. Luis Manuel Montaña trabaja en la obtención de imágenes y en el desarrollo de detectores aptos para el uso clínico. En su artículo "Imagenología y detectores en medicina" se aprecia que este campo ha sido crucial en el diagnóstico y, en fechas más recientes, también en el tratamiento. Es una de las áreas de la medicina donde más físicos trabajan alrededor del mundo.

En "La variación del ritmo cardíaco", el Dr. Guillermo Contreras nos cuenta sobre su trabajo en la observación de los latidos del corazón. Las variaciones que se dan en el funcionamiento de este órgano son complejas y, por tanto, requieren de estudios multidisciplinarios en que participen tanto médicos y físicos como matemáticos y expertos en cómputo.

La Dra. Rosa Elena Sanmiguel hace un recuento del más tradicional de los campos de la física médica, a saber, la radiología. Desde el descubrimiento de la radiación, conocer y medir sus efectos ha sido de crucial importancia, tal y como lo describe en su artículo "Radiología: un siglo de desarrollo".

La dosimetría no es sólo de uso de cotidiano en los hospitales y áreas donde se manejan radiaciones, es también un activo campo de investigación. En su artículo "La física de las radiaciones y la dosimetría", la Dra. Hilda Mercado nos da un panorama del campo en el que ha trabajado por varios años.

Finalmente, en "Acción del espectro electromagnético visible como elemento de diagnóstico médico", el Dr. Ernesto Suaste y Dolores Rodríguez, estudiante de doctorado, nos comentan sobre los posibles usos de la luz como elemento de diagnóstico. Ellos buscan medir la reacción ocular ante los estímulos de la luz. Las consecuencias de una medida precisa pueden ayudar en el diagnóstico de algunos de los males más frecuentes en la población de nuestro país.

Gerardo Herrera Corral
gherrera@fis.cinvestav.mx

Los aceleradores de partículas y la medicina

LA RADIACIÓN DE SINCROTRÓN CUBRE EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO DE RADIACIÓN QUE SE EXTIENDE DESDE EL INFRARROJO Y LUZ VISIBLE HASTA RAYOS X DUROS. LAS PRIMERAS FUENTES DE RADIACIÓN DE SINCROTRÓN FUERON LOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS CON FORMA DE ANILLOS, CONSTRUIDOS PARA LA INVESTIGACIÓN EN FÍSICA DE PARTÍCULAS ELEMENTALES.

Gerardo Herrera Corral

El pelo fue tomado de Beethoven por mi papá, el Dr. Ferdinand von Hiller, un día después de que Ludwig van Beethoven murió, el 27 de marzo de 1827. Mi padre me dio el cabello como regalo de cumpleaños el 1 de mayo de 1883 en Colonia (Alemania).

Paul Hiller habría de conservar el cabello por mucho tiempo, hasta que en 1943 algún miembro de su familia lo dio como regalo al Dr. Kay Alexander Fremming, quien vivía en Dinamarca en los tiempos de la segunda Guerra Mundial. Todo parece indicar que el Dr. Fremming ayudó a escapar a un grupo de judíos amenazados y, en esa ocasión, uno de ellos le dio como presente la pequeña caja que contenía el cabello del compositor.

Cuando Beethoven entró en sus treintas, empezó a sufrir de un zumbido en los oídos. Pronto su capacidad auditiva comenzó a fallar y aunque gozaba de largas temporadas sin problemas, finalmente acabó en la sordera total. Todos los esfuerzos de los médicos fueron inútiles.

Por esos tiempos Beethoven se empezó a quejar de problemas digestivos. No muy dado a seguir las indicaciones médicas, tomaba bebidas alcohólicas con la intención de estimular el apetito, que cada vez era

menor. El excesivo uso de bebidas fuertes le trajo una inflamación intestinal que, aunque controlada, a menudo lo llevaba a sufrir de cólicos y dolor intestinal. Según su doctor, Andreas Wawruch, esto debió favorecer la enfermedad, que finalmente le ocasionaría la muerte. Cuando Beethoven tenía 31 años escribió:

Mi oído se ha debilitado los últimos tres años. Frank quería restaurar mi salud con medicamentos más fuertes y curar mi sordera con aceite de almendras pero no dio resultado. Mi oído está cada vez peor. Entonces un ayudante del doctor recomendó baños fríos y otro más hábil, los tradicionales baños tibios en el Danubio. Esto fue fantástico, pero mi sordera siguió igual o peor. Este invierno estuvo realmente miserable. Tuve graves ataques de cólicos y recaí en mi situación anterior.

En su libro *Investigaciones médicas sobre la vida de los grandes compositores*, John O'Shea especula sobre la enfermedad de Beethoven señalando que pudo haberse tratado de un daño directo al nervio auditivo o de una consecuencia de osteosclerosis, que es causa común de sordera en hombres de 28 años, o incluso de una consecuencia de sífilis causante de inflamación crónica; finalmente, atribuye su muerte a una probable

GERARDO HERRERA CORRAL. Doctor por la Universidad de Dortmund (Alemania). Estancias posdoctorales: Fermi National Accelerator Laboratory (EUA) y Centro de Investigaciones Físicas (Brasil). Profesor titular del Departamento de Física (Cinvestav). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores, nivel III; es miembro del Panel de Instrumentación, Innovación y Desarrollo, así como del Comité de Coordinación de Computo en la Física de Altas Energías, ambos del International Committee for Future Accelerators. Ex presidente de la

División de Física Médica y de la División de Partículas y Campos de la Sociedad Mexicana de Física. Actualmente trabaja en la colaboración ALICE del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN). Estudia las aplicaciones de la física en la medicina y trabaja con algunas ideas de proyectos a futuro en esta área. Reconocimientos: Premio de la Investigación de la Academia Mexicana de Ciencias (2001); Premio a la Investigación Científica de la Sociedad Mexicana de Física (2006). gherrera@fis.cinvestav.mx

cirrosis. Otros estudiosos han considerado que la sordera del compositor se debía al tifus, que aparentemente sufrió en algún momento de su vida. También hay quienes opinan que sucumbió al lupus sistémico eritomatoso, lo que explicaría una cicatriz del rostro, visible en una de las máscaras que fueron tomadas de Beethoven en 1812.

En 1994, la familia Fremming vendió el estuche con el cabello de Beethoven por 3 600 libras a la American Beethoven Society. Poco después, y en condiciones de laboratorio, se abrió el estuche que contenía 582 piezas de pelo. De éstas se tomaron 422 y los estudios científicos dieron inicio.

En el año 2000, físicos del Laboratorio Nacional de Luz de Sincrotrón de Argonne, en Estados Unidos, realizaron un experimento no destructivo en seis cabellos del compositor. El equipo de investigadores encontró elevados niveles de plomo, de hasta 60 partes por millón, lo que es más de 100 veces mayor a los niveles normales de la actualidad. Un severo envenenamiento con plomo es consistente con la sintomatología de calambres, fiebre, abscesos y dolor en los ojos. El padecimiento le ocasionó sordera y debió haber impactado en su personalidad.

Por otro lado, el equipo de físicos no encontró mercurio, por lo que no hubo evidencia de tratamiento con compuestos de mercurio, usados en esa época para curar la sífilis. De dónde provino el plomo, no es claro. Pudo haber sido de agua mineral, de alguna comida, de vino guardado en recipientes forrados con plomo o botellas de cristal de plomo.

En el estudio, los físicos aplicaron técnicas convencionales, así como técnicas de sincrotrón, que incluyen fluorescencia de rayos X. Aplicaron pruebas para otros 40 elementos pero no encontraron nada distintivo. Algunos expertos han relacionado el genio y la irritabilidad con desórdenes de absorción de glucosa u otros elementos pero el estudio no pudo confirmar nada al respecto. Las pruebas mostraron que el compositor no recibió morfina o preparados de opio para aliviar el dolor en los últimos seis meses de su vida. Al inicio de su testamento Beethoven dice:

¡Oh! ustedes que piensan o dicen que soy malévol, obstinado o misántropo, cuán grande es su error. No saben la causa secreta que me hace parecer así ante sus ojos.

A las 5:45 de la tarde del 26 de marzo, mientras caía una torrencial tormenta, la habitación de Beethoven se iluminó repentinamente con la luz de un relámpago. Los ojos del compositor se abrieron y levantó su puño derecho por varios segundos, con una expresión seria y amenazante en su rostro. Cuando su brazo cayó, sus ojos se cerraron y no hubo más palabras ni más latidos en su corazón.

Las técnicas de sincrotrón son de particular utilidad en el análisis de muestras pequeñas. No son destructivas y el tamaño del haz permite estudiar la distribución de metales en un fragmento de cabello. El intenso brillo de la luz de sincrotrón permite detectar niveles muy bajos



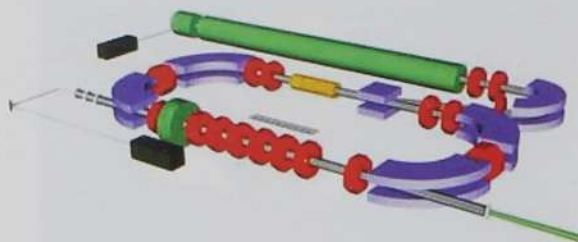
Ludwig van Beethoven (1770-1827)

de metales y otros elementos, lo que no es posible hacer con ninguna otra técnica. Científicos australianos están usando ahora técnicas similares para estudiar el cabello de trabajadores de fundición de plomo en Port Pirie, al sur de Australia. El objetivo es tener una idea clara de la exposición al plomo de los trabajadores. En caso de ser exitosa, la técnica podría reemplazar el procedimiento usual que requiere un muestreo frecuente de sangre.

El Dr. Ivan Kempson, de la Universidad de Australia, realiza estos estudios con la ayuda de laboratorios de luz de sincrotrón en Japón. Mientras tanto, los australianos construyen sus propias instalaciones; en 2006, su proyecto vio los primeros avances y en pocos meses el laboratorio de luz de sincrotrón estará listo para entrar en operación.

Una luz muy especial

La radiación de sincrotrón cubre el espectro electromagnético de radiación que se extiende desde el infrarrojo y luz visible hasta rayos X duros. Las primeras fuentes de radiación de sincrotrón fueron los aceleradores de partículas con forma de anillos, contruidos para la investigación en física de partículas elementales. En estos aceleradores, partículas cargadas como electrones y sus antipartículas (positrones) viajan a velocidades cercanas a la de la luz. Dichas partículas son controladas con campos magnéticos que doblan las trayectorias produciendo una fuerte aceleración centrípeta. De acuerdo con las leyes de la física, una partícula cargada que sea acelerada deberá emitir radiación electromagnética. En 1947, mientras trabajaba



La fuente de luz compacta mide unos cuantos metros y emite rayos X de muy alta energía.

en uno de los primeros aceleradores de electrones en la compañía General Electric, Floyd Haber descubrió una tenue luz, que resultó ser la consecuencia de la aceleración de los electrones, y fue bautizada con el nombre de radiación de sincrotrón. El científico se encontraba viendo la máquina desde atrás del bloque de concreto para protegerse de la radiación. La intensidad de la radiación está determinada por la energía de los electrones y por el radio del acelerador. La intensidad de la radiación se incrementa cuando el radio del acelerador disminuye.

A quienes no están muy familiarizados con el mundo de los aceleradores, les sorprenderá saber que cuando se hizo un estudio, hace diez años, sobre aceleradores y sus aplicaciones en el mundo, se encontró que existen cerca de 10 mil y que la gran mayoría no es usada para la investigación de partículas elementales sino para aplicaciones prácticas. En ese estudio se encontró que sólo 112 aceleradores llevan a las partículas a más de 1 GeV de energía, y de éstos, sólo un tercio es dedicado a investigación en física de partículas elementales. Los otros dos tercios son fuentes de luz de sincrotrón.

Existen, además, 5 mil aceleradores de baja energía, contruidos para aplicaciones médicas como radioterapia, investigación biomédica y producción de isótopos radiactivos. Un número comparable de aceleradores se encuentra en la industria. Los aceleradores han encontrado uso amplio en la implantación de iones y en el tratamiento de superficies. Más de 99% de los aceleradores contruidos tienen propósitos fuera de la investigación de la física de altas energías.

Aplicaciones en la medicina

Aceleradores llamados ciclotrones producen cerca de 20% de los fármacos radiactivos que se inyectan a los pacientes. Los ciclotrones aceleran protones, típicamente a energías de hasta 40 MeV. Estos aceleradores son diseñados para funcionar de manera



Radiación de sincrotrón visible.

confiable y producir haces de alta intensidad con un mínimo de intervención humana.

La tomografía por emisión de positrones usa isótopos radiactivos junto con un sistema de visualización, basado en técnicas de detección de partículas irradiadas. Estos isótopos emiten positrones que son detectados cuando se aniquilan con electrones del medio emitiendo dos fotones que vuelan en direcciones opuestas. Los isótopos son incorporados en moléculas bioquímicas que buscan su camino en el cuerpo humano a los sitios de interés médico. Una vez ahí, los isótopos radiactivos decaen emitiendo positrones que producirán la luz que revele la imagen tridimensional del lugar deseado. Los isótopos tienen un tiempo de vida corto, típicamente de 20 minutos. Es por eso que los aceleradores que producen los isótopos deberán estar instalados en el cuarto de al lado.

En el pasado, la radioterapia hacía uso extensivo de agujas de radio o rayos gamma de cobalto radiactivo. Actualmente se usan aceleradores de electrones en el rango de 15 a 20 MeV que producen rayos X, que a su vez se dirigen a los tumores. La radiación que se aplica al cuerpo para eliminar tejido tumoral daña también el tejido sano que lo rodea y, de manera inevitable, el tejido que se encuentra en el camino de la radiación al tumor. Los protones ofrecen una solución, ya que depositan toda su energía en un pico delgado, llamado *pico de Bragg*. Esto quiere decir que los protones pasan por el tejido sin mayores efectos dejando sin daño el tejido que está en su camino. Cuando llegan al tumor, depositan ahí toda su energía destruyendo de manera más eficaz el tejido maligno.

La energía ideal de los protones es de 200 MeV, energía suficiente para alcanzar cualquier órgano interno del cuerpo humano. Se han construido sincrotrones de protones específicamente con este propósito. Ejemplos de éstos son el de Loma Linda en San Diego (EUA) y el de HIMAC en Japón. Otros muchos están en planes de construcción.

El asesinato de Napoleón

Después de la batalla de Waterloo, Napoleón fue entregado a los ingleses y deportado a un perdido islote africano llamado Santa Elena. Ahí, mientras sucumbía lentamente, escribió sus memorias. Su muerte, el 5 de mayo de 1821, aún despierta controversia entre los especialistas. Mucha gente estaba interesada en borrar su presencia del aire tan pronto como fuese posible, pues hay quienes alimentan esperanzas y van llenando sospechas de sedición con la pura certeza de estar vivos.

Se atribuye su muerte a una úlcera que le provocó un cáncer en el estómago, pero la idea de que en realidad fue asesinado aún es debatida. En junio de 2001, la sospecha de que Napoleón fue asesinado lentamente con arsénico parecía haber sido confirmada con estudios del pelo que fue tomado de su cabeza después de su muerte. Estudios con luz de sincrotrón confirmaron un contenido de arsénico 38 veces mayor que lo normal.

No contentos con el resultado, la revista *Science et Vie* comisionó a un grupo de expertos para realizar las pruebas en cabello de Napoleón de 1805, 1814 y 1821. En todas estas muestras se encontraron niveles de arsénico muy altos. Así, los especialistas concluyeron que el envenenamiento no fue la causa de su muerte. El cabello humano contiene en promedio 0.8 partes por millón de arsénico. Las muestras de cabello tomadas del emperador contienen entre 15 y 100 partes por millón.

Entonces, los investigadores estudiaron la manera en que se incorporan las sustancias al pelo; en particular encontraron que el arsénico se retiene fácilmente

contaminando las muestras de estudio. Los registros históricos revelaron posibles fuentes de contaminación como pólvora, veneno para ratas o, más aún, polvo para el cabello. Quienes sostienen la teoría de una conspiración hacen ahora gestiones para exhumar los restos de Napoleón, con el objetivo de hacer estudios de su DNA. La cantidad de cosas que se pueden aprender con el uso de una luz especial es enorme.

Fuente de luz compacta

Los aceleradores de partículas que producen la luz de sincrotrón con longitudes de onda del orden de angstroms son máquinas de gran tamaño. Existen algunas docenas en el mundo. Recientemente, un grupo de físicos logró construir una fuente compacta de luz capaz de producir esta radiación de manera óptima. Para lograrlo, se ha construido un pequeño acelerador de electrones. Cuando los electrones han alcanzado una energía de alrededor de 25 MeVs se lo hace chocar con un haz de luz láser. En el choque se da un proceso conocido por los físicos como dispersión Compton (en honor al físico que describió por primera vez el comportamiento de la radiación en procesos de colisión de luz con electrones, Arthur Compton, 1892-1962), lo que produce radiación con longitudes de onda similares a las que se obtienen en los aceleradores mas grandes.

Esta nueva fuente de luz puede ser una excelente opción para nuestro país pero será de mayor impacto si nuestra comunidad adquiere el conocimiento tecnológico necesario para diseñar máquinas como ésta. ●



Napoleón Bonaparte (1769-1821).



Cavidades resonantes superconductoras.



Figura 1. Distintos tipos de magnetómetros usados para estudios fetales. (a) Sistema Cryoton: biomagnetómetro de un solo detector. Cryoton UK Ltd. (b) Sistema SARA: biomagnetómetro dedicado para estudios fetales con 151 detectores. CTF Systems Inc. (c) Sistema Magnes 1300c: biomagnetómetro de 67 detectores. 4-D Neuroimaging.

Procesamiento de señales magnéticas del corazón y el cerebro fetales

LOS AVANCES DE LA DÉCADA PASADA EN CUESTIÓN TECNOLÓGICA HAN PERMITIDO A LOS CIENTÍFICOS DEL ÁREA INVESTIGAR DIRECTAMENTE EL DESARROLLO FUNCIONAL DEL CORAZÓN Y EL CEREBRO HUMANO DESDE LA GESTACIÓN MISMA. DIVERSAS TÉCNICAS PARA LA EXAMINACIÓN DE LOS SISTEMAS CARDIOVASCULARES Y NERVIOSO PRENATAL PERMITEN HACER UNA EVALUACIÓN DEL DESARROLLO FETAL EN CONDICIONES SALUDABLES, ASÍ COMO LA IDENTIFICACIÓN CLÍNICA DE PATOLOGÍAS RELEVANTES.

David Gutiérrez Ruiz

A pesar de que en el último siglo el estudio del corazón y el cerebro humanos alcanzaron logros significativos, es muy probable que los desarrollos más importantes se encuentren aún por venir. Los avances de la década pasada en cuestión tecnológica han permitido a los científicos del área investigar directamente el desarrollo funcional del corazón y el cerebro humano desde la gestación misma. Diversas técnicas para la examinación de los sistemas cardiovasculares y nervioso prenatal permiten hacer una evaluación del desarrollo fetal en condiciones saludables, así como la identificación clínica de patologías relevantes.

Existe una gran variedad de técnicas invasivas y no invasivas que permiten obtener información de la actividad del corazón fetal, entre otras, el ultrasonido Doppler (utilizado para monitorear el ritmo cardíaco), el análisis ultrasónico de modo M y la electrocardiografía fetal (mediante electrodos uterinos o con electrodos colocados sobre la superficie abdominal de la madre). Todos estos métodos tienen la ventaja de que su instrumentación no es tan sofisticada y son

utilizables clínicamente con un grado razonable de entrenamiento. Sin embargo, su resolución no es óptima, especialmente en etapas tempranas de la gestación. Otros métodos, como la fonocardiografía, no son considerados de uso rutinario, mientras que la magnetocardiografía fetal es una técnica relativamente nueva, que usa registros del campo magnético del corazón fetal detectados cerca del abdomen materno. Esta última técnica supera en resolución a todas las mencionadas anteriormente, ya que es capaz de registrar ritmos cardíacos fetales en etapas tan tempranas como la semana 16 de la gestación. Sin embargo, la instrumentación requerida para medir los campos magnéticos fetales es aún sofisticada y muy cara para aplicaciones clínicas.

En lo que respecta al estudio de la actividad cerebral del feto *in utero*, clínicamente se llegan a realizar mediciones de electroencefalografía utilizando electrodos superficiales en la cabeza del feto, tras la ruptura de las membranas amnióticas durante la labor de parto. Sin embargo, en la actualidad sólo contamos con dos tipos de tecnologías no invasivas de reciente introducción para la

DAVID GUTIÉRREZ RUIZ Ingeniero mecánico electricista egresado de la UNAM en 1997, maestro en Ingeniería Electrónica y doctor en Bioingeniería por la Universidad de Illinois en Chicago en 2000 y 2005, respectivamente. Realizó una estancia posdoctoral en el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas de la UNAM de marzo de 2005 a mayo de 2006. En junio de 2006 se incorporó al

Cinvestav, Unidad Monterrey, como investigador nivel 2B. Su investigación es en el área de procesamiento estadístico de señales y sus aplicaciones a la biomedicina. También está interesado en el procesamiento de imágenes, neurociencias y algoritmos en tiempo real. davidgtz@fis.cinvestav.mx



Figura 2. Vista frontal del arreglo de SQUIDS del sistema SARA.

medición de la actividad cerebral fetal: la resonancia magnética funcional y la magnetoencefalografía. Ambas técnicas tienen varias ventajas y desventajas con respecto a su aplicación en estudios fetales. La resonancia magnética funcional tiene limitaciones inherentes que incluyen la dificultad de acceder al espacio de medición, altos niveles de sonido y problemas relacionados con la seguridad de exponer al feto a altos campos y gradientes magnéticos. Sin embargo, la resonancia magnética funcional provee información tanto funcional como anatómica. En contraste, la magnetoencefalografía fetal es un método totalmente pasivo y no invasivo con resolución temporal superior, pero que no provee información anatómica. Esta información adicional tiene que ser obtenida de alguna técnica de imagenología complementaria, tal como el ultrasonido.

En este artículo revisaremos los principales avances en las técnicas de examinación fetal basadas en señales magnéticas, es decir, la magnetocardiografía fetal (fMCG) y la magnetoencefalografía fetal (fMEG). Comenzaremos con una breve explicación del origen de los campos magnéticos que se producen en sistemas biológicos y las condiciones en las que se modela su comportamiento. Más adelante hablaremos de la instrumentación necesaria para la medición de dichos campos en el feto y, en especial, de nuestra experiencia con el sistema SARA (siglas en inglés del *SQUID Array for Reproductive Assessment*) en el análisis de señales de fMCG y fMEG. En ambos casos caracterizaremos las señales

que se obtienen: hablaremos de su magnitud, su comportamiento temporal y espacial, y de las fuentes de ruido que las afectan. Finalmente, veremos algunas técnicas de procesamiento utilizadas para obtener información de la actividad fisiológica del feto a partir de dichas señales magnéticas, así como sus ventajas y desventajas para su potencial aplicación clínica en examinación fetal.

Bioelectromagnetismo

El bioelectromagnetismo es una disciplina que examina los fenómenos eléctricos y magnéticos que se generan en los tejidos biológicos (J. Malmivuo y R. Plonsey, 1995). Estos fenómenos incluyen el comportamiento de los tejidos excitables (fuentes bioelectromagnéticas), las corrientes y los potenciales eléctricos generados en un volumen (en nuestro caso, un órgano como el corazón o el cerebro), los campos magnéticos dentro y fuera del cuerpo, entre otros.

En el contexto del bioelectromagnetismo estudiamos el comportamiento de grupos de células excitables, tales como neuronas o miocitos (células musculares), que responden a impulsos eléctricos y transmiten esa excitación a células vecinas. La respuesta de cientos o miles de células en una región pequeña produce una corriente eléctrica, que progresivamente se va distribuyendo en el volumen formando un campo eléctrico. La generación de campos eléctricos a partir de fuentes biológicas es a lo que llamamos *fenómeno bioeléctrico*. Este fenómeno tiene variaciones en tiempo y espacio, dependiendo de la magnitud y dirección de la excitación, la conformación del volumen y las propiedades eléctricas de los tejidos en cuestión. Dicha variación en el campo eléctrico genera un campo magnético; esto, de acuerdo con la ley universal establecida por Maxwell, la cual indica que siempre que exista un campo bioeléctrico, existirá un campo biomagnético y viceversa.

En el caso del cerebro, grupos de miles de neuronas se activan de manera organizada en regiones específicas de la corteza ante un estímulo. Esta activación produce un flujo eléctrico sobre la corteza, que a su vez genera un campo magnético del orden de 50-500 fT (fempta Teslas), lo que corresponde a 10^{-9} o 10^{-10} veces el campo gravitacional de la Tierra. La medición de estos campos fuera de la cabeza es a lo que se denomina magnetoencefalografía (MEG) y su implementación está basada en dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID, por sus siglas en inglés). Los SQUIDS son detectores sensibles a los pequeños

En la actualidad, sólo contamos con dos tipos de tecnologías no invasivas de reciente introducción para la medición de la actividad cerebral fetal: la resonancia magnética funcional y la magnetoencefalografía.

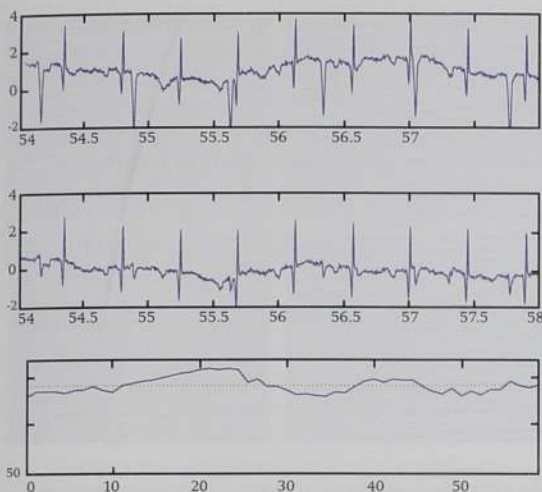


Figura 3. Monitoreo del ritmo cardiaco de un feto en la semana 33 de gestación utilizando señales de fMCG capturadas en un SQUID del sistema SARA. (a) Sección de la señal combinada de mMCG y fMCG (fT vs. segundos). (b) Señal de fMCG extraída. (c) Ritmo cardiaco fetal (latidos por minuto vs. segundos).

campos biomagnéticos, y es mediante un arreglo de varios de estos detectores distribuidos sobre la cabeza que se logran las mediciones. Desde su introducción (D. Cohen, 1972), el MEG ha generado nuevas piezas de información acerca del funcionamiento del cerebro humano y se espera que esta tecnología crezca en importancia conforme emerjan nuevas aplicaciones clínicas. Más información de la teoría, la instrumentación y las aplicaciones clínicas del MEG puede encontrarse en M. Mähäläinen y cols. (1993).

En lo que respecta a mediciones fuera del tórax de los campos biomagnéticos producidos por la actividad cardíaca, éstas se realizan con la magnetocardiografía (MCG). La metodología del MCG está íntimamente relacionada con la del MEG: en lugar del cerebro, el volumen en cuestión es el corazón, en donde redes de miocitos distribuyen corrientes de excitación a sus células vecinas. Aunque el corazón es la fuente biomagnética más grande de nuestro cuerpo, la magnitud del MCG se encuentra alrededor de 100 pT (pico Teslas), que es aproximadamente 10^{-6} veces el campo gravitacional de la Tierra. Mucha de la teoría y la práctica relacionada con el MEG igualmente se aplica al MCG (J. Nenonen y cols., 1991) bajo la consideración de que la geometría del tórax es mucho más compleja que la de la cabeza, aunque el cerebro es funcionalmente más complejo que el corazón.

Hasta este punto hemos hablado en forma general del origen del fenómeno biomagnético y cómo es medido: en el cerebro usando MEG y en el corazón con MCG. Sin embargo, las condiciones volumétricas se complican aún más cuando estudiamos el mismo fenómeno en el feto. En la actualidad existe un gran interés en problemas relacionados con la selección del tipo de volumen (simple o realístico), el número y la geometría de cada uno de los

compartimentos a considerar (abdomen materno, cuerpo del feto, placenta, útero), la posición del feto, su orientación y periodo gestacional. Otro problema de gran importancia está relacionado con el diseño del arreglo óptimo de SQUIDS que proporcione una mejor señal de fMCG y fMEG. A continuación discutiremos algunos de los avances en estas áreas.

Adquisición de señales

Los estudios de fMCG y fMEG se realizan utilizando magnetómetros con uno o hasta varios SQUIDS colocados sobre el abdomen de la madre. Estos sistemas usualmente operan en cámaras blindadas que reducen el ruido externo. Algunos ejemplos de estos sistemas se muestran en la figura 1. De ellos, el sistema SARA es el único sistema no invasivo dedicado a estudios fetales (S. Robinson y cols., 2000). El sistema cuenta con un arreglo de 151 SQUIDS distribuidos sobre un área cóncava de 850 cm^2 , diseñada específicamente para cubrir el abdomen materno (figura 2). Este diseño permite a la madre mantenerse sentada durante las mediciones, lo que es menos confinante y reduce el riesgo de producir compresión hipotensiva, como podría suceder en posición supina. Con SARA se pueden llevar a cabo investigaciones sobre la actividad cerebral del feto por respuesta evocada utilizando estímulos visuales y auditivos, así como mediciones de la actividad espontánea (H. Preissl y cols., 2005). Además, es posible monitorear en tiempo real el ritmo cardíaco fetal utilizando algoritmos de extracción de las señales cardíacas materna y fetal a partir de las señales adquiridas por el sistema SARA (D. Gutiérrez y cols., 2004).

La señal obtenida por el sistema SARA corresponde a un conjunto de campos generados por diversas fuentes biológicas, tales como el corazón materno, músculo uterino, estómago materno, así como ruido magnético producido por el movimiento, además de las señales de fMCG y fMEG deseadas. Es por ello que el primer paso en el estudio de las señales fetales corresponde a la separación de las componentes de interés mediante técnicas de procesamiento de señales. Una vez canceladas las fuentes no deseadas, el magnetocardiograma materno (mMCG) y el fMCG son las señales dominantes, quedando el fMEG oculto bajo ellas. La magnitud del fMEG se encuentra en el orden de los 10 a los 80 fT, mientras que el fMCG y mMCG pueden alcanzar valores de hasta 10 pT. Cerca del corazón materno, el mMCG tiene una magnitud de hasta 100 pT. Por ello, separar la señal de fMEG y comprobar su origen fisiológico no es tarea fácil. Para eso se utilizan métodos avanzados de proyección ortogonal y de redistribución topográfica de las señales (J. Vrba y cols., 2004).

fMCG

El uso de instrumentos como el sistema SARA permite monitorear continuamente al feto en forma segura, con el fin de caracterizar tanto su desarrollo normal como para identificar posibles patologías. La gran mayoría de

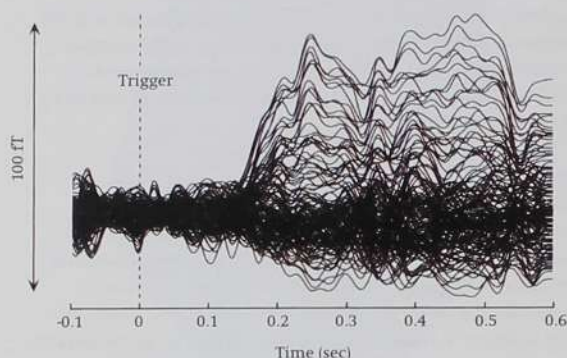


Figura 4. Colección de las 151 señales de fMEG en respuesta evocada auditiva obtenidas con SARA.

los esfuerzos se han enfocado al estudio de la variabilidad del ritmo cardíaco (en inglés *heart rate variability* o HRV) y, en particular, al estudio de ciertas variables de la señal de HRV, que están íntimamente relacionadas con aspectos fisiológicos del desarrollo normal del feto. Actualmente, el seguimiento del ritmo cardíaco fetal representa uno de los elementos más importantes en la evaluación clínica y el estudio del desarrollo neuronal del feto. Sin embargo, la detección de la señal de fMCG depende de la habilidad de separarla de la señal de mMCG. Por ello, los sistemas de monitoreo del ritmo cardíaco fetal no sólo tienen que lidiar con este problema, sino que deben ser computacionalmente simples y con suficiente rapidez en el procesamiento para lograr captar pequeños cambios en el ritmo de un latido a otro.

En estas condiciones, se ha propuesto un método para monitoreo del ritmo cardíaco fetal en tiempo real (D. Gutiérrez y cols., 2004; S. Waldert y cols., 2005). Este método se basa en la detección de la componente R (pico positivo de la señal cardíaca asociado con la depolarización ventricular) del fMCG a partir de señales adquiridas por el sistema SARA de manera continua. Un ejemplo de los resultados obtenidos con este sistema de monitoreo se muestra en la figura 3, en donde la señal combinada de mMCG y fMCG (figura 3a) es tratada con técnicas de filtrado adaptativo para extraer la señal de fMCG (figura 3b). Una vez que se cuenta con la señal de fMCG, el ritmo cardíaco es calculado como un promedio móvil ponderado de la distancia entre las componentes R a cada latido (figura 3c). Este método ha probado ser efectivo para la estimación del ritmo cardíaco fetal en tiempo real con un nivel bajo de error en la estimación, por lo que actualmente se estudia su implementación en sistemas de monitoreo clínico, donde el seguimiento de los signos vitales del feto es necesario.

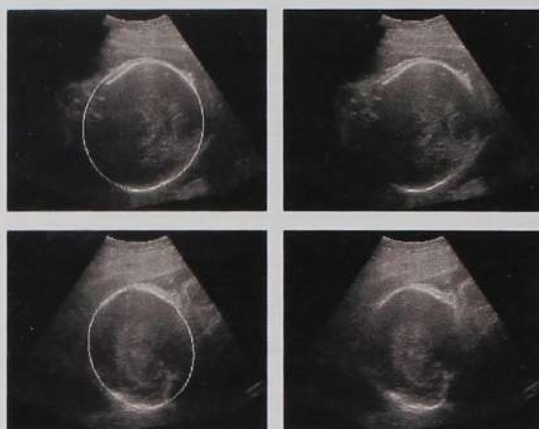


Figura 5. Imágenes de ultrasonido en los planos transaxial (fila superior) y sagital (fila inferior) mostrando la aproximación de la geometría de la cabeza del feto con elipses. En la primera columna se muestra la imagen original, mientras que en la segunda se muestra la aproximación lograda.

Entre las ventajas con las que cuenta el fMCG, comparado con métodos clínicos convencionales de exploración fetal, podemos mencionar la detección temprana (el fMCG puede ser detectado desde la semana 16 de gestación) y su superior resolución temporal (con capacidad de detectar cambios en la señal en el orden de milésimas de segundo). Es por ello que actualmente se analiza el uso de esta tecnología para el estudio del HRV fetal y se busca establecer la relación existente entre este índice de variabilidad, la influencia del sistema nervioso autónomo y los procesos de maduración y plasticidad neuronal del feto (D. Gutiérrez y H. Preissl, 2007).

fMEG

El interés en usar MEG para estudiar el cerebro fetal ha crecido desde que se reportaron las primeras mediciones de respuesta neuronal fetal a estímulos auditivos (T. Blum y cols., 1985). Desde entonces, no sólo se han logrado avances significativos en la detección de respuesta evocada tanto a estímulos auditivos como visuales, sino también en la detección de actividad neuronal espontánea del cerebro fetal (H. Preissl y cols., 2004).

En la mayoría de los estudios de respuesta evocada, el procedimiento general se basa en la detección de cambios en la señal de fMEG alrededor de los 200 ms (milisegundos) después de alguna estimulación. Esto se asemeja al componente de actividad cerebral que se observa en adultos y se conoce como componente N100. Un ejemplo de este cambio en la actividad cerebral en el feto puede verse en la figura 4. En ese caso, el pico de la señal de fMEG alcanza magnitudes de entre 30 y 175 fT en un periodo de 125 ms a 200 ms después de que un sonido (*trigger*) es presentado sobre el abdomen de la madre.

La validez fisiológica de la respuesta evocada que se mide con fMEG puede ser comprobada mediante la localización de la fuente de actividad cerebral en un

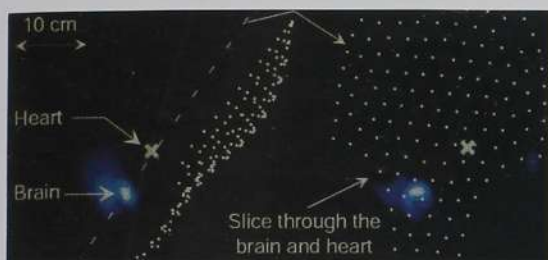


Figura 6. Mapa de actividad magnética obtenida con SARA (puntos en blanco indican la posición de los SQUIDS).

modelo fetal predefinido. Si determinamos que la señal medida realmente proviene de algún lugar en el cerebro del feto, entonces sabremos que muy posiblemente la señal sea representativa de actividad neuronal fetal. En D. Gutiérrez y cols. (2005) se propone un modelo que aproxima la geometría de la cabeza del feto a un elipsoide, mientras que la actividad cerebral se modela como un dipolo eléctrico. Entonces, a partir de mediciones de fMEG es posible determinar la magnitud, la dirección y la localización de la fuente de actividad mediante el método de estimación de máxima verosimilitud (*maximum likelihood estimate*, MLE, en inglés). Las dimensiones exactas del elipsoide que mejor aproxima la geometría de la cabeza del feto son determinadas a partir de imágenes de ultrasonido en distintos planos (figura 5). Las imágenes son captadas previo al estudio de fMEG con un equipo de ultrasonido en 3-D, con lo que se obtienen múltiples imágenes de cortes en los planos transaxial y sagital de la cabeza del feto. En cada imagen se aproxima una elipse y a partir de la colección de elipses se obtiene el elipsoide que mejor modele la cabeza del feto. Si juntamos la información funcional obtenida del fMEG (figura 4) con la información anatómica del ultrasonido (figura 5), podemos obtener mapas de actividad magnética del feto en cualquier instante de tiempo. En la figura 6 se muestra uno de esos mapas para el pico de la respuesta

evocada de un feto en la semana 33 de gestación. Podemos observar que el pico de la señal se encuentra muy cercano a la región uterina, en donde se espera localizar la cabeza del feto en esta etapa de la gestación.

El fMEG cuenta con una resolución temporal superior a la de otros métodos para analizar la actividad cerebral. Sin embargo, su resolución espacial es pobre y lejos de alcanzar los niveles obtenidos, por ejemplo, con resonancia magnética. Actualmente se trabaja en el desarrollo de métodos de procesamiento que implementan filtros espaciales para mejorar la resolución de mapas como el de la figura 6. Igualmente se planea la realización de estudios más extensos que incluyan tanto respuesta evocada como actividad espontánea, ya que el primer tipo de actividad tiene la limitante de sólo poderse observar a partir del sexto mes de gestación. El estudio de la actividad espontánea permitirá la evaluación del desarrollo neurológico fetal en conjunción con el análisis de HRV realizado con fMCG (D. Gutiérrez y H. Preissl, 2007).

Comentarios finales

Las técnicas no invasivas de fMCG y fMEG permiten el análisis de la actividad del corazón y cerebro fetales *in utero* mediante mediciones pasivas de los campos magnéticos que emanan del abdomen materno. Algunos factores que favorecen el empleo de estas técnicas sobre otras usadas en la actualidad son su gran resolución temporal, la temprana etapa de la gestación en la que se detectan y la seguridad del feto durante los estudios. Todo esto, conjuntado con técnicas avanzadas de procesamiento de señales, hace posible el análisis de distintas variables que son indicativas del normal desarrollo del feto o bien de posibles patologías. Aunque sistemas para medición como SARA todavía se encuentran lejos de su utilización clínica extensiva (principalmente por la sofisticación del sistema y su alto costo), existe gran interés en seguir trabajando en sistemas dedicados al estudio del desarrollo del corazón y el cerebro fetal. ●

[Bibliografía]

- Blum, T., Saling, E. y Bauer, R. First magnetoencephalographic recordings of the brain activity of the human fetus. *British Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 92: 1224-1229, 1985.
- Cohen, D. Magnetoencephalography: Detection of the brain's electrical activity with a superconducting magnetometer. *Science*, 175: 664-666, 1972.
- Gutiérrez, D., Nehorai, A., McKenzie, D., Eswaran, H., Lowery, C.L. y Preissl, H. Online fetal heart rate monitoring using squid sensor arrays. En *Proceedings of the 14th International Conference in Biomagnetism*. Pp. 315-316. Boston, EUA, 2004.
- Gutiérrez, D., Nehorai, A. y Preissl, H. Ellipsoidal head model for fetal magnetoencephalography: forward and inverse solutions. *Physics in Medicine and Biology*, 50: 2141-2157, 2005.
- Gutiérrez, D. y Preissl, H. Analysis of the sympatho-vagal balance in the fetus using MCG and MEG. Trabajo en progreso, 2007.
- Mahäläinen, M., Hari, R., Ilmoniemi, R.J., Knuutila, J. y Lounasmaa, O.V. Magnetoencephalography - theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Reviews of Modern Physics*, 65: 413-497, 1993.
- Malmivuo, J. y Plonsey, R. *Bioelectromagnetism - Principles and Applications of Bioelectric and Biomagnetic Fields*. Oxford University Press. Nueva York, 1995.
- Nenonen, J., Purcell, C.J., Horáček, B.M., Stroink, G. y Katila, T. Magnetocardiographic functional localization using a current dipole in a realistic torso. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 38: 658-664, 1991.
- Preissl, H., Lowery, C.L. y Eswaran, H. Fetal magnetoencephalography: current progress and trends. *Experimental Neurology*, 190: 528-536, 2004.
- Preissl, H., Lowery, C.L. y Eswaran, H. Fetal magnetoencephalography: viewing the developing brain in utero. *International Review of Neurobiology*, 68: 1-23, 2005.
- Robinson, S.E., Burbank, M.B., Fife, A.A., Haid, G., Kubik, P.R., Seachev, I., Taylor, B., Tillotson, M., Vrba, J., Wong, G., Lowery, C.L., Eswaran, H., Wilson, J.D., Murphy, P. y Preissl, H. A biomagnetic instrument for human reproductive assessment. En *Proceedings of the 12th International Conference in Biomagnetism*. Pp. 919-922. Espoo, Finlandia, 2000.
- Vrba, J., Robinson, S.E., McCubbin, J., Murphy, P., Eswaran, H., Wilson, J.D., Preissl, H. y Lowery, C.L. Human fetal brain imaging by magnetoencephalography: verification of fetal brain signals by comparison with fetal brain models. *Neuroimage*, 21: 1009-1020, 2004.
- Waldert, S., Gutiérrez, D., Nehorai, A., McKenzie, D., Lowery, C., Murphy, P., Eswaran, H. y Preissl, H. Real-time access of magnetoencephalographic/cardiographic data: technical realization and application to online fetal heart rate recording. En *Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*. Pp. 5987-5990. Shanghai, China, 2005.

Imagenología y detectores en medicina

LA IMAGENOLÓGIA ES UNA DISCIPLINA DE LA MEDICINA QUE EMPLEA DIFERENTES MODALIDADES DE IMÁGENES DEL CUERPO HUMANO, OBTENIDAS MEDIANTE UN CONJUNTO DE EQUIPOS Y MÉTODOS PARA LLEGAR EN FORMA RÁPIDA Y SEGURA A LA DETECCIÓN DE MUCHAS ENFERMEDADES; ES UNA HERRAMIENTA IMPRESCINDIBLE PARA LA ATENCIÓN ADECUADA Y CALIFICADA DE LOS PACIENTES.

Luis Manuel Montaña Zetina

Es sorprendente el avance que ha tenido la medicina en las últimas décadas. Este avance es notorio al ver cómo ha mejorado la salud en el mundo. No pasan más de un par de generaciones para notar estos logros. Aquellas enfermedades que nuestros padres o abuelos padecían y cuyo medicamento no existía, ahora se han controlado e inclusive erradicado. Es cierto que surgen nuevos males, pero continúa el esfuerzo de médicos e investigadores para enfrentarlos y vencerlos.

Entre los métodos y estrategias que se han adoptado para vencer los males de antaño y atacar los que han surgido últimamente está el de aprovechar los avances científicos y tecnológicos dentro de los centros de salud. De esto y más se hablará en este documento. Para empezar, se tratará el tema de la imagenología, un concepto que de alguna manera es familiar al público en general. Una imagen por radiografía, ultrasonido o resonancia magnética nuclear se ha vuelto parte de la vida cotidiana y ha tomado un papel importante en la cura de muchas enfermedades.

La imagenología comprende la realización de todo tipo de exámenes diagnósticos y terapéuticos, en los cuales se utilizan equipos que reproducen imágenes del organismo. Como se sabe, las primeras imágenes fueron obtenidas a finales del siglo XIX gracias al descubrimiento de los rayos X. Esto dio un aporte insospechado al avance y el desarrollo de las ciencias de la salud originando lo que actualmente se conoce como la especialidad de la imagenología. Esta disciplina de la medicina emplea diferentes modalidades de imágenes del cuerpo humano, obtenidas mediante un conjunto de equipos y métodos como ultrasonido, tomografía axial computarizada, resonancia magnética nuclear, radiología convencional y digital, para llegar en forma rápida y segura a la detección de muchas enfermedades, volviéndose herramientas imprescindibles para la atención adecuada y calificada de los pacientes.

Sin duda, la mayor ventaja que tiene la imagenología es la posibilidad de avanzar en el

LUIS MANUEL MONTAÑA ZETINA Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Desde 1998 es profesor investigador del Departamento de Física del Cinvestav y miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Líneas de investigación: física de partículas elementales y estudios de detectores semiconductores para aplicaciones en mamografía y angiografía digital

en el área de física médica. Participa con el grupo mexicano integrante del proyecto ALICE en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN). En física médica ha participado y organizado congresos en México. Perteneció a la mesa directiva de la División de Física Médica de la Sociedad Mexicana de Física.
lmontano@fis.cinvestav.mx



Imagen del cráneo por resonancia magnética.

La mayor ventaja que tiene la imagenología es la posibilidad de avanzar en el tratamiento de alguna enfermedad humana sin intervenir quirúrgicamente al paciente; esto se le conoce como métodos no invasivos.

El TAC es una exploración de rayos X que produce imágenes detalladas de cortes axiales del cuerpo. En lugar de obtener una imagen como la radiografía convencional, el TAC obtiene múltiples imágenes al rotar alrededor del cuerpo.

tratamiento de alguna enfermedad humana sin intervenir quirúrgicamente al paciente; esto se le conoce como métodos no invasivos. Prácticamente, la imagenología nació en el mismo momento que fueron descubiertos los rayos X, pero antes hay que aclarar qué es radiación y cómo se observa.

Detectores de radiación

La radiación se define como energía en movimiento. Es invisible para nuestros sentidos; es decir, no se puede tocar, oler ni ver, y es por eso que puede ser peligrosa e inclusive letal. En consecuencia, es necesario crear algún método o dispositivo que nos ayude a identificar el paso de la radiación y, para ello, auxiliarse de ciertos instrumentos que, por algún proceso físico, sean sensibles al paso de esta energía en movimiento. Estos instrumentos son los detectores de radiación.

El principio de funcionamiento de un detector de radiación se basa en los diferentes mecanismos físicos de interacción de la radiación con la materia, los cuales consisten principalmente en el desprendimiento de electrones de los átomos que conforman el material del detector. Estos electrones pueden ser recolectados por algún dispositivo, comúnmente llamado ánodo, y constituirán la señal que el detector nos muestra como prueba del paso de la radiación original.

Después de descubrirse la radiación, la siguiente tarea fue saber de qué se constituía. Se distinguieron tres tipos de radiación, que fueron llamadas alfa, beta y gamma. La radiación o partículas alfa son núcleos de helio (dos protones y dos neutrones). Estas partículas transfieren casi toda su energía al chocar con algún material y por ello son frenadas fácilmente. La radiación o partículas beta (electrones negativos o positivos) transfieren menos energía al material que las partículas alfa y, por lo tanto, pueden atravesar mayor volumen; sin embargo, bastan pocos metros de aire para frenar

este tipo de radiación. Finalmente, los rayos gamma son fotones, es decir, partículas de luz que no tienen masa; pueden atravesar mucho más material y su frenado es difícil, por lo que se requieren materiales de alta densidad como el plomo o el concreto.

Al estudiarse los tipos de radiación mencionados se fueron creando instrumentos para su identificación. Antes de los años 50 ya se utilizaban los contadores Geiger, instrumentos que someten al aire que contienen a grandes voltajes (se habla de cientos de voltios) para llevar los iones que se forman en la interacción con la radiación a los diferentes electrodos y así registrar la señal. Otro detector fue la cámara de niebla de Wilson, en la cual se veía a simple vista la trayectoria de la radiación al condensar a su paso el fluido contenido en ella. Posteriormente surgieron otros dispositivos que funcionaban de manera similar; por ejemplo, en los años 60 se desarrolló la cámara de chispas y la cámara de alambres. En la actualidad existe una variedad de detectores como son: contadores proporcionales, centelladores, tubos fotomultiplicadores, detectores de luz Cerenkov y detectores semiconductores.

Rayos X y dosimetría

El 28 de diciembre de 1895, Wilhelm Conrad Roentgen envió a la Sociedad Físico-Matemática de Würzburg, en Alemania, un escrito de diez páginas para su publicación. Imprimió algunas copias y las envió a científicos importantes de aquella época. El escrito iba acompañado de una radiografía de la mano de su mujer.

El descubrimiento de Roentgen tuvo tal impacto que ya a mediados de enero de 1896 los médicos y físicos utilizaban el aparato para tomar radiografías. Ese mismo año se aplicaron los rayos X para diagnosticar y establecer tratamientos a partir de anomalías internas que mostraban las imágenes radiográficas. Podemos decir que en ese tiempo nacieron también las áreas



Hand der Anna Bertha Roentgen von Krefeld in Wiesbaden
 1896. Photographie von Wilhelm Roentgen.
 1896. Photographie von Wilhelm Roentgen.
 1896. Photographie von Wilhelm Roentgen.

Una radiografía revolucionaria: la mano de la esposa de Wilhelm Roentgen, quien descubrió los rayos X.

conocidas como radiodiagnóstico y radioterapia.

Sin embargo, el uso de la radiación traía sus inconvenientes. Pronto se descubrió que el uso de los rayos X provocaba lesiones al cuerpo humano. Por tanto, fue necesario comprenderlos y estudiarlos cualitativa y cuantitativamente, es decir, conocer y cuantificar el depósito de energía de esos rayos en el cuerpo e indicar los daños que provocaban. En resumen, se quiso saber la dosis absorbida de radiación por algún material o por el cuerpo humano y así nació una nueva disciplina, la dosimetría.

El primer método para medir el depósito de energía de los rayos X fue verificar la cantidad de aire ionizado a su paso. Esto fue realizado pocos meses después del descubrimiento de Roentgen, aproximadamente en abril de 1896. Después, Becquerel midió la radiación emitida por el uranio. En el otoño de ese mismo año Perrin descubrió que la cantidad de iones creados en el aire estaba en relación lineal con la intensidad de la radiación incidente y que se podía medir esa carga acumulando los iones en algún electrodo. De esta manera se consideró a la cámara de ionización como un instrumento para medir la dosis que depositan los rayos X. En 1937, el "Roentgen" fue definido como la energía de un haz medido en una cámara de ionización.

Inicialmente, la dosimetría se medía a través del grado de oscurecimiento de películas sensibles a radiación o también a los cambios en las propiedades químicas que tenían ciertas pastillas implantadas en la piel; sin embargo, esto no medía la dosis absorbida

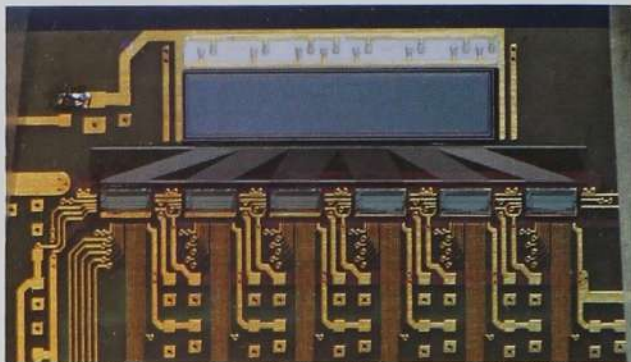


Dr. W. C. Roentgen

Retrato de Wilhelm Roentgen.



Angiograma de la arteria carótida y arterias del cerebro.



Detector de silicio de microbandas utilizado en el Departamento de Física del Cinvestav.

en un paciente. El "rad" fue la primera unidad de medida para la dosis absorbida. Un rad representa la absorción de 100 erg de energía por cada gramo de tejido, por tanto, la dosis mide la energía depositada por unidad de masa. En el Sistema Internacional (SI) se usa la unidad Gray (Gy), que equivale a 100 rad, en honor a Louis Harold Gray (1905-1965), físico británico que trabajó principalmente en los efectos que produce la radiación en sistemas biológicos contribuyendo así al desarrollo del área de la radiobiología.

Los tipos de radiaciones ya mencionados provocan diversos efectos biológicos en los tejidos aunque dejen la misma dosis en ellos. La cantidad total de radiación que puede tolerar el cuerpo humano varía enormemente del tipo de tejido. Los órganos más sensibles son el cristalino del ojo, la espina dorsal, los pulmones y los intestinos. Para cuestiones de protección radiológica se emplea la unidad "Sievert", la cual se calcula con la dosis absorbida en Gy multiplicada por un factor de calidad Q, que vale 1 para la mayoría de las energías de los rayos X, 10 para neutrones y 20 para partículas alfa. Esta unidad mide la dosis equivalente y fue elegida en honor a Sievert, quien en 1925 trabajó intensamente en los controles de los niveles de dosis que se manejaban en las clínicas de su país natal, Suecia. Asimismo, sentó las bases para calcular la dosis absorbida en tumores, desarrolló aparatos para irradiar a los pacientes en programas de tratamiento, así como aparatos para medir dosis.

Detallando más los diferentes tipos de radiación, es importante distinguir entre radiación ionizante y no ionizante. Como se mencionó antes, la dosis mide la energía que absorbe un material cuando pasa a través de algún tipo de radiación. Sin embargo, para que el material absorba esa energía, la radiación debe ionizar el material, es decir, quitar electrones de los átomos del material. A los átomos eléctricamente no neutros se les llama iones. La radiación no ionizante se refiere a aquella parte del

espectro electromagnético donde la energía de los fotones no es capaz de romper enlaces químicos; incluye los rayos ultravioleta, luz visible, luz infrarroja, radiofrecuencia y microondas. Por su parte, la radiación ionizante incluye rayos energéticos más allá del ultravioleta.

Es inevitable estar expuestos a radiación ionizante. Día con día, y a lo largo de la historia del planeta, todos estamos expuestos a los rayos cósmicos que caen a la Tierra y a la radiactividad presente en las rocas y la tierra. Se sabe que la exposición a radiación ionizante es causa del origen del cáncer. Por ejemplo, en los sobrevivientes de las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki, que estuvieron expuestos a rayos gamma, se observó un incremento de padecimientos como leucemia, cáncer de mama y tiroides, entre otros. Sin embargo, la radiación ionizante se utiliza en la medicina para fines de diagnóstico (radiografía) y tratamiento (radioterapia).

En la aplicación de la radiación en medicina podemos aclarar algunos términos, tales como medicina nuclear, física de la salud y la diferencia entre ambas. La medicina nuclear es una de las aplicaciones de la medicina de radiación que es usada para diagnosticar y tratar alguna enfermedad. A los pacientes se les suministra radiactividad a través de materiales llamados radionúclidos. Este material viaja por el torrente sanguíneo hasta implantarse en aquellos órganos que están bajo estudio y, al detectar fuera del cuerpo la radiación emitida por los radionúclidos, esto permite conformar una imagen. Así se pueden verificar varios aspectos: si la función de estos órganos es normal o no, si hay presencia de algún tumor, entre otros.

Por su parte, la física de la salud es conocida también como seguridad radiológica. Los que llevan a cabo esta actividad se dedican a entender, evaluar y controlar los riesgos y los beneficios del uso de la radiación. La recomendación actual de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) es limitar

La cantidad total de radiación que puede tolerar el cuerpo humano varía enormemente del tipo de tejido. Los órganos más sensibles son el cristalino del ojo, la espina dorsal, los pulmones y los intestinos.

la dosis anual en el público general a 1mSv; para quienes trabajan con radiación, la dosis se limita a 100mSv en 5 años.

Generando imágenes

Desde la primera radiografía lograda por Roentgen, se han hecho esfuerzos para obtener imágenes que muestren partes del interior del cuerpo humano con una mejor calidad y resolución. Para lograr una buena imagen en los términos antes mencionados, se deben tomar en cuenta cuatro tipos de resolución: espacial, contraste, temporal y estadística. La resolución espacial está relacionada con la geometría del proceso de formación de la imagen y, dependiendo de la técnica, de la pantalla intensificadora. El contraste depende del tejido y la forma en que atenúa los rayos X; asimismo, de la energía de estos rayos y de su dispersión por el tejido. La resolución temporal depende de cuán borrosa es la imagen causada por el movimiento voluntario e involuntario del paciente. Finalmente, la resolución estadística se relaciona con el número de rayos absorbidos por la pantalla; entre más rayos se absorban, menos ruido estadístico habrá.

Las técnicas para obtener imágenes del cuerpo humano, como el TAC, PET, SPECT, ultrasonido y resonancia magnética nuclear (RMN), son cada vez más conocidos por el público en general. A continuación describiremos estas técnicas.

El TAC es una exploración de rayos X que produce imágenes detalladas de cortes axiales del cuerpo. En lugar de obtener una imagen como la radiografía convencional, el TAC obtiene múltiples imágenes al rotar alrededor del cuerpo. Una computadora combina todas estas imágenes en una imagen final, que representa un corte del cuerpo como si fuera una rodaja. Esta máquina crea múltiples imágenes en rodajas (cortes) de la parte del cuerpo que está siendo estudiada.

La tomografía por emisión de positrones, TEP (*Positron Emission Tomography*, PET por las siglas en inglés), es una técnica no invasiva de diagnóstico por imagen, capaz de medir la actividad metabólica de los diferentes tejidos del cuerpo humano, especialmente del sistema nervioso central. Al igual que el resto de técnicas diagnósticas en medicina nuclear, la TEP se basa en detectar y analizar la distribución que adopta en el interior del cuerpo un radioisótopo administrado a través de una inyección. Lo que hace es medir la producción de fotones gamma (resultado de la interacción de un positrón con algún electrón del tejido).

SPECT es una técnica para obtener imágenes bidimensionales de un cuerpo tridimensional a través de un dispositivo llamado cámara gamma. Las imágenes son, en realidad, proyecciones de ángulos múltiples del cuerpo en cuestión. Posteriormente se utiliza una computadora para aplicar un algoritmo de reconstrucción tomográfica de estas proyecciones múltiples obteniendo así la imagen tridimensional.

El ultrasonido (también conocido como ecografía) emplea los ecos de una emisión de ultrasonidos dirigida sobre un cuerpo u objeto como fuente de datos para formar una imagen de los órganos o masas internas. Un pequeño instrumento llamado transductor emite ondas de ultrasonidos. Estas ondas sonoras de alta frecuencia se transmiten hacia el área del cuerpo bajo estudio y se recibe su eco. El transductor recoge el eco de las ondas sonoras y una computadora lo convierte en imagen. En la ecografía no se emplea radiación.

La resonancia magnética nuclear se basa en las propiedades magnéticas que poseen los núcleos atómicos (generalmente el hidrógeno) para crear imágenes. Esta técnica alinea los campos magnéticos de los átomos en la dirección de un campo magnético externo. Al regresar dichos átomos a su estado original, emiten una señal (podría decirse que resuenan) que registra una computadora para producir la imagen.

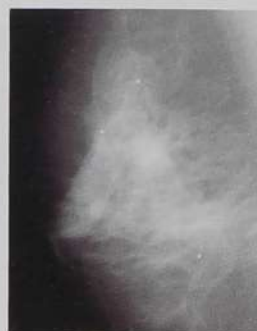
Cáncer

El cáncer es una enfermedad en la cual se altera la división normal de las células. Hay una sobreproducción incontrolada de células, que normalmente trae como consecuencia la formación de tumores. Una causa de que surja esta producción incontrolada de células es cuando se modifica la estructura atómica de los elementos que constituyen el interior de la célula. Por ejemplo, la ionización es un proceso que ocurre al azar, por lo que cualquier molécula puede resultar modificada al irradiarse la célula. Si la molécula ionizada es parte de la membrana celular, es posible que se produzca una rotura que cause la muerte de la célula. En general, esta célula será reemplazada por otra. Si la molécula dañada es el ADN del núcleo celular, parte de la información almacenada en los genes se pierde o se modifica provocando mutaciones. Este daño se manifestará cuando la célula comience a reproducirse. Por un lado, la célula podría no reproducirse y así no dejar descendencia, pero también es posible que la célula empiece a reproducirse descontroladamente dando origen a algún tipo de cáncer.

Para muchos cánceres curables la terapia inicial es lo más importante. Cualquier reducción de dosis, retraso o cambio en el medicamento puede ser crítico para el éxito en el tratamiento. Entre los diferentes métodos de tratamiento que existen para el cáncer está la quimioterapia. Hay más de 200 tipos diferentes de cáncer y cada uno responde de manera variable a este tipo de tratamiento, que empezó a aplicarse desde el año 1943.

Cáncer de mama

En esta sección se hablará del cáncer de mama debido a que en el Cinvestav se están haciendo esfuerzos para contribuir en la lucha contra este mal aprovechando la



Mamografías convencionales.

experiencia de varios investigadores de diferentes departamentos del centro. Se han establecido convenios con hospitales, se han presentado proyectos internos, nacionales e internacionales para llevar a cabo investigaciones y aplicaciones que contribuyan a disminuir la tasa de muerte por este tipo de cáncer, que llega a ser la segunda causa de muerte por cáncer en el mundo.

Para explicar el origen del cáncer de mama existe la llamada hipótesis de exceso de estrógenos. Los estrógenos incrementan la proliferación de células en las mamas. En experimentos con animales, al administrarles más estrógenos se incrementa el rango de desarrollo de tumores. Por otro lado, las mutaciones heredadas del gene BRCA1 contribuyen a una pequeña proporción de todos los cánceres de mama, pero los miembros de las familias afectadas tienen 70% de posibilidad de desarrollar cáncer de mama o en los ovarios.

Se han hecho muchos estudios para conocer y controlar el desarrollo del cáncer de mama. Así, se ha encontrado que a mayor masa corporal, mayor es el riesgo de padecer cáncer de mama en mujeres posmenopáusicas. Dicho riesgo se reduce un poco en mujeres antes de la menopausia; una posible explicación es que ovulan menos, como si estuvieran en las etapas de embarazo y lactancia. Después de la menopausia, la obesidad podría estar relacionada con mayor producción periférica (a diferencia de gonadal y adrenal) de estrógenos. Otra causa del desarrollo de este cáncer está relacionada con los metabolismos hormonales, factores reproductivos y el estado de menopausia, de ovarios y del endometrio. También está el factor del uso combinado de anticonceptivos, que podría incrementar ligeramente el riesgo de padecer cáncer pero, al parecer, disminuye el riesgo de cáncer de ovarios y del endometrio.

El ultrasonido (también conocido como ecografía) emplea los ecos de una emisión de ultrasonidos dirigida a un cuerpo u objeto como fuente de datos, para formar una imagen de los órganos o masas internas.

Desde hace tiempo, el Departamento de Física del Cinvestav ha aceptado estudiantes que tienen interés en hacer investigación en física médica (ver la siguiente sección), particularmente en el desarrollo de sistemas de detección digital para mamografía. Esta investigación pretende dar una contribución en México al mejoramiento de detección temprana de cáncer de mama desarrollando un sistema de mamografía digital. Contamos, entre otros, con la participación de físicos, oncólogos, radiólogos, estudiantes y técnicos para llevar a cabo esta tarea.

Física médica

Por todo lo aquí expuesto, el lector podrá apreciar cómo diferentes áreas de la física han ayudado al área clínica para el diagnóstico, tratamiento y cura de enfermedades; la física médica es la aplicación de conceptos y métodos de esta disciplina para el diagnóstico y el tratamiento de las enfermedades humanas. Desde hace tiempo, el término *física médica* forma parte del lenguaje en la comunidad académica, científica e inclusive en el público en general. Los estudiantes se sienten atraídos por el área por dos razones principales: les gusta cómo la física se aplica en la vida real y cómo beneficia directamente y en gran medida a las personas.

El papel de los físicos médicos en el campo de la salud pública es muy importante. Tienen la capacidad de trabajar en tres sectores: académico, industrial y salud (hospitales). En lo que se refiere al sector académico, un instituto que tenga un departamento de física médica típicamente incluye físicos, ingenieros, expertos en computación, científicos y matemáticos, quienes podrían llamarse físicos médicos o bioingenieros. Podríamos decir que ese departamento une esfuerzos de científicos de diferentes áreas para mejorar las técnicas existentes,

así como para encontrar y crear otras técnicas que ayuden a prevenir enfermedades y salvar vidas. Sin esos institutos e investigadores, el desarrollo y la aplicación de técnicas como la tomografía computarizada, la resonancia magnética nuclear para el diagnóstico o el uso de haces de partículas para el tratamiento de tumores no habrían sido posibles.

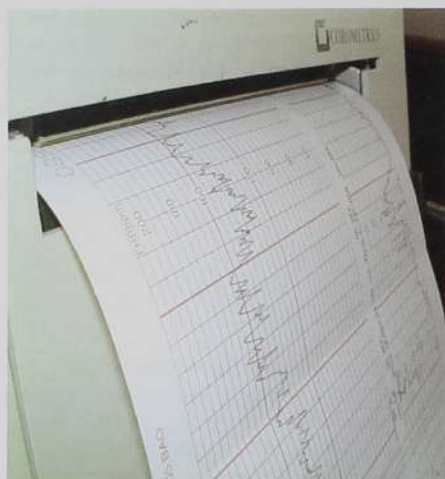
Por otro lado, las razones para que haya un físico médico en un hospital pueden resumirse en lo siguiente: tiene una formación adecuada desde el punto de vista científico y técnico del área; hace uso eficiente de los recursos ayudando a bajar costos; incorpora técnicas y equipos cada vez más complejos en hospitales y clínicas. Algunas de sus funciones son las siguientes:

- Aplicar conocimientos de dosimetría.
- Planificar el tratamiento del paciente y formas complementarias.
- Controlar periódicamente los equipos de terapia y localización.
- Controlar el mantenimiento de unidades de diagnóstico y/o tratamiento.
- Organizar la protección radiológica en la clínica.
- Organizar los métodos de diagnóstico y programas de control de calidad.
- Utilizar las técnicas de medición de radiaciones ionizantes.
- Utilizar los sistemas de computación.
- Asesorar en la adquisición de equipos.
- Dar pruebas de aceptación de equipos adquiridos.
- Formar personal.

En resumen, la intención de este documento fue proporcionar al lector una visión de la contribución de las técnicas y los dispositivos de obtención de imágenes, así como dar cuenta de la intervención cada día más evidente e indispensable de la física para auxiliar a la medicina en pro de la salud humana. ●

[Bibliografía]

- Gibson, A.P., Cook, E. y Newing, A. Teaching Medical Physics. *Physics Education*, 41(4): 301-306, 2006.
- Hendee, W. X rays in medicine. *Physics Today*, Noviembre, pp. 51-56, 1995.
- Knoll G. *Radiation detection and measurements*. Ed. John Wiley and Sons.
- <http://www.fis.cinvestav.mx/~gae/fismed2.html>.
- World Health Organization (WHO from OMS). International Agency for Research on Cancer. *World Cancer Report*. Ed. Bernard W. Stewart y Paul Kleihues. IARC Press. Lyon, 2003.



La variación del ritmo cardiaco

UNA DE LAS TÉCNICAS MÁS COMUNES PARA ESTUDIAR EL FUNCIONAMIENTO CARDIACO ES EL ELECTROCARDIOGRAMA (ECG), EL CUAL MIDE LAS CORRIENTES ELÉCTRICAS GENERADAS POR EL CORAZÓN AL LATIR.

Jesús Guillermo Contreras

De acuerdo con información del INEGI,¹ los problemas cardiacos son una de las principales causas de muerte en nuestro país, especialmente en varones a partir de los cincuenta años de edad. Este fenómeno no es particular de México, sino que se repite en muchas otras partes del mundo y repercute en la gran importancia que la sociedad le otorga a los estudios del corazón.

El corazón es un órgano sumamente interesante, no sólo desde el punto de vista médico, sino también como parte de un sistema extremadamente complejo, cuyos componentes interactúan entre sí y que, además, están expuestos a influencias externas que cambian continuamente conforme pasa el tiempo. Por lo tanto,

el corazón tiene que modular su funcionamiento en respuesta tanto a las condiciones del medio ambiente como a las necesidades específicas de otros órganos. Así, el ritmo cardiaco, aun cuando nos encontramos en reposo, se está ajustando en forma continua para satisfacer nuestras necesidades; a pesar de que en apariencia los latidos se suceden con regularidad, en realidad, el ritmo cardiaco de un corazón sano está caracterizado por ser variable.

El estudio de estas variaciones se ha desarrollado mucho en los últimos años, especialmente aplicado a mediciones realizadas de manera continua a lo largo de periodos que van desde un par de horas hasta un día. La

JESÚS GUILLERMO CONTRERAS. Se doctoró en la Universidad de Dortmund (Alemania). Actualmente es investigador del Departamento de Física Aplicada del Cinvestav, Unidad Mérida. Su especialidad es la física experimental de altas energías. Entre sus intereses principales figura la

aplicación de técnicas e ideas de la física a problemas de biología y medicina. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores, nivel II. Recibió el Premio de Investigación de la AMC en el 2005. jgcnmda@cinvestav.mx

motivación principal ha sido entender el comportamiento de estas variaciones, tanto en sujetos con corazones sanos como en sujetos enfermos, utilizando ideas y técnicas de la física estadística. A pesar de que esta área es relativamente joven, ya cuenta con una comunidad grande, activa, y que ha obtenido resultados muy interesantes. Es un área multidisciplinaria en la cual participan lo mismo médicos que físicos, matemáticos y expertos en cómputo, entre otros.

Atraídos por la belleza de las técnicas matemáticas utilizadas en esta área, por la disponibilidad en línea y de forma gratuita de amplias bases de datos,² y el interés en aplicar técnicas de física a estudios de importancia en medicina, hemos realizado algunas incursiones en este campo de estudio. A continuación se presenta una breve reseña del área, así como algunos resultados que hemos obtenido. Al final, algunas reflexiones de mis experiencias al adentrarme en el mundo de la física médica.

Series de tiempo R-R

Una de las técnicas más comunes para estudiar el funcionamiento cardíaco es el electrocardiograma (ECG), el cual mide las corrientes eléctricas generadas por el corazón al latir. El ECG consta de varias ondas que se repiten latido a latido, como se muestra en la figura 1. La más prominente, un pico delgado y alto, se llama onda R. La serie de tiempo construida por intervalos sucesivos de ondas R se le llama serie R-R.

En las series de tiempo se observa que, a pesar de que los latidos se mantienen en un margen relativamente estrecho de tiempos, la serie es altamente irregular. Uno de los principales objetivos de los estudios que a continuación se describen es extraer de estas series, aparentemente sin estructura, comportamientos estadísticos que revelan correlaciones de largo tiempo en el funcionamiento del corazón y utilizarlos para distinguir de manera no invasora la presencia de enfermedades.

Ruido 1/f, DFA y CVAA

Uno de los primeros resultados importantes en el estudio de series de tiempo RR de larga duración es el reportado por Kobayashi y Mushi en 1982.³ Ellos estudiaron el espectro de potencias de una serie R-R, el cual se obtiene al aplicar una transformada rápida de Fourier (FFT) a la serie original y graficando los módulos de los coeficientes de la FFT en función de la frecuencia. Lo que se encuentra es una ley de potencias con exponente compatible con uno. A este comportamiento se le llama ruido 1/f y se le considera una señal clara de que existen correlaciones de largo alcance en la señal.

El origen de esta ley de potencias en el espectro de latidos cardíacos es todavía desconocido, pero una gran variedad de fenómenos en áreas tan diferentes como física, biología, economía, geografía o lingüística

presentan un comportamiento similar, lo que despertó el interés por el estudio de series R-R de larga duración.

El análisis espectral no es una técnica idónea para el estudio de señales no estacionarias, como es el caso de los sistemas biológicos. Además, debido a que las series de tiempo son finitas, presentan problemas técnicos para separar las componentes provenientes de ruido de las señales biológicas relevantes.

Una técnica que resuelve algunos de los problemas relacionados con los métodos espectrales es la de eliminación de tendencias lineales o DFA (*detrended fluctuation analysis*) propuesta por Peng *et al.*⁴ Esta técnica consiste en separar la señal original en intervalos de tamaño n . Para cada intervalo se elimina la tendencia lineal y se calcula la fluctuación media $F(n)$. Lo que se espera es que $F(n) \sim n^\alpha$. El valor del exponente α da información de las correlaciones presentes en la señal original.

Al utilizar DFA se encontró que pacientes sanos jóvenes producían un exponente de valor 1 correspondiente al comportamiento de fractalidad, mientras que los pacientes con disfunción cardíaca presentan un exponente de valor 0.5 correspondiente a ruido blanco.

Otra técnica que se propuso por esas fechas por Ivanov *et al.*⁵ es el llamado análisis de amplitudes mediante variación acumulada (CVAA). Éste aplica una transformada Wavelet a la serie de tiempos original, seguida por una transformada de Hilbert, y con estos últimos coeficientes calcula las amplitudes de cada componente. Finalmente, estudia la distribución estadística de estas amplitudes encontrando que todos los casos que se estudiaron de pacientes sanos colapsan en la misma distribución, una función gamma, mientras que los pacientes enfermos de apnea de sueño no lo hacen.

Además de estas técnicas existen muchas otras, y se siguen proponiendo nuevas, que permiten analizar en forma estadística el comportamiento de series temporales de larga duración. El hecho de que estos tipos de análisis pudieran separar pacientes sanos de enfermos en forma no invasora tuvo gran repercusión. Estudios posteriores han encontrado que los resultados no son tan generales como se creía en un principio, pero se sigue confiando que este tipo de análisis puede ser eventualmente de utilidad en el mundo clínico.

El corazón de un ostión

Los estudios descritos en la sección anterior, y muchos otros no mencionados por falta de espacio, demuestran que el latido del corazón se comporta de manera compleja y presenta correlaciones compatibles con comportamientos fractales o con sistemas cercanos a un punto crítico. Es entonces de gran interés descubrir el mecanismo que produce un comportamiento tan complejo e interesante.

En los humanos, el sistema que regula el funcionamiento del corazón es el sistema nervioso

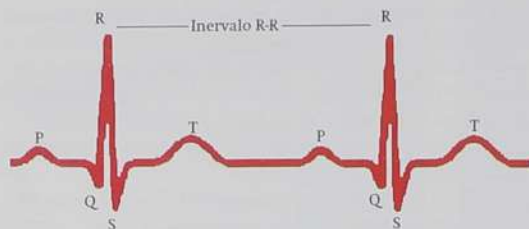


Figura 1. Diagrama de un ECG normal. Se distinguen varias estructuras; la más prominente es la así llamada onda R. La distancia temporal entre dos ondas R consecutivas forma el intervalo R-R.

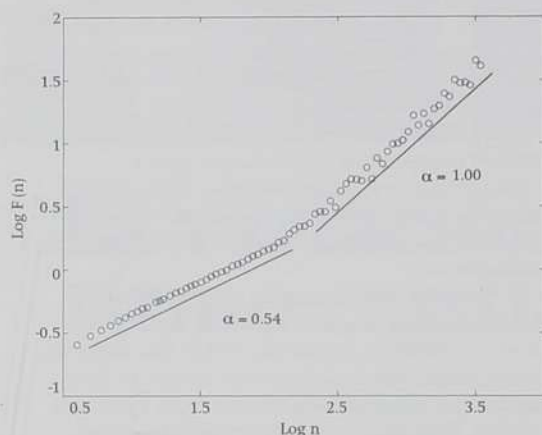


Figura 3. Resultados de aplicar la técnica de DFA a series temporales de larga duración de un ostión. La gráfica muestra dos comportamientos de series de potencia. A valores bajos de n se obtiene una pendiente compatible con ruido blanco, mientras que para valores grandes de n se tiene una pendiente igual a la reportada en el análisis de series de tiempo de corazones pertenecientes a jóvenes sanos.

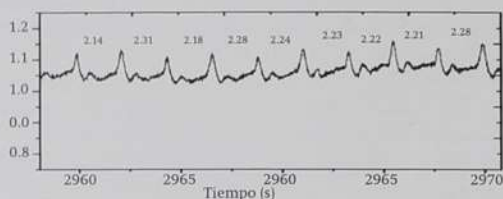


Figura 2. Fragmento de un cardiograma de un ostión obtenido con la técnica de reflexión láser. Los números entre cada pico del espectro corresponden a los intervalos R-R.

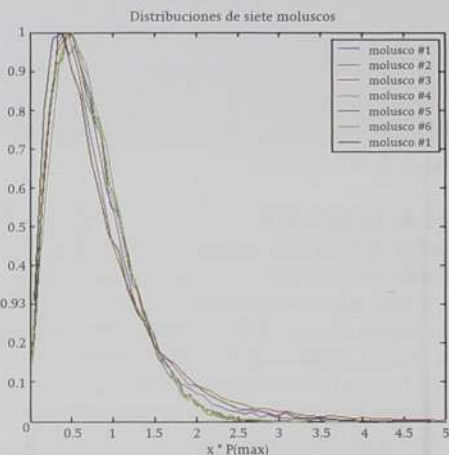


Figura 4. Distribuciones de amplitudes obtenidas con el método CVAA aplicado a diferentes moluscos. Claramente, todos ellos presentan un comportamiento muy similar y la distribución de amplitudes está descrita por una distribución gamma.

autónomo, a través de la acción de sus sistemas simpático y parasimpático. A fin de explorar la necesidad de un sistema tan complicado para la generación de la variación del ritmo cardiaco descubierta, decidimos estudiar un sistema con un corazón mucho más simple.

Elegimos el molusco *Crassostrea virginica*.⁶ El corazón de este animal sólo tiene tres cámaras en lugar de las cuatro del humano; su sistema circulatorio es abierto y no cerrado como en los mamíferos. Además, está expuesto directamente a variaciones del medio ambiente, como la temperatura o la salinidad, y no protegido de influencias externas directas, como el nuestro. Finalmente, este molusco carece de sistemas simpáticos y parasimpáticos. En resumen, es un sistema completamente diferente al de los humanos.

Pues bien, no es tan diferente. Desarrollamos una técnica para medir *in vivo* y *in situ* el latido cardiaco de este molusco⁷ y encontramos que se pueden identificar claramente estructuras equivalentes a la onda R del ECG, lo que nos permitió definir series de tiempo R-R, como se muestra en la figura 2.

Utilizando estas series de tiempo repetimos⁸ los análisis DFA y CVAA, mencionados anteriormente, encontramos un comportamiento exactamente equivalente al de humanos sanos. Los resultados para el caso del molusco se muestran en las figuras 3 y 4. Estos estudios⁹ sugieren que existe un mecanismo general, implementado por los sistemas simpático y parasimpático en el caso del latido del corazón humano sano, que genera comportamientos extremadamente complejos e interesantes.

Modelos del ritmo cardiaco

Los estudios descritos anteriormente proponen medidas para evaluar el comportamiento cardiaco, pero no explican el origen de estas medidas. Además, debido a los promedios matemáticos que se realizan al aplicar estos métodos, es difícil explicar qué comportamiento específico de la señal original es responsable del comportamiento observado y, por lo tanto, su relación con la fisiología del corazón es bastante tenue. Una opción para relacionar el comportamiento de series R-R

En los humanos, el sistema que regula el funcionamiento del corazón es el sistema nervioso autónomo, a través de la acción de sus sistemas simpático y parasimpático.

con el funcionamiento del corazón es buscar observables más simples. Otra opción es proponer modelos del latido cardíaco que sean relativamente simples, pero que generen el comportamiento complejo observado en las series R-R reales.

Recientemente hemos intentado seguir estas dos vías.¹⁰ Hemos obtenido resultados parciales en ambos frentes. Por un lado, encontramos un comportamiento interesante de los coeficientes Wavelets directamente; i.e. sin usar la transformada de Hilbert como se hace en CVAA, y, por otro lado, desarrollamos un modelo estocástico que reproduce algunos de los comportamientos reportados en la literatura. La base del modelo es que en lugar de considerar que las diferentes influencias externas modifican el intervalo R-R, proponemos que estas influencias modifican la probabilidad de que el corazón lata en determinado momento. Actualmente nos encontramos en una revisión de este modelo, para ver si se puede extender de tal manera que reproduzca otras medidas de la variabilidad cardíaca, que hasta la fecha no reproduce satisfactoriamente.

Reflexiones

Mi área principal de estudio no es la física médica. Los trabajos que he mencionado, y otros que no han sido incluidos aquí, han sido realizados en paralelo a mis otras actividades. La primera reflexión es que me tomó alrededor de tres o cuatro años, trabajando parcial e irregularmente, para realmente adentrarme en el tema. Estudiar a fondo un fenómeno nuevo es muy gratificante, pero requiere una inversión sustancial en tiempo para poder publicar artículos serios de investigación.

No sólo requiere tiempo, también estudiantes interesados y comprometidos. Esto me lleva a la segunda reflexión. La mayoría de los trabajos los he realizado con estudiantes de Ingeniería Física (en la zona sureste de nuestro país no existe ninguna licenciatura en Física), quienes han realizado sus prácticas profesionales y

posteriormente su tesis de ingeniería conmigo. Sin embargo, excepto uno, los demás han continuado sus estudios de postgrado en diversas áreas de la Ingeniería. Desde el momento de iniciar su trabajo conmigo era claro para ellos que su maestría la harían en otro lugar. Los estudiantes que llegan a nuestro departamento son pocos y vienen ya también con una idea más o menos clara de lo que quieren estudiar, por lo que es difícil involucrarlos en un trabajo de un grupo que apenas está empezando. Así, una dificultad es adentrarse en el tema; otra es generar un grupo de trabajo atractivo para estudiantes.

La tercera dificultad es pasar a trabajos en colaboración con un doctor en medicina. Normalmente, los médicos están más interesados en investigaciones con aplicaciones clínicas directas que en investigaciones básicas con una aplicación clínica incierta. Realizar una investigación conjunta requiere de mucho tiempo por ambas partes, lo cual, al menos en mi caso, ha sido difícil de conseguir, pero que empieza a ser posible conforme se va consolidando un grupo con experiencia y continuidad.

En resumen, para mí ha sido muy interesante y divertido adentrarme en otra área. Ha sido también muy importante conservar mi visión externa al área; i.e., ver el problema desde el punto de vista de la física. El tiempo que le he invertido a este proyecto a lo largo de los años empieza a producir algunos frutos interesantes y mientras más avanzo, más fácil es dar el siguiente paso. Desde este punto de vista, puedo recomendar "descansar haciendo adobes", como decía mi abuela; cuando nuestro trabajo principal se complica y necesitamos un respiro, tener un área de estudio alterna, como la física médica, puede ser muy saludable.

Agradecimientos

Los resultados presentados aquí han sido obtenidos en colaboración con los Drs. J. J. Alvarado-Gil y P. Ritto, y el Ing. D. Escamilla. A todos ellos agradezco las muchas horas de diversión trabajando estos temas. ●

[Referencias]

- 1 www.inegi.gob.mx, ver tablas de mortalidad en la sección de dinámica de la población.
- 2 www.physionet.org
- 3 Kobayashi, M. y Musha, T. 1/f fluctuation of the beat period. *IEEE transaction of Biomedical Engineering*, 29:455-457, 1982.
- 4 Peng, C.K., Havlin, S., Stanley, H.E. y Goldberger, A.L. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat series. *Chaos*, 5: 82, 1995.
- 5 Ivanov, P.Ch. et al. Scaling behaviour of heartbeats intervals obtained by wavelet based time-series analysis. *Nature*, 383:323-327, 1996.
- 6 Kennedy, V.S., Newell, I.E., Eble, Aert, F. (eds). *The eastern oyster Cassostrea virginica*. Maryland Sea College, University of Maryland, 1996.
- 7 Ritto, P.A., Contreras, J.G., Alvarado Gil, J.J. Monitoring of heartbeat by laser beam reflection. *Meas. Sci. Technol.*, 14: 317-322, 2003.
- 8 Ritto, P.A., Contreras, J.G., Alvarado Gil, J.J. Scaling and wavelet based analysis of the longterm heart rate variability of the Eastern oyster. *Physica A*, 349: 291-301, 2005.
- 9 Ritto, P.A. Desarrollo de una técnica de reflexión láser para monitorear el latido cardíaco. Tesis de doctorado en Ciencias, Departamento de Física Aplicada, Cinvestav. Mérida, 2003. Dirigida por J. J. Alvarado-Gil y J. G. Contreras.
- 10 Escamilla, D.J. Modelo estocástico de la variabilidad del ritmo cardíaco. Tesis de Ingeniero Físico, Facultad de Ingeniería, UADY, Mérida, 2005. Dirigida por J. G. Contreras.

Radiología: un siglo de desarrollo

EL DESCUBRIMIENTO HACE MÁS DE UN SIGLO DE LOS RAYOS X FINCÓ UNA FRUCTÍFERA RELACIÓN ENTRE LA INVESTIGACIÓN DE FRONTERA EN LA FÍSICA Y LA APLICACIÓN DE ESE CONOCIMIENTO EN MEDICINA.

Rosa Elena Sanmiguel

La medicina hace uso de los métodos más modernos para obtener imágenes que le permiten entender lo que sucede al interior del cuerpo humano; desde una fractura de huesos hasta la observación de microbios y células; las imágenes que se logran obtener son un claro ejemplo de la conjunción de los avances en ciencia básica y tecnología en favor de la ciencia médica. A partir del descubrimiento hace más de un siglo de los rayos X, se fincó una fructífera relación entre la investigación de frontera en la física y la aplicación de ese conocimiento en medicina.

Con el objetivo de apreciar el estado del arte de la radiología y lo que motiva las actuales líneas de investigación, particularmente en aplicaciones de rayos X, aquí se plantea un recuento cronológico de las diversas líneas de pensamiento y trabajo efectuado en el área (tabla 1). El caso particular de los rayos X, que desde su descubrimiento fueron asociados con aplicaciones médicas, permite ejemplificar de modo

muy claro cómo la visión multidisciplinaria ha permitido su desarrollo y evolución (Haus, 2002; Gray, 2000; Gold, 1990; Rothenberg, 1995).

El descubrimiento de Roentgen

En la segunda mitad del siglo XIX existía un gran interés por estudiar la electricidad. M. Faraday llegó a descubrir el fenómeno de electrólisis y establecer las leyes que gobiernan su comportamiento; de su trabajo se dedujo la existencia de una unidad fundamental de electricidad. Utilizando tubos rellenos de gases enrarecidos y calentando el cátodo, J. Plucker y J. Hittorf lograron establecer que a partir del cátodo se emitía un tipo de radiación eléctrica –los rayos catódicos– que producía sombras de objetos sólidos colocados en su trayectoria, y que esta radiación era desviada en presencia de un campo magnético. En 1879, W. Crookes utilizó tubos con vacío en lugar de gases raros y, basado en la observación de la existencia de una presión debida

ROSA ELENA SANMIGUEL. Doctora en Ciencias por el Departamento de Física del Cinvestav. Realizó su trabajo de tesis como becaria del DAAD en el Departamento de Física de la Universidad de Siegen (Alemania). Actualmente lleva a cabo su estancia posdoctoral en el Cinvestav y tiene a su cargo el

Laboratorio de Imágenes de Rayos X (Unidad Monterrey) donde se dedica a la investigación de técnicas radiológicas.
sanmiguel@cinvestav.mx

Figura 1. Tubo de Crookes con flores activado.



Todas las imágenes de este artículo son cortesía de H. Dijkstra.

Tabla I: Recuento de los grandes avances que han impulsado a la radiología.

Avances en radiología de diagnóstico [Gray 2000]

Año	Avances científicos y tecnológicos
1895	Descubrimiento de los rayos X (W.C. Röntgen)
1896	Calcium Tungstate screens (T.A. Edison)
1896	Descubrimiento de la radiactividad (H. Becquerel)
1913	Tubo de rayos X de cátodo caliente (W.D. Coolidge)
1915	Rejilla de Bucke-Potter
1917	Desarrollo de la transformada de Radon (J. Radon)
1925	Película de emulsión doble sobre base flexible
1928	Procesador de películas mecanizado
1934	Tomografía convencional (A. Vallebona, G.Z. DesPlantes)
1948	Intensificador de imagen de Westinghouse (J.W. Coltman)
1951	Scanner rectilíneo (B. Cassen)
1951	Ultrasonido biestable (G. Ludwig, J. Wild, D. Howry)
1956	Procesador de películas X-Omat de Kodak
1958	Cámara de centello (H. Anger)
1960	Xeroradiografía
1962	Tomografía por reconstrucción de emisión (D. Kuhl)
1962	Ultrasonido en escala de grises (G. Kosoff)
1965	Sistema especializado de mamografía
1972	Tomografía computarizada (G.N. Hounsfield)
1973	Angiografía por sustracción digital (C. Mistretta)
1975	Tomografía por emisión de positrones (M. Ter-Pogossian)
1976	Single Photon Emission Computed Tomography SPECT (J. Keyes)
1980	MRI (P.C. Lauterbur)

a esta radiación y el calentamiento de cuerpos sólidos interpuestos en su trayectoria, pudo reconocer que estos rayos catódicos estaban compuestos, muy probablemente, por partículas. Fue J. J. Thomson quien, al utilizar este mismo tipo de tubos, logró descubrir el electrón veinte años después.

La utilización de tubos rellenos de gases enrarecidos que producían cierta luminiscencia como respuesta a la aplicación de diferencias de voltaje llevó a H. Geissler a la producción de los tubos que llevan su nombre. Algunos de estos artefactos fueron hermosas piezas de arte utilizadas para decoración; algunos otros inspiraron su utilización como "remedios" para diversos padecimientos.

En el afán de estudiar la naturaleza de la corriente eléctrica y encontrar su unidad elemental, un buen número de laboratorios en Estados Unidos y Europa trabajaba en la investigación de los rayos catódicos. En diciembre de 1895, W. C. Roentgen, que enfocaba su trabajo en esta dirección, descubrió una radiación desconocida, producto de la operación de tales tubos de rayos catódicos; la llamó *radiación X*. Las condiciones eran propicias y para mediados de enero de 1896 se reportaba la reproducción de los resultados de Roentgen en diversos laboratorios. A partir de la primavera de ese año se podían encontrar anuncios de tubos de rayos X en venta. También en 1896 comienza su aplicación en diagnóstico médico; en Londres se publica lo que posteriormente se conocerá como *Archives of Roentgen Ray*, la primera revista especializada en rayos X.

Ese mismo año H. Becquerel descubrió la radiactividad, y con ello se inició una historia de avance y desarrollo científico y tecnológico, que tiene un importante componente de retroalimentación entre el estudio de los rayos X y el de la radiactividad. Estas líneas de trabajo comparten mucho del interés científico y de las necesidades tecnológicas en el laboratorio.

Entendiendo los rayos X

El interés por entender esa misteriosa radiación siguió impulsando aún más la investigación de tales fenómenos. En un acelerado avance se descubrieron las líneas de radiación característica, específicamente las de

Los años alrededor del descubrimiento de los rayos X se caracterizaron por el replanteamiento de muchas cuestiones en física y el estudio de la naturaleza de los rayos X jugó un papel importante en ello. Mientras tanto, los rayos X eran ampliamente utilizados por algunos médicos para diagnóstico e incluso terapia.

emisión K y L, que son picos de máxima intensidad de los rayos X y que se presentan a energías específicas para los diversos materiales. Los rayos X son producidos por los mecanismos de frenado de los electrones incidentes –que genera el espectro continuo o de *bremmstrahlung*– así como por la desexcitación de los electrones atómicos. Esta contribución se relaciona con las líneas características, pues al descender del estado excitado, el electrón atómico está forzado a eliminar su energía de excitación, que es igual a la diferencia de energía existente entre los dos niveles energéticos en los que se encuentra, siendo esta diferencia una propiedad característica, una huella digital, de los materiales.

También se estudió, desde esa temprana época, la absorción mostrada por diversos materiales. Ya Roentgen había hecho la observación de que los rayos X son apantallados de manera diferente por papel, madera, metal, vidrio plomado, etcétera. El estudio metódico permitió determinar la absorción a diferentes grosores de diferentes materiales e hizo posible la tabulación de las intensidades observadas, como función del espesor del material.

Se establece que los rayos X, a diferencia de los rayos catódicos (compuestos de haces de electrones) no eran desviados por la presencia de campos magnéticos, que satisfacían la ley de atenuación del inverso cuadrado, lo que implicaba una propagación “radial” y evidenciaba que eran absorbidos en el aire en mucho menor medida que los rayos catódicos.

En la década de 1920 se avanzó de nuevo, en gran medida con los trabajos de W. H. Bragg y W. L. Bragg, quienes introdujeron la relación de esta radiación con la naturaleza de los cristales perfectos dejando claro que se trata de radiación electromagnética con longitud de onda del orden del espaciamiento de la red cristalina. Eso permitió la fabricación de monocromadores y, al obtener haces monocromáticos, i.e. de una energía en particular, se preparó el terreno para los estudios de espectroscopia de rayos X.

Por otra parte, ya en 1902 se plantearon los cuestionamientos acerca de los efectos de la radiación en los materiales; se estudiaron los cambios –básicamente cambios en color– de diferentes sustancias y en 1908 P. Villard se planteó la necesidad de establecer una unidad de dosis, a la cual posteriormente se llamó Roentgen. Seis años después, Christie estableció la necesidad de medir la energía depositada en el tejido y con ello se fincaron las bases de la dosimetría moderna (N. Dyson, 1990).

Los rayos X como herramienta

Los años alrededor del descubrimiento de los rayos X se caracterizaron por el replanteamiento de muchas cuestiones en física y el estudio de la naturaleza de los rayos X jugó un papel muy importante en ello. Mientras tanto, los rayos X eran ampliamente utilizados por



Figura 2. Tubo de Geissler.

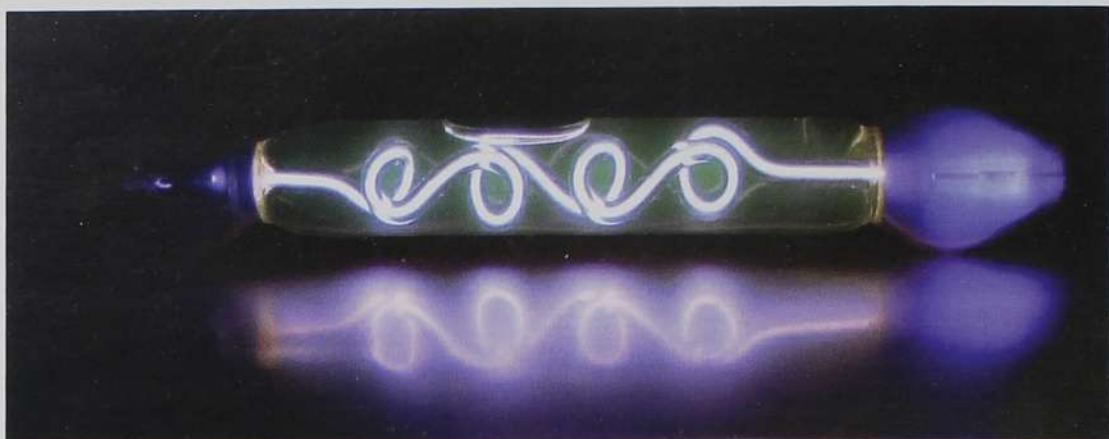


Figura 3. Tubo de Geissler activado.

algunos médicos para diagnóstico e incluso terapia, lo cual promovió un avance paralelo en la tecnología de fabricación de los tubos de rayos X. Éstos estaban compuestos por tubo de vidrio al vacío; en uno de sus extremos se colocaba un cátodo, el cual produce el haz de electrones que son acelerados hacia la ventana opuesta del tubo, y en el extremo opuesto al cátodo se colocaban diversos materiales (metal blanco o ánodo), que son los emisores de la radiación X, después de ser bombardeados por los electrones o rayos catódicos.

El diseño del ánodo evolucionó hasta el punto de poder seleccionar materiales y geometrías. Primero se utilizaron pequeñas piezas de láminas delgadas de metal; posteriormente se sustituyeron por placas gruesas. Los problemas que se enfrentaban en cuanto al adecuado enfriamiento de los metales utilizados como blanco, llevaron al diseño del ánodo rotante, que son piezas de metal en forma de cono truncado que, al mantenerse rotando, permiten distribuir el bombardeo de los electrones en un elemento de superficie que continuamente se sustituye por su vecino inmediato logrando una disminución de la concentración del calor. Las intensidades obtenidas con este diseño probaron ser un gran avance en radiología.

Sin embargo, el interés por estudiar los fenómenos ópticos que se asocian con la formación de imágenes de rayos X, particularmente empujado por el interés en el desarrollo de técnicas de microscopía con rayos X, llevó a la necesidad de desarrollar fuentes con tamaño focal cada vez menor. Las imágenes de microscopía se obtienen con una fuente cuasipuntual y un sensor colocado a una distancia del objeto a observar, determinada por el factor de amplificación que se busca obtener (Dupree, 2003).

Este desarrollo de fuentes con tamaño focal del orden micras ha sido ampliamente aceptado y las compañías fabricantes de tubos de rayos X ofrecen en el mercado diversos tipos de estas fuentes, además de los

más novedosos tubos de nanofoco. Ambos tipos de tubos han implicado la utilización de diversos adelantos en materia de enfriamiento del metal en el ánodo, así como de sistemas de vacío adecuados.

Los métodos de adquisición de imágenes también evolucionaron (tabla 2): desde la película de Edison a las películas de emulsión doble y, posteriormente, al desarrollo de sistemas de película-pantalla, incluyendo pantallas fluorescentes con arreglos moleculares que semejan microscópicas fibras ópticas, que llevan de manera muy fiel los fotones de luz visible –producidos como respuesta a un fotón de rayos X incidente– minimizando el error introducido por la redistribución de los fotones visibles, error que da por resultado una presentación borrosa o difusa de los detalles, y que es observado con algunos tipos de pantallas fluorescentes. Los diversos mecanismos de generación de imagen, como los intensificadores de imagen, la fluoroscopia, los sensores digitales, el uso de fotomultiplicadores para tomografía computarizada, etcétera, son un reflejo de los avances logrados en materia de instrumentación.

Nuevos retos en imágenes de rayos X

En la década de 1960 se publicaron los resultados de estudios de la interferencia de rayos X usando cristales perfectos, lo cual marcó la pauta de las investigaciones que se retomaron en la década de 1990, gracias a la disponibilidad de diversos componentes requeridos en los diseños experimentales. Así, a partir de 1995 se reportan resultados de diferentes aproximaciones que las instalaciones de radiación de sincrotrón hacían posibles.

A cien años de su descubrimiento, los rayos X representan el reto de buscar la información que tradicionalmente se desecha y que está contenida en los cambios de fase que, como radiación electromagnética, sufren los rayos X al pasar a través de materiales donde su atenuación es mínima e imperceptible. De manera

similar, los rayos X son desviados de su dirección de propagación original como efecto de su interacción con la materia que atraviesan. Dicha interacción está gobernada por las interacciones de los fotones de rayos X con los electrones atómicos, y está descrita por un componente relacionado absolutamente por la atenuación o la capacidad del material para absorber la energía del fotón de rayos X, así como por un componente relacionado con la refracción como función de las variaciones de la fase. Aquí cabe señalar que los sensores utilizados en adquisición de imágenes por rayos X, que siempre han sido elaborados de contribución de las variaciones de la fase en los detalles de la imagen, exigen que esta información se “traduzca” a variaciones en la intensidad del haz de fotones que, finalmente, es lo que observa el detector.

La aproximación que se decide tomar para la adquisición de la información de estas variaciones de la fase define lo que se ha catalogado como diferentes técnicas de rayos X sensibles a la fase (Fitzgerald, 2000). Dos de ellas, la radiografía por contraste de fase y DEI (*diffraction enhanced imaging*), se describen de manera muy breve a continuación.

Contraste de fase introduce la utilización de cristales perfectos a manera de filtros para la depuración de los fotones desviados de su trayectoria como resultado de las variaciones de fase. Dichos cristales, llamados cristales analizadores, son sintonizados al ángulo de máxima reflectividad –ángulo de Bragg– de acuerdo con la longitud de onda del haz de rayos X incidente. Sin embargo, esta técnica se restringe a la visualización de objetos fase que, de acuerdo con el concepto introducido por Zernike en el desarrollo de la microscopía por contraste de fase, son objetos básicamente transparentes, en este caso a los rayos X.

DEI es una técnica desarrollada en laboratorios de fuente sincrotrónica; de igual manera, aquí se utiliza un cristal analizador para el filtrado de fotones desviados. Este método de adquisición de imágenes sensible a la fase remueve la necesidad de restringir su aplicación a objetos fase, mediante la utilización de la propiedad de los cristales perfectos, descrita por su curva de reflectividad, y la cual se obtiene en el laboratorio con ayuda de sensores que monitorean la

Tabla II: Recuento histórico de los avances tecnológicos dedicados a mamografía.
Avances claves en mamografía [Haus, 2002]

Año	Avance tecnológico
Hasta 1969	Utilización de tubos de rayos X con blanco convencional de tungsteno con películas de tipo industrial de exposición directa
1969	Introducción de unidad especializada de mamografía con blanco de molibdeno y tubo de compresión. (CGR Senographe)
1971	Sistema de xeroradiografía para mamografía (Xerox)
1972	Sistema de pantalla-película para mamografía (DuPont Lo-Dose system)
1976	Sistema de película-pantalla de tierras raras y chasis especial para mamografía (Kodak Min-R)
1977	Unidad de mamografía para magnificación con foco microfocal (Radiological Sciences Inc.)
1978	Unidad de mamografía con rejilla (Philips)
1987	Comienzo del Programa de Acreditación (MAP) de Mamografía del Colegio Americano de Radiología (ACR)
1992	Introducción del Manual de control de calidad de mamografía para radiólogos, tecnólogos de radiología y físicos médicos del ACR
1994	Implementación en Estados Unidos, por la FDA, del Acta de estándares de calidad en mamografía
2000	Aprobación por la FDA del sistema digital de mamografía para uso clínico (GE Senographe 2000)

La facilidad de trabajar los archivos ya digitalizados tiene repercusiones más allá de los aspectos de comunicación y archivo. Una ventaja inmediata de los sistemas digitales es la facilidad del análisis de la imagen con variaciones de contraste y brillo, así como de las ampliaciones (*zoom*) de las regiones de interés, todo esto sin necesidad de exponer de nueva cuenta al paciente a los rayos X.



Figura 4. Tubo de Goldstein activado.

intensidad del haz incidente y el haz reflejado por el analizador. La medida de la razón de sus lecturas, como función de la posición angular del cristal analizador respecto a la dirección del haz monocromático a su entrada al diseño experimental, representa lo que se conoce como *rocking curve*, y es el elemento que explota esta aproximación de DEI para la formación de imágenes con base en los efectos de diferencias de fase e imágenes formadas con base en los efectos atribuibles a los efectos de absorción.

Estas líneas de trabajo representan los nuevos desafíos que la radiología planteó antes de cerrar el siglo XX y que se pretende explotar como herramientas de una nueva radiología que haga uso de toda la información física que los rayos X transportan. Hasta la fecha, el estudio de todas estas técnicas ha sido enfocado en el entendimiento de los efectos de refracción y su descripción teórica, en el componente tanto teórico como experimental de los elementos de cristales perfectos que las técnicas de contraste de fase y DEI requieren en sus montajes experimentales, así como en las restricciones que se imponen a la fuente para un mejor efecto de imagen.

Los detectores utilizados en el desarrollo de estas técnicas han sido aquéllos que se encuentran disponibles en el mercado y que se utilizan de manera convencional en la adquisición de imágenes por rayos X.

Radiología digital y evaluación asistida por computadora

La introducción de la digitalización de las imágenes radiológicas ha sido un gran avance para el diagnóstico médico, puesto que permite una mejor comunicación y archivo, así como el procesamiento de imágenes requerido en técnicas tales como la tomografía computarizada y la angiografía por sustracción.

La transición a sensores digitales para imágenes de rayos X involucra únicamente la sustitución de los arreglos pantalla-película por el sensor digital. De modo primario, lo que se está realizando con este paso es la pixelización de la adquisición de imagen. En comparación con las películas cuyos elementos mínimos para adquisición de información son los mismos granos de la película, en los sensores digitales estos elementos mínimos son los píxeles. En razón de ello se tiende a pensar que los nuevos sistemas digitales no son buena opción para las técnicas radiológicas que

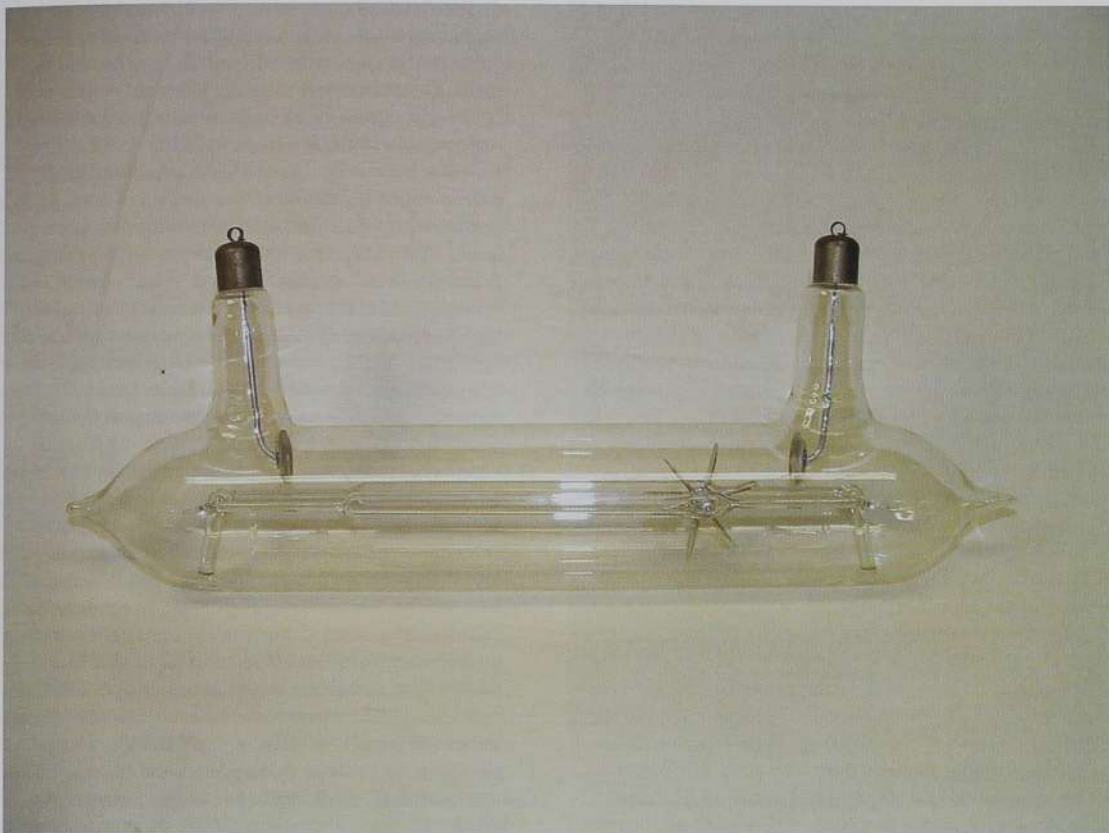


Figura 6. Tubo de Crookes con riel.

forzosamente requieren de alta resolución espacial, como es el caso de mamografía.

La introducción del detector plano de campo completo para rayos X, y en especial en mamografía con la técnica de *Full Field Digital Mammography* (FFDM), hace posible la incorporación de los estudios de mamografía, junto con el resto de las modalidades de imagen, a las ventajas de la tecnología digital. Sin embargo, la aplicabilidad médica de estos sensores ha sido objeto de diversos estudios por colaboraciones que recién han reportado sus resultados (Yaffe, 2006; Bloomquist, 2006). Básicamente, la pregunta es si la aplicabilidad y la utilidad médica de FFDM es comparable o mejor que la obtenida con mamografía convencional.

Las características físicas de los sensores digitales son cuantificadas por parámetros tales como: 1) *Resolución espacial*, que indica cuál es el detalle más pequeño que un sensor puede capturar. En el caso de las películas, depende del tipo de grano de la película y la correcta compatibilidad con la pantalla fluorescente. En el caso de sensores digitales, el tamaño mínimo está determinado por el tamaño de los píxeles. 2) *Función de*

transferencia modulada (MTF). Caracteriza detalladamente la disminución del contraste por la transferencia de las estructuras en el espacio de la frecuencia espacial y permite señalar la transferencia del contraste y nitidez de estructuras específicas. 3) *Eficiencia cuántica de detección (DQE)*. La eficiencia del detector es determinada mediante el parámetro DQE, que es una función de la MTF y, por ende, de la frecuencia espacial, así como de las propiedades del ruido y de la exposición a la radiación. La DQE cuantifica la eficiencia de desempeño del detector en términos de su sensibilidad, el error que se introduce mediante el espectro de ruido y la dosis o exposición a la radiación ionizante que requiere para obtener imágenes con buen contraste; generalmente es representado por una curva en el espacio tridimensional y es, en pocas palabras, la medida de qué tan cerca está el detector de comportarse como un detector ideal. No obstante la compleja dependencia de la DQE con respecto a los parámetros que la definen, se acostumbra dar su valor a la frecuencia espacial nula teniendo, así, un único valor numérico para la caracterización del detector. Por detector ideal se entiende aquél que es capaz de

adquirir una imagen sin que él mismo intervenga, esto es, produce la imagen de modo tal como si el detector "no hubiera estado ahí". Tal detector, para el cual se obtendría (a frecuencia nula) una DQE=1 (o 100%) no existe y lo que se hace con los detectores reales es cuantificar qué tan cerca o lejos está de ser un detector ideal, tabulando sus valores de DQE en un rango que va de 0 a 1. Así, al ver que en las hojas de especificaciones de los detectores para imágenes de rayos X se enlistan los valores de las DQE, estamos viendo, en un modo bastante compacto, la caracterización más completa del detector. 4) *Rango dinámico*. En un sensor de imágenes, el rango dinámico es la razón entre señales máxima y mínima que pueden ser medidas de manera precisa. En los sistemas convencionales de radiografía, basados en películas, esta característica es gobernada por la densidad óptica, representada como función de la exposición en una curva cuyas forma y pendiente varían de acuerdo con diversos parámetros, tales como la temperatura, el tiempo de revelado, etcétera. Para los sistemas digitales, en cambio, esta relación muestra una clara dependencia lineal entre las señales de entrada y las de salida.

Existen actualmente cinco tipos de sensores digitales para mamografía. Unos involucran tecnología llamada híbrida, en el caso de la Imaging Plate, y otros se basan en la más pura tecnología digital, representada por los sensores de selenio. Sin embargo, se ha establecido un acuerdo para que siempre haya una clara distinción entre los sistemas híbridos y los detectores digitales planos, representados por los de silicio amorfo utilizados en el denominado *Full Field Digital Mamography*. En la tabla 3 se comparan de los valores de los parámetros de caracterización, arriba presentados, de los sensores de mamografía existentes en el mercado (Pfanzeltzer, 2003; Bloomquist, 2006), y que se describen a continuación.

Imaging Plate (Fuji y Siemens, entre otros). En este tipo de sensores, los rayos X son absorbidos y guardados en forma de imagen latente en una película, reforzada, de composición BaFCl:Eu. La energía de los fotones de rayos X incidentes en el sensor es almacenada de acuerdo con propiedades cuánticas

de los materiales semiconductores por electrones atómicos de este compuesto, que son confinados en "trampas" de las cuales sólo pueden ser liberados mediante una posterior excitación que les provea de la energía necesaria, lo cual es realizado mediante la exposición a radiación láser, aplicada en forma de proceso de escaneo. La radiación, producto de la desexcitación de los electrones de las trampas, es, por lo tanto, igualmente producida en forma de líneas de escáner, que son leídas por un tubo fotomultiplicador que acompaña al láser en el mismo sistema mecanizado de escaneo lineal. Este tipo de sensor es considerado un método híbrido de radiología digital, dado que el método primario de detección son, de nueva cuenta, las películas radiológicas, haciendo una lectura que ofrece una señal eléctrica -analógica- de salida.

CCD Digital Breast Image Lorad-Hologic (2002). Este tipo de sensores utilizan centelladores del tipo CsI:TI acoplado a una red de fibra óptica cuyo segundo extremo es fijado a la superficie bidimensional del sensor CCD, en un arreglo que minimiza la dispersión.

CCD SenoScan Fischer Imaging (2001). Es un detector CCD unidimensional, que realiza un escaneo del haz de fotones y posterior conversión a luz visible mediante el uso de un centellador del tipo CsI:TI. Este sensor ofrece la ventaja de que su escaneo lineal reduce de manera efectiva el error debido a la presencia de los fotones dispersados.

Campo completo silicio amorfo - FFDM Senographe 2000D GE Medical Systems (2000). Una película de material centellador CsI:TI es acoplada en contacto directo con una matriz bidimensional de Si amorfo. Las características del material centellador hacen que convierta los fotones de rayos X incidentes en fotones de longitud de onda a la cual es óptima la respuesta del sensor de silicio amorfo, en un mecanismo de fotodiodo, cuyo control de lectura se realiza mediante una electrónica constituida por un conjunto de transistores de película delgada.

Selenio, Selenia Lorad Hologic (2002). El sensor que puede ser considerado como verdaderamente digital, desarrollado a base de selenio, convierte

Tabla III: Datos comparativos del desempeño de los diferentes sensores que en 2003 se encontraban en el mercado para mamografía.
Propiedades de los diversos sensores en mamografía [Pfanzeltzer2003]

Sensor	Resolución espacial	DQE	Rango dinámico		
Convencional (pantalla - película)			~20 lp/mm	0.2-0.25	~100:1
Imaging Plate			9 lp/mm	0.3	4000:1
SenoScan (Fischer Imaging)			12 lp/mm	0.4	1000:1
Digital Breat Imager (Lorad-Hologic)			10 lp/mm	0.4	1000:1
Senographe 2000D (GE Medical Systems)			5 lp/mm	0.45	16000:1
Selenia (Lorad-Hologic)			7 lp/mm	~0.7	No reportado

directamente los fotones de rayos X en señal eléctrica. Estos electrones son transportados a partir de su punto de generación al pixel-electrodo más cercano a través de un campo eléctrico en un mecanismo de arrastre.

Tendencias y perspectivas

Con el establecimiento de las técnicas digitales se ha fomentado la estandarización de los formatos de imágenes que se utilizan en radiología médica. Hoy en día es común la utilización de los formatos DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*), que tratan de conseguir una completa estandarización que incluya las imágenes obtenidas no sólo en rayos X, sino en sistemas tan dispares como CT, mamografía, resonancia magnética, etcétera.

La facilidad de trabajar los archivos ya digitalizados tiene repercusiones más allá de los aspectos de comunicación y archivo. Una ventaja inmediata de los sistemas digitales es la facilidad del análisis de la imagen con variaciones de contraste y brillo, así como de las ampliaciones (*zoom*) de las regiones de interés, todo esto sin necesidad de exponer de nueva cuenta al paciente a los rayos X.

A partir de la década de 1990 se ha venido desarrollando toda una línea de trabajo en la dirección de explotar aún más la capacidad de los sistemas de cómputo modernos, mediante la aplicación de técnicas de imagen que involucren incluso el reconocimiento de patrones. Llevados al campo de la radiología de diagnóstico, estos algoritmos conforman lo que se conoce como diagnóstico asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés) y permiten ofrecer al médico una oportunidad de reconocer patrones sospechosos de estar asociados con lesiones de interés. Todo esto mediante el aprendizaje de los casos que se puedan contar en estudios estadísticos y que permitan hacer la asociación de una característica de la imagen recién obtenida con la información de archivos históricos, utilizada para la elaboración de estos algoritmos.

La introducción de estos nuevos sistemas ha llevado consigo la necesidad de reformular los archivos médicos impulsando incluso el desarrollo de tecnología especializada, como sistemas de monitores, de gráficos, de archivo y, por supuesto, de cómputo.

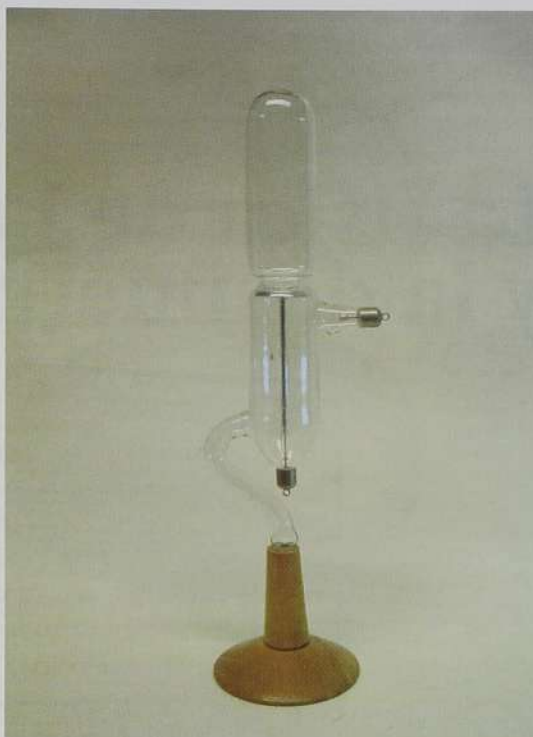


Figura 5. Tubo de Goldstein.

Esta revisión de los avances que han impulsado el desarrollo de la radiología médica, especialmente de los sistemas de rayos X, muestra el planteamiento del avance científico y el desarrollo tecnológico, y su retroalimentación en un marco multidisciplinario, en el cual se combinan esfuerzos para resolver problemáticas planteadas por cada especialidad. Se pueden identificar líneas paralelas de avance en los campos de la física, de la instrumentación y tecnología, y así como de la aplicación, avance que se ve enriquecido en los puntos de unión al compartir intereses con las otras disciplinas. Ésta es la visión multidisciplinaria que alienta nuestro trabajo en la investigación de técnicas de adquisición de imágenes radiológicas y en la aplicación de todas las herramientas que involucra. ●

[Bibliografía]

- Bloomquist, A.K., Yaffe, M.J. et al. *Med. Phys.* 33 (3): 719-736. 2006.
 Dijkstra, H. <http://members.chello.nl/~h.dijkstra19/>
 Dupree, J.C. Surface Mount Technology Association (SMTA). Conference Proceedings. 2003.
http://www.smta.org/knowledge/proceedings_abstract.cfm?PROC_ID=1278
 Dyson, N.A. *X-Rays: In atomic and nuclear physics*. 2a edición. Cambridge University Press. 1990.
 Fitzgerald, R. *Physics Today*. 53 (7): 23. 2000.
 Gold, R.H. et al. *RadioGraphics*. 10: 1111-1131. 1990.
 Gray, J. E., Orton, C.G. *Radiology*. 217 (3): 619-625. 2000.
 Haus, A.G. *Technology in Cancer Research & Treatment*. 1 (2): 119-126. 2002.
 Pfandzelter, R., Sander, G., Gibis, B., Perleth, M., Lubecki, P., Herzt, E. *Digitale Mammographie*. <http://www.pas1054.de/Infopool/FFDM-HTA-100403.pdf>
 Rothenberg, L.N., Haus, A.G. *Med. Phys.* 22 (11): 1923-1934. 1995.
 Yaffe, M.J., Bloomquist, A.K., Mawdsley, G.E. et al. *Med. Phys.* 33 (3): 737-752. 2006.

La física de las radiaciones y la dosimetría

"ES CONCEBIBLE QUE EN MANOS CRIMINALES EL RADIO PUEDA LLEGAR A SER MUY PELIGROSO, Y UNO PUEDE PREGUNTARSE SI ES CONVENIENTE PARA EL HOMBRE REVELAR LOS SECRETOS NATURALES, SI ESTÁ PREPARADO PARA BENEFICIARSE CON ELLOS O SI ESTE CONOCIMIENTO IRÁ EN DETRIMENTO SUYO... ME CUENTO ENTRE AQUELLOS QUE CREEN, LO MISMO QUE NOBEL, QUE LA HUMANIDAD OBTENDRÁ MÁS BIEN QUE MAL DE LOS NUEVOS DESCUBRIMIENTOS."

DISCURSO DE P. CURIE EN LA RECEPCIÓN DEL PREMIO NOBEL 1903.

Hilda Mercado Uribe

Radiación ionizante

Cuando en la vida cotidiana escuchamos la palabra *radiación*, por lo común nos imaginamos una explosión nuclear, un símbolo que alerta peligro, o una sala de rayos X en un hospital o, simplemente una intensa luz fosforescente. En este artículo se explicarán los conceptos básicos de la física de las radiaciones, los mecanismos en que ésta interacciona con la materia, por qué y cómo cuantificar sus efectos, y algunos beneficios y riesgos que conlleva su interacción con los seres vivos.

La radiación es una manifestación de energía en movimiento. Cuando interacciona con los átomos de un medio, provoca primero la excitación de sus electrones. En algunos casos, si la excitación es muy intensa, puede ocurrir la expulsión de electrones dejando vacancias o huecos en el átomo. A este proceso se le conoce como *ionización*, y a la radiación que lo provoca, *radiación ionizante*.

Los seres humanos hemos estado expuestos a este tipo de radiación desde nuestra existencia en la Tierra;

más aún, desde que se formó nuestro sistema solar, la Tierra ha sido y sigue siendo bombardeada por radiación proveniente de nuestra galaxia y de otras muy alejadas de nuestro planeta. Los principales responsables de la radiación natural extraterrestre son los rayos cósmicos, que son partículas muy veloces y altamente energéticas (con energías comparables a las que se alcanzan en los aceleradores de partículas). Al llegar a la atmósfera de la Tierra, interaccionan con los átomos constituyentes produciendo reacciones nucleares que dan como resultado otras partículas, y éstas continúan su viaje hacia la superficie. Como se trata de partículas cargadas, su intensidad varía dependiendo de la latitud, de acuerdo con la presencia del campo magnético, así como de la altitud, es decir, es más intensa en la Ciudad de México que a nivel del mar, por ejemplo. En ocasiones, las reacciones nucleares mencionadas dan lugar a núcleos inestables que producen emisión de fotones.

HILDA MERCADO URIBE Profesora investigadora del Cinvestav, Unidad Monterrey. Sus áreas de especialización son la física de radiaciones y la dosimetría. Actualmente trabaja en fundamentos de la dosimetría y en aplicaciones de esta área a la física médica y al fechamiento de

cerámicas por termoluminiscencia. Colabora con grupos de arqueólogos, geofísicos y físicos de otras instituciones.
hmercado@cinvestav.mx

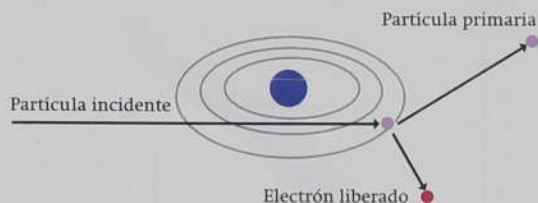


Figura 1. Ionización de un átomo. Debido a la radiación, un electrón es expulsado de su órbita dando un salto a otra órbita; queda un hueco en la primera y se emite un fotón en el proceso.

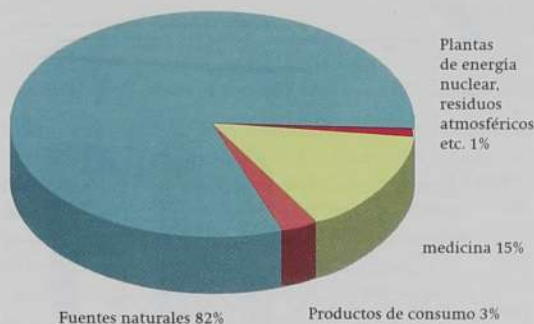


Figura 2. Contribución promedio de las principales fuentes de radiación en los Estados Unidos de Norteamérica. Las fuentes naturales (82%) incluyen la radiación cósmica, la terrestre, la interna y el radón. La mayoría (50%) proviene del radón, un gas inerte que se encuentra en la atmósfera. Algunos productos de consumo contribuyen en 3%, las aplicaciones médicas en 3%, y plantas nucleares y residuos atmosféricos con menos de 1%.

Además de este tipo de radiación, que llega a la Tierra del espacio exterior, existen otras fuentes de radiación también natural que recibimos constantemente, y que prácticamente ha sido la misma todo el tiempo desde que se formó la Tierra; esencialmente, es radiación que proviene de algunos minerales del suelo presentes en rocas ígneas, como es el caso del uranio-238 (^{238}U), el torio-232 (^{232}Th) y el potasio-40 (^{40}K). A diferencia del último, los dos primeros elementos son muy pesados, o sea que tienen un número atómico muy grande y su comportamiento físico es similar (figura 2).

Decaimiento radiactivo

De acuerdo con las leyes de la naturaleza, los sistemas físicos tienden a permanecer o buscar un estado de equilibrio. El núcleo atómico no es la excepción, cuando hay un desequilibrio en el número de protones con relación al de neutrones, el núcleo tiende al equilibrio transformándose de manera espontánea en otro núcleo, mediante un proceso continuo que lleva consigo la emisión de energía. Este proceso se conoce como *decaimiento radiactivo* y los núcleos que lo presentan son llamados *radionúclidos* o *núcleos radiactivos*.

¿Qué tan rápido se desintegra un núcleo radiactivo? Eso depende del radionúclido de que se trate, como veremos más adelante. A la rapidez con la que ocurre el decaimiento radiactivo se le denomina *actividad*, es decir, la actividad es el número de transformaciones o desintegraciones por unidad de tiempo. Para medir este parámetro se utiliza como unidad el Becquerel (Bq), definido como una desintegración por segundo, o bien, el Curie (Ci), en honor a una de las más grandes científicas, Marie Skolodowska Curie, que descubrió el radio. El Curie se definió formalmente como la actividad de 1 g de radio-226 (^{226}Ra). Un Ci equivale a 37 mil millones desintegraciones por segundo (o sea, 37×10^9 Bq). En la práctica, esta cantidad de decaimientos es muy elevada, por lo que se ha convenido usar como unidad el milicurie y el microcurie, o sea, una milésima y una millonésima de Curie, respectivamente.



Figura 3. En 1903, Marie Skolodowska Curie, Pierre Curie y Henri Becquerel recibieron el Premio Nobel de Física por su descubrimiento de la radiactividad, siendo ella la primera mujer en conseguirlo.

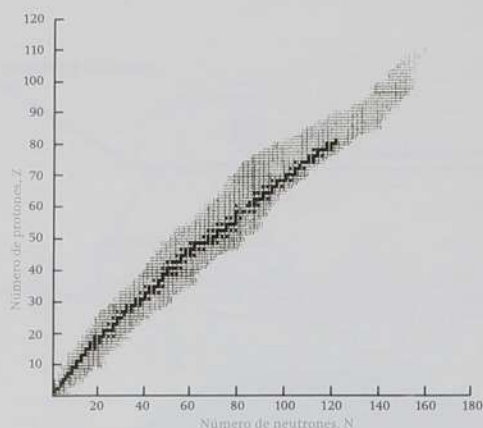


Figura 4. Relación de los radionúclidos estables e inestables conocidos.

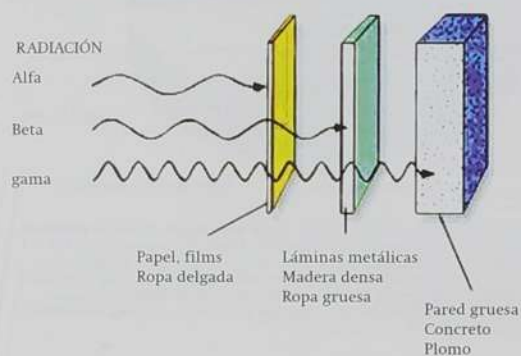


Figura 5. Comparación del poder de penetración de los diferentes tipos de radiación.



Figura 6. Sala de radioterapia en un hospital. Aquí se aplican tratamientos con radiación para la cura de tumores malignos. La instalación es blindada para evitar la salida de la radiación.

Todos los radionúclidos tienen como sello propio un tiempo característico de decaimiento que se conoce como *vida media*, que es el tiempo que tardan en decaer la mitad de los núcleos iniciales de una muestra radiactiva; esto significa que si en un instante dado tenemos una cantidad N de núcleos radiactivos idénticos, todos con la misma probabilidad de desintegración, después de una vida media se tendrá la mitad de los núcleos iniciales, mientras la otra mitad se habrá desintegrado y transformado emitiendo radiación. El proceso continúa hasta que todos los núcleos de la muestra se desintegren. Puede ocurrir que la vida media del radionúclido sea extremadamente corta, como el caso del radón-217, cuya media es de 2.3 millonésimas de segundo; o extremadamente larga, como el caso del uranio-238, que tiene una vida media de miles de millones de años. En este último caso, el proceso de decaimiento del núcleo original consiste en la transformación lenta y consecutiva de núcleos diferentes que son inestables, hasta que al final, después de haber pasado por más de 10 núcleos diferentes inestables, se llega a un estado de estabilidad.

Hay en la naturaleza una cantidad importante de radionúclidos. En la figura 4 se muestra una gráfica del número de neutrones (N) versus el número de protones (Z). Los cuadros más oscuros corresponden a los núcleos estables y los más claros a los núcleos inestables.

Algunos núcleos inestables, generalmente los más pesados ($Z \geq 82$), con exceso de protones, decaen emitiendo *radiación alfa* (α). Una partícula α es un núcleo de helio constituido por cuatro nucleones: dos protones y dos neutrones.

Existen otros tipos de radiaciones que se manifiestan también por partículas que son emitidas en algunos decaimientos; se trata de la *radiación beta menos* (β_-) y de la *radiación beta más* (β_+). La primera ocurre cuando el número de neutrones excede al número de protones, y la segunda es el caso contrario. Una partícula β_- es un electrón, y una partícula β_+ tiene las mismas características que el electrón, con la diferencia de que está cargado positivamente, por lo que se conoce como positrón.

La radiación también se manifiesta mediante ondas, como ocurre en el caso de los rayos X y la radiación gama (γ); ambos son radiación electromagnética.

Pero la radiación no sólo se manifiesta por medio de partículas en movimiento, sino también mediante ondas, como ocurre en el caso de los rayos X y la radiación gama (γ), ambos son radiación electromagnética pero de diferente procedencia y energía. Los primeros pueden originarse cuando un haz de electrones choca con un material pesado e ioniza sus capas electrónicas internas que, al reacomodarse, provocan la emisión de rayos X. También se pueden producir por la desviación de la trayectoria que sufre una partícula, debido a la influencia coulombiana que ejerce el núcleo atómico cuando la partícula pasa cerca de él; esta radiación se conoce como *radiación de frenado* o *bremsstrahlung*. Por otra parte, los rayos γ son emitidos cuando un radionúclido decae pasando por uno o varios estados excitados hasta llegar a un estado de estabilidad.

Poder de penetración de la radiación

Cuando alguna de las radiaciones anteriores penetra en un medio, interacciona principalmente con los electrones atómicos del mismo, y en cada interacción va transfiriendo parte de su energía. La manera en que ocurre este proceso depende del tipo de radiación incidente, de su energía y del material sobre el que ésta incide. Las partículas beta (electrones y positrones), por ejemplo, son muy ligeras, y por esta razón también son muy veloces. Cuando una partícula beta penetra en la materia, pierde energía cinética, básicamente debido a la interacción con los electrones atómicos del medio absorbedor. Esto provoca un frenado gradual de la partícula incidente, que va depositando su energía a lo largo de su trayectoria hasta que se frena completamente. La partícula beta cede una pequeña parte de su energía al electrón y, debido a ello, puede cambiar su dirección notablemente en una sola colisión; por lo tanto, la trayectoria que siguen estas partículas dentro del medio es una trayectoria quebrada o tortuosa.

En el caso de la radiación alfa, el depósito de energía es muy diferente. Debido a que una partícula alfa es mucho más pesada que un electrón o positrón, con la

misma energía ésta se mueve mucho más lentamente en el medio. En cada colisión con los electrones de éste, la partícula alfa transfiere gran parte de su energía, por lo que la trayectoria que sigue dentro del medio es prácticamente recta. Para entender mejor las dos situaciones anteriores, hagamos una analogía. Consideremos que tenemos una canica y una bola de boliche; ambas tienen la misma energía y se hacen colisionar independientemente con un grupo idéntico de canicas dispersas en una superficie. En el primer caso veremos que los movimientos y choques se realizarán velozmente y de manera azarosa, transfiriéndose poca energía a las canicas del grupo, mientras que en el segundo caso, los movimientos de la bola de boliche se hacen de manera más lenta porque la bola de boliche es mucho más pesada que una canica. Por la diferencia de masas entre los dos tipos de partículas, en cada colisión la bola cede la mayor parte de su energía a la canica y su trayectoria es prácticamente recta; debido a esto, el alcance que tiene una partícula alfa en un sólido es del orden de unas milésimas de milímetro, y toda la energía que transportaba la partícula alfa queda depositada en un pequeño volumen del material irradiado. Mientras que en el caso de la partícula beta incidente hay un menor depósito de energía por distancia recorrida; el depósito es menos concentrado y el alcance dentro de los sólidos es del orden de unos milímetros. Por esa razón, a las partículas beta se les conoce como *radiación débilmente ionizante*, mientras que a las partículas alfa se les conoce como *radiación altamente ionizante*.

Por su parte, los rayos γ son los más penetrantes dentro de estos tres tipos de radiaciones; la causa es que los fotones no tienen masa ni carga, entonces tienen un poder de penetración mucho más grande que en los dos casos anteriores, y se requieren varios centímetros de plomo y de concreto para lograr detenerlos (figura 5). Ésta es la razón por la que las paredes de las salas de rayos X en los hospitales se blindan con dichos materiales, para evitar que esta radiación escape y llegue a las zonas donde se encuentra el público en general (figura 6).



Figura 7. El detector Geiger-Muller es un aparato utilizado con mucha frecuencia en las instalaciones donde existen fuentes radiactivas. Su mecanismo de operación se basa en el proceso de ionización que produce la radiación al interactuar con él.

Dosis y dosis equivalente

De lo anterior se puede concluir que, en general, cuando la radiación interacciona con un material, penetra y deposita en él toda o parte de su energía inicial. La manera en que se cuantifica esta energía es recurriendo al concepto de *dosis*. La dosis es la energía depositada en una unidad de masa. Su unidad original fue el *rad*, que corresponde a 100 erg depositados en un gramo de masa. Actualmente también se utiliza con frecuencia otra unidad llamada *Gray (Gy)*, que equivale a 100 rads. En la práctica, un Gray es una unidad muy grande, por lo que se suele usar muchas veces el centiGray (1 rad).

En los seres vivos, particularmente, el efecto que causa la radiación se mide en términos del daño biológico, y éste puede variar notablemente de un tipo de radiación a otro; se le llama *dosis equivalente* y se define como la dosis depositada en el organismo, multiplicada por un factor especial que caracteriza la radiación específica. Su unidad original es el *rem*, aunque también actualmente se utiliza el *Sievert (Sv)*. Un Sv equivale a 100 rem. Para darnos una idea de lo que estas cantidades significan, se presentan aquí valores de dosis equivalente correspondientes a algunas fuentes de radiación.

Radiación artificial

Además de las fuentes naturales de radiación que mencionamos al principio, los seres vivos estamos expuestos a otros tipos de radiación en los que interviene la mano del hombre, como la radiación proveniente de usos médicos e industriales, y de los ensayos nucleares. Por otra parte, a las personas cuyo trabajo está relacionado

con el manejo o control de algún tipo de radiación, se les llama *personal ocupacionalmente expuesto*; por ejemplo, los médicos y técnicos que trabajan en las secciones hospitalarias de rayos X y medicina nuclear, las personas que laboran en plantas nucleares o en industrias donde manejan rayos X. Todos ellos están expuestos a dosis mayores anuales que el resto de las personas y por tal motivo, su actividad debe ser supervisada y controlada para evitar riesgos en su salud (figura 7).

¿Cómo medimos la dosis?

Debido a que la radiación es imperceptible para nuestros sentidos, es necesario utilizar métodos para detectarla y cuantificarla (figura 8). Estos métodos dependen del tipo de radiación y de su energía, y se basan en el uso de detectores con características muy especiales, en particular, en el caso de la física médica, tanto en el área clínica como en investigación básica, ha tenido un auge notable el empleo de materiales termoluminiscentes y películas de tinte radiocrómico. A ambos se les conoce como dosímetros, porque permiten medir dosis, ya sea de manera directa o indirecta.

Los dosímetros termoluminiscentes son materiales cristalinos dopados con ciertas impurezas. El principio físico que los rige es la emisión de luz del material previamente irradiado, cuando se les estimula térmicamente. En este caso, la dosis absorbida se cuantifica en relación con la intensidad de la luz emitida. A la relación entre la intensidad de luz emitida y la temperatura a la que se va calentando el dosímetro para liberar la energía absorbida, se le llama *curva de brillo*. Cada material termoluminiscente tiene su curva

Radiactividad natural (promedio)	100 mrem/año
Radiografía de tórax	20 mrem
Radiografía dental	1 000 mrem
Preservación de papas por radiación	5 000 rads
Vuelo trasatlántico	5 mrem
Dosis máxima permitida a personal que trabaja con radiación	5 rem/año

Tabla 1. Valores de dosis equivalente correspondientes para algunas fuentes de radiación.

de brillo característica, la cual permite hacer análisis microscópicos del proceso de depósito y liberación de la energía debida a la radiación. En la figura 8 se presenta una curva de brillo típica del dosímetro más usado en física médica, conocido comercialmente como TLD-100. Los picos que componen esta curva permiten obtener información relevante a nivel microscópico.

Por su parte, las películas de tinte radiocrómico son plásticos muy delgados que contienen una o más capas muy delgadas de material sensible a la radiación. Originalmente, la película es transparente; cuando se expone a la radiación ocurre un cambio en su densidad óptica, que se manifiesta con un cambio de coloración, ya que la película se torna azulada y la intensidad del tono de azul depende de la cantidad de dosis absorbida.

En resumen, podemos decir que la radiación es energía en movimiento, que penetra e ioniza a la materia. Los efectos sobre ésta dependen del tipo de radiación, de la energía y del material mismo sobre el que incide. La dosimetría es un campo de la física dedicada a la medición de esta energía ionizante; sus métodos e instrumentos empleados dependen de las circunstancias específicas. Actualmente, la investigación en dosimetría y sus aplicaciones son muy diversas; algunas de las áreas son la física médica, la protección radiológica y el fechamiento de cerámicas, entre otras. Cabe destacar, también, la relevancia en la investigación en las áreas de dosimetría espacial, dosimetría ambiental y dosimetría personal. Todas estas áreas tienen en común la medición de la dosis absorbida. En algunas de ellas, la evaluación precisa de la dosis tiene implicaciones directas en la salud de los seres vivos. ●

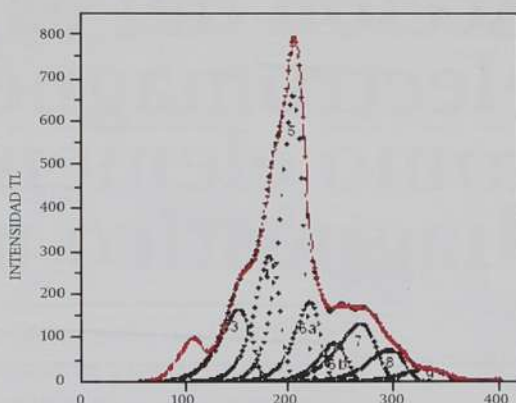


Figura 8. Ejemplo de una curva de brillo característica del dosímetro más conocido en física médica, el TLD-100, expuesto a electrones de baja energía.



Figura 9. La irradiación en alimentos permite su preservación y combate ciertas plagas sin causar efectos nocivos en la salud. Ejemplos de alimentos irradiados comparados con muestras testigo sin irradiar. A) En el caso de las fresas se evita el moho blanco y B) en el de las papas, los brotes.

[Bibliografía]

- http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs149.html
- http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUC/
- <http://www.nsf.ac.lk/aea/images>
- http://www.oni.esuelas.edu.ar/2002/buenos_aires
- Knolls Atomic Power Laboratory. Nuclides and isotopes. Chart of nuclides. 16a edición. Washington, DC. 2002.
- Rickards, J. Las radiaciones: reto y realidades. México, Fondo de Cultura Económica, 1997.
- Segré, E. De los rayos-X a los quarks. Folios Ediciones. México. 1983.

Acción del espectro electromagnético visible como elemento de diagnóstico médico

EL SER HUMANO TIENE LA CAPACIDAD DE DISTINGUIR UNA AMPLIA GAMA DE COLORES. ÉSTA SE VE MODIFICADA O LIMITADA POR CIERTAS PATOLOGÍAS Y PADECIMIENTOS CONGÉNITOS O ADQUIRIDOS. BASÁNDONOS EN ESTOS HECHOS, SE PROPONE UNA METODOLOGÍA INSTRUMENTAL OBJETIVA PARA LA VALORACIÓN DE LA PERCEPCIÓN VISUAL CROMÁTICA, MEDIANTE LOS CAMBIOS DE LA RESPUESTA PUPILAR DEBIDA A LAS DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA INCLUIDAS EN EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO VISIBLE.

Ernesto Suaste Gómez

Ma. Dolores Rodríguez Guzmán

El espectro electromagnético (EEM) está constituido por un conjunto de ondas de diferentes características, las cuales se clasifican de acuerdo con su longitud (λ), frecuencia y energía (figura 1). Es importante anotar que las ondas con mayor λ tienen menor frecuencia y viceversa.¹

La radiación de la luz visible es la que nos permite ver los objetos del mundo material que nos rodea.

La luz blanca es una mezcla de rayos de luz combinados. Cada uno de estos rayos tiene su propia λ , y es su variación la que permite obtener todos los colores posibles: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. La luz se puede descomponer mediante el prisma de Newton para observar cada uno de los colores que la componen (figura 2).

A medida que la λ se hace más corta, la energía de la radiación asociada es mayor. En la figura 3 se exhibe la curva de radiación del espectro visible.

La luz está formada por un conjunto de radiaciones monocromáticas que, al llegar al ojo, originan una sensación de color única. Esto de acuerdo con la radiación de λ dominante, su luminosidad y saturación.²

Una de las características más importantes de cualquier detector es su respuesta espectral. El sistema visual, como tal, presenta una respuesta específica a estímulos de diferente λ .

La caracterización espectral del sistema visual como receptor de energía radiante se realiza mediante la determinación de la curva de sensibilidad espectral relativa (figura 4), la cual se refiere a la luminosidad o la claridad.

Por otro lado, en la figura 5 se muestra el diagrama cromático establecido por la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) en 1931; aquí se observa la distribución y clasificación espectral de los colores.

ERNESTO SUASTE GÓMEZ Doctor en Ciencias. Jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica del Cinvestav, ex presidente de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Biomédica, presidente del primer Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica. Perteneció al sistema Nacional de Investigadores. Actualmente sus líneas de investigación cultivadas dentro del área de Ingeniería Biomédica son en la parte de bioinstrumentación oftalmológica y materiales piezoeléctricos; y han dado lugar al diseño y la construcción de un sinnúmero de instrumentos biomédicos y patentes, así como de transferencia de tecnología. Ha dirigido tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Es árbitro nacional e internacional de varias revistas indexadas y

especializadas. Ha sido becario de Alemania y Estados Unidos. esuaste@cinvestav.mx

MA. DOLORES RODRÍGUEZ GUZMÁN Estudiante de doctorado del Departamento de Ingeniería Eléctrica del Cinvestav con especialidad en Bioelectrónica. Su área de investigación es la instrumentación oftalmológica enfocada a la percepción cromática, respuestas pupilares, potenciales evocados visuales, perimetria y campos visuales. Ha publicado artículos en revistas nacionales e internacionales, y presentado trabajos en congresos nacionales e internacionales. drodrigu@cinvestav.mx

Existen muchas patologías sistémicas y periféricas que afectan las respuestas pupilares cromáticas. Una forma de detectarlas o diagnosticarlas a tiempo es, precisamente, mediante alguna alteración de la respuesta ocular.

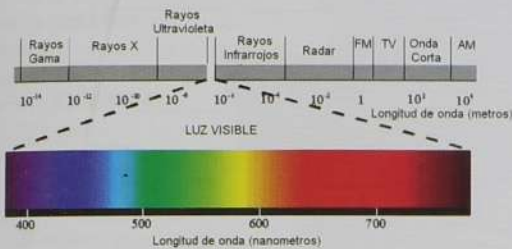


Figura 1. Espectro electromagnético.

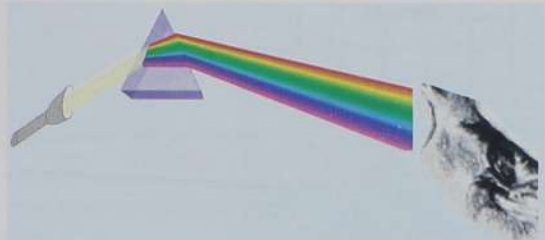


Figura 2. Descomposición de la luz blanca mediante un prisma.

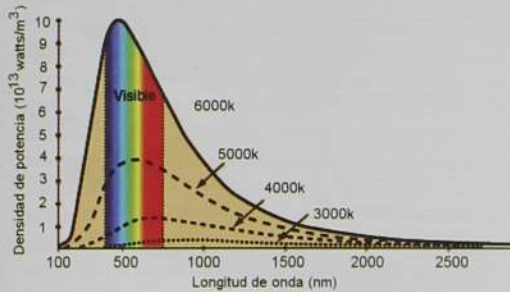


Figura 3. Curva de radiación del espectro electromagnético.

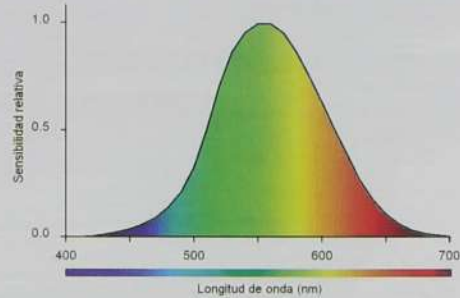


Figura 4. Curva de sensibilidad relativa.

El EEM visible está presente en nuestro entorno diario, es decir, todo lo que nos rodea (objetos, gases, líquidos, luces, etcétera), refleja, absorbe y emite radiaciones, las cuales pueden ser observadas de acuerdo con las longitudes de onda de cada componente del entorno.

Una característica que tiene el ser humano es la capacidad de distinguir una amplia gama de colores, la cual se ve modificada o limitada por ciertas patologías y padecimientos congénitos o adquiridos, ya sean debidos a enfermedades oculares o sistémicas. Basándonos en estos hechos se propone una metodología instrumental objetiva para la valoración de la percepción visual cromática, mediante los cambios de la respuesta pupilar debida a las diferentes λ incluidas en el EEM visible.

En la actualidad, todos los métodos existentes para la exploración de la visión cromática son *subjetivos*, ya sea que se trate de la lectura de números y figuras geométricas inmersas en máscaras cromáticas (prueba de Ishihara); de la selección y la acomodación escalonada de patrones cromáticos (prueba de Farnsworth-Munsell) o del color que se percibe al observar un patrón o *software* cromático. Entre estos métodos subjetivos se encuentra el anomaloscopio de Nagel, con el cual se debe ajustar un color a un patrón ya establecido.^{3,4}

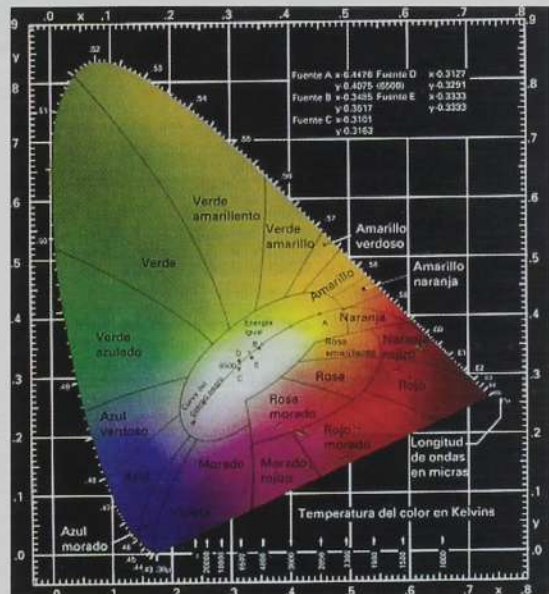


Figura 5. Diagrama cromático CIE, 1931 (Óptica Fisiológica, Psicofísica de la Visión, J.M. Artigas, P. Capilla, A. Felipe, J. Pujol, Mc Graw Hill, 1995).

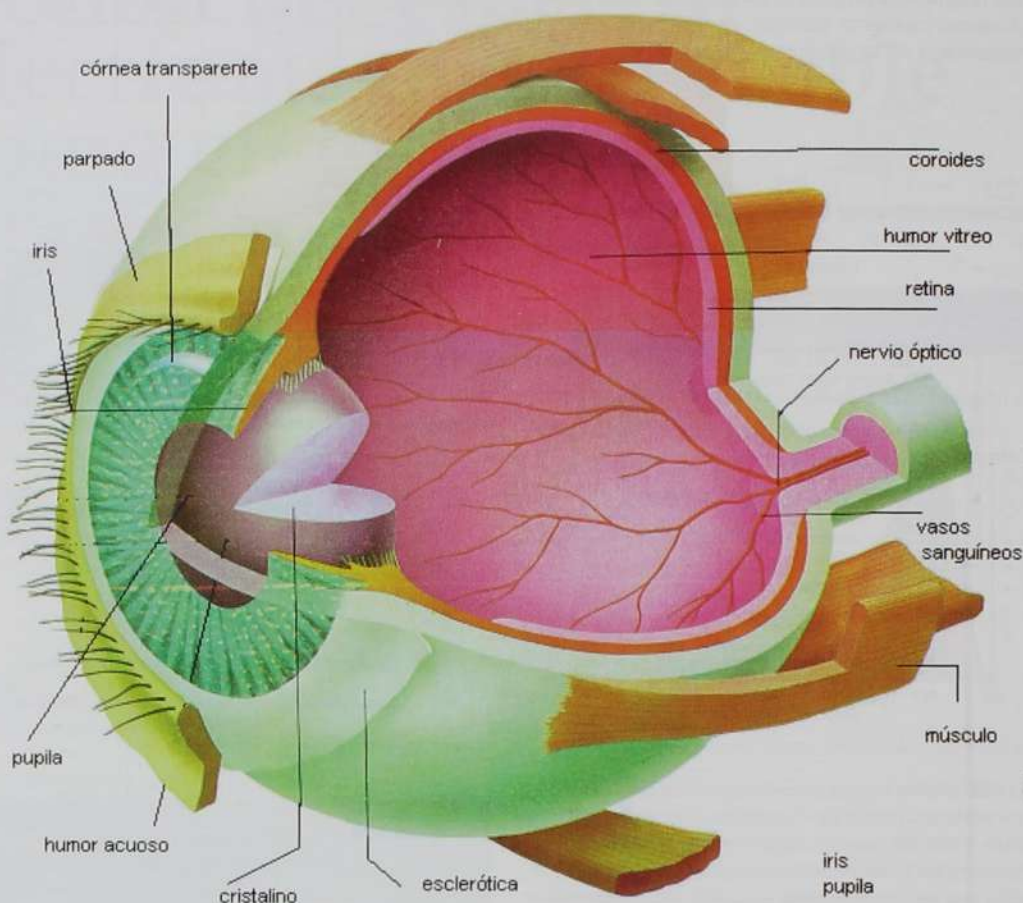


Figura 6. Globo ocular.

Existen muchas patologías sistémicas y periféricas que afectan las respuestas pupilares cromáticas (RPC). Una forma de detectarlas o diagnosticarlas a tiempo es, precisamente, mediante alguna alteración de la respuesta ocular. Es por esta razón que es importante implementar una metodología instrumental objetiva, que determine el estado normal o afectado de dichas respuestas pupilares (RP). Una forma de evaluar la funcionalidad de las RP es mediante la variación de su tamaño inducida por las diferentes λ (colores) del espectro visible.

La evaluación de la pupila constituye una importante puerta de entrada al diagnóstico de muchos padecimientos. El sistema nervioso simpático y el parasimpático ejercen el control activo de la pupila dilatándola (midriasis) y contrayéndola (miosis), respectivamente.

A medida que la iluminación se intensifica, las pupilas se empequeñecen y la velocidad del *hippus* (movimientos

sincrónicos en ambos ojos continuos e involuntarios) aumenta hasta alcanzar un máximo de 2 oscilaciones por segundo. El análisis de la pupila se realiza evaluando su forma, tamaño (normal: 2-4 mm) y respuesta.

Al implementar una metodología instrumental objetiva del estudio y diagnóstico de las RPC estaremos en posibilidad de determinar una curva característica promedio de la visión del color normal de sujetos sanos. Con esta curva podremos comparar, caracterizar y clasificar respuestas incorrectas a la visión de los colores, determinando así el grado de daño y el origen del mismo, aunado a la determinación de las áreas pupilares, latencias, porcentaje de dilatación y redilatación pupilar, iluminación retiniana y umbral retiniano.

A continuación se describen algunos conceptos anatómicos y fisiológicos del ojo.

La pupila es el diafragma a través del cual la luz entra en el ojo. Su tamaño está en función de varios

factores incluyendo la rama aferente de la retina, el procesamiento central en el cerebro, el balance del tono en el sistema nervioso autónomo y los factores locales dentro de los músculos del iris (figura 6). Cualquier alteración en estas estructuras puede afectar el tamaño, la forma y la respuesta de la pupila.⁵⁻⁸

En la práctica, alguna alteración en la pupila rara vez tiene un impacto importante en la visión, sin embargo, el examen de la misma es importante, ya que alguna anomalía puede ser signo de una disfunción ocular o sistémica.

El tamaño de la pupila representa un equilibrio entre la inervación simpática y parasimpática del sistema nervioso autónomo (SNA) y está determinado por el balance de dos músculos antagonistas en el iris:

- El esfínter pupilar (inervación parasimpática, "miosis"); éste cambia su tono en respuesta a dos tipos de estímulos fisiológicos: los cambios en la iluminación retiniana (reflejo a la luz) y los cambios en la distancia de fijación (acomodación, convergencia).
- El músculo dilatador (inervación simpática, "midriasis"); éste aumenta su tono en respuesta a una actividad del sistema nervioso simpático. Existen dos mecanismos neurales principales para la dilatación de la pupila: uno incluye la contracción del músculo radial dilatador, que es inervado por las fibras simpáticas (tradicionalmente conocido como dilatación refleja "activa"); otro opera mediante la inhibición de la actividad del núcleo de Edinger-Westphal (tradicionalmente conocido como dilatación refleja "pasiva").

La medición de áreas pupilares (AP) ha sido utilizada para diagnosticar disfunciones a nivel del SNA. Para el diagnóstico de patologías tales como la neuropatía diabética (figura 7) se han utilizado la pupilometría fotográfica y de televisión.

Otros factores que influyen en el tamaño de la pupila son: alerta, emociones, acomodación y edad (las pupilas son más grandes en la adolescencia, posteriormente son progresivamente menores).⁹

Como resultado bajo condiciones constantes de iluminación, hay una variación significativa del *hippus* y de persona a persona. El tamaño y la reactividad de la pupila están controlados por el SNA, ejerciendo el parasimpático un papel preponderante debido a la superioridad mecánica del músculo constrictor del iris. La respuesta pupilar es bilateral y simétrica, aunque la entrada de luz sea asimétrica.

El estudio de la función pupilar forma parte de la evaluación oftalmológica de rutina. Los problemas clínicos más fácilmente detectables son: la anisocoria (diferencia de tamaño entre las pupilas) y la reducción de la respuesta pupilar a la luz.¹⁰

En la práctica, alguna alteración en la pupila rara vez tiene un impacto importante en la visión, sin embargo, el examen de la misma es importante, ya que alguna anomalía puede ser signo de una disfunción ocular o sistémica.

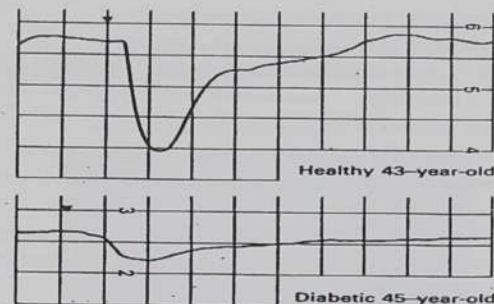


Figura 7. Respuesta pupilar de un sujeto sano y uno diabético (*Autonomic failure*, Mathias C, Oxford University Press, 2000).

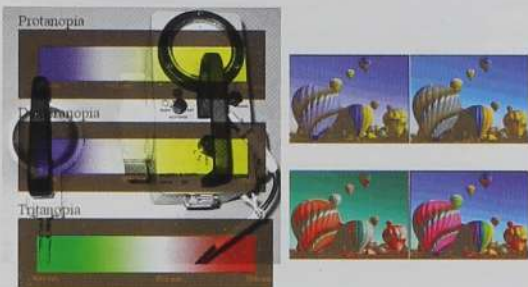


Figura 8. Espectro visual correspondiente a cada una de las tres deficiencias cromáticas principales y un ejemplo de cómo observarían los sujetos con y sin dichas deficiencias.

La retina es la membrana más interna del ojo, delgada y transparente; contiene aproximadamente 125 millones de bastones y de 7 a 8 millones de conos. A diferencia de los bastones, que forman un solo tipo morfológico y funcional de fotorreceptor, existen tres tipos de conos (visión tricromática): rojos, verdes y azules.

La sensibilidad al color no es uniforme en toda la superficie de la retina. La parte central de la fovea es ciega con respecto al azul, mientras que la sensibilidad al rojo y el verde está limitada a un área de aproximadamente 20 a 30 grados alrededor de la fovea. El amarillo y el azul pueden ser discriminados desde 40 a 60 grados fuera de la fovea. Existen experimentos para probar que la gente es totalmente ciega al color en la lejana periferia de la retina.

La sensación de los colores está a cargo de los conos. La teoría más aceptada (Young-Helmholtz), la tricrómica, explica los tres tipos de receptores para los colores principales: rojo, verde y azul.¹⁵⁻¹⁶ Las alteraciones de alguno o de todos producen anomalías o falta de visión de los colores (figura 8). Pueden ser *acromatopsias* (falta de visión de los colores) o *discoloratopsias* (ceguera parcial a los colores); por ejemplo, protánopes (al rojo), deuteránopes (al verde) y tritánopes (al azul). Y son *congénitas* (rojo/verde o daltonismo) o *adquiridas* (por lo

general no se percibe el azul/amarillo). La discriminación cromática tiende a mejorar y perfeccionarse durante la adolescencia y a deteriorarse con la edad.^{1,10,11}

Las pruebas de los colores son usadas para identificar y distinguir deficiencias adquiridas y hereditarias, y también en la selección del personal para un puesto que requiere buena visión del color.^{3,4}

El estado del arte de la visión cromática es totalmente subjetivo y escaso, además de que su principio de análisis no ha sido modificado desde sus inicios (1917).

Las personas que a lo largo de su vida han tenido una visión normal de los colores pierden esta capacidad en un grado muy variable debido a varias enfermedades que afectan a la retina, el nervio óptico o la corteza cerebral del lóbulo occipital del cerebro. Estas enfermedades se pueden clasificar en dos grandes grupos:¹²

- Infecciosas: afectan principalmente al mecanismo receptor (cono-bastón); muestran al principio una disminución en la discriminación azul-amarillo.
- No infecciosas: afectan la visión de los colores, además de asociarse con una pérdida de la visión de las formas.

De las enfermedades no infecciosas podemos resaltar que estos defectos aparecen en muchas enfermedades retinianas y del nervio óptico, como la *degeneración macular*, la *ambliopía tóxica*, el *glaucoma crónico* y la *retinopatía diabética*.

La incidencia de la diabetes mellitus (DM), que causa cada año la muerte de 3.2 millones de personas en el mundo, se incrementará hasta llegar a afectar a 350 millones de ciudadanos en el año 2025, si la población no cambia los hábitos de vida que conducen al sobrepeso y la obesidad (de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud).

Entre los trastornos oculares que genera la DM figuran los trastornos de refracción, párpados, conjuntivas y cornea, iris, pupila, cuerpo ciliar, cristalino, cambios en la presión ocular, alteraciones del vítreo y alteraciones neuro-oftalmológicas.

Algunas de las alteraciones oculares en personas que padecen DM se manifiestan en la *visión de los colores* (amarillo-azul y azul-verde), incremento de la *latencia*, la *deformación* y el *tamaño pupilar*, alteración de la *presión intraocular* y *sistema nervioso*.¹²⁻¹⁶

El estudio del comportamiento pupilar a la luz y a la acomodación ha sido utilizado ampliamente como un punto de referencia del estado en el que se encuentra el SNA, tanto en su porción periférica como central.

Es por ello que la evaluación de la pupila constituye una importante puerta de entrada al diagnóstico médico. La función del iris y su respuesta a la luz en el

hombre ha sido de gran interés para fisiólogos y neurólogos, quienes quieren establecer las vías neuronales involucradas en el control de la pupila. La función de este mecanismo fue principalmente ajustar la iluminación retiniana de acuerdo con los cambios en la luz ambiental. Muchos estudios clínicos neuro-oftalmológicos y farmacológicos han establecido la utilidad de la pupila en el diagnóstico de lesiones de la vía visual y el funcionamiento normal de la retina.¹⁷

Finalmente, el desarrollo de esta metodología instrumental capaz de estudiar las respuestas pupilares a los colores permitirá llevar a cabo evaluaciones cuantitativas de patologías asociadas con la percepción visual cromática, tales como la DM, así como el efecto de la exposición prolongada al plomo.

Metodología

Se propone una metodología instrumental objetiva para analizar las RPC debidas a estímulos de diferente color, en sujetos con visión normal a los colores (GC), en sujetos expuestos a plomo (GEP) y en pacientes con diabetes mellitus (GDM) diagnosticada.

Para el análisis de las RPC se diseñó, construyó e implementó el pupilocromatógrafo (PPC). Mediante los cambios de área pupilar se analizan de manera directa y objetiva las RP debidas a estímulos cromáticos involucrados en el proceso de contracción y dilatación.^{18,19}

La metodología se divide en tres etapas: *software*, estudio y procesamiento de las RP.

Pupilocromatógrafo

Está constituido por tres secciones (ver figura 9):

- Sección del especialista: formada por una PC, encargada de desplegar los diferentes estímulos cromáticos, y un monitor de referencia para observar el ojo del sujeto durante el estudio.
- Sección del sujeto bajo estudio: un monitor de estimulación LG Flatron de 17 pulgadas, modelo AMLG021 previamente caracterizado en su luminancia, colocado a 30 cm del ojo del sujeto y un soporte oftalmológico para mantener fija la cabeza del sujeto durante el estudio.
- Sistema de video-oculografía (video grabadora y cámara de video): compartido en ambas secciones para registrar las RPC en video y posteriormente analizarlas.

Software

Para determinar la estimulación óptima que permita una mejor y contrastada respuesta pupilar con fines de diagnóstico en la percepción visual a los colores, se diseñó el programa de estimulación PG20. El programa

Otros factores que influyen en el tamaño de la pupila son: alerta, emociones, acomodación y edad (las pupilas son más grandes en la adolescencia; después son progresivamente menores).

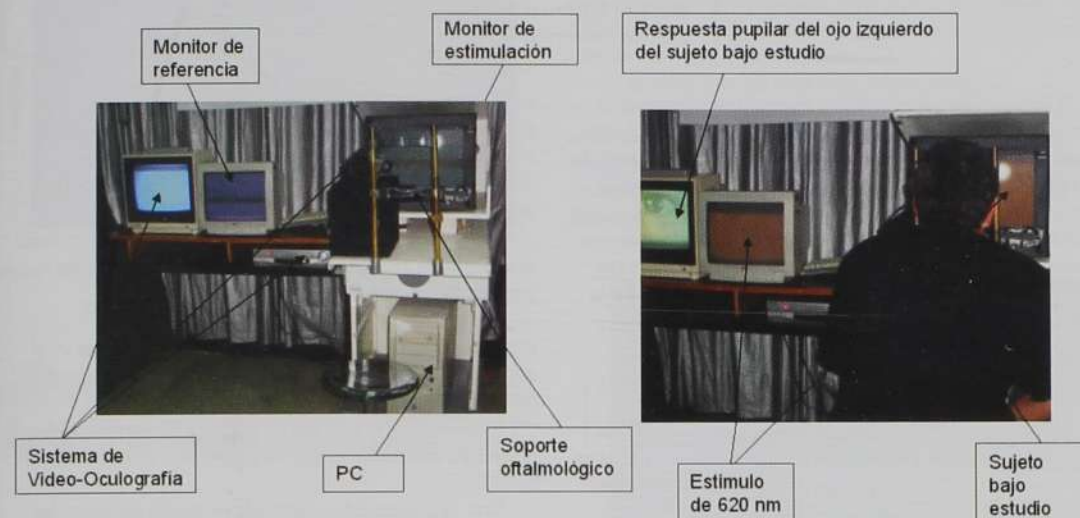


Figura 9. Sistema de análisis de la respuesta pupilar cromática.

dura 12 minutos; se despliegan 26 diferentes pantallas de un color específico durante 6 segundos, intercaladas por pantallas negras de 20 segundos. Los estímulos inician en 400 nm y se incrementan de 10 nm en 10 nm hasta llegar a 650 nm. De este modo se abarca todo el espectro visible (figura 10).

Caracterización del software PG20

El monitor de estimulación se calibró tanto en luminancia (figura 11) como en λ (figura 12); para ello se utilizó un fotómetro Light Gauge Coherent modelo IL1400 y el espectrómetro de luminancia Perkin Elmer modelo LS50B, respectivamente. La luminancia del monitor es semejante a la curva de sensibilidad relativa (figura 4).

Valoración previa de la visión cromática

Antes de presentar los diferentes estímulos cromáticos a los sujetos bajo estudio se les presentaron las cartas de Ishihara para determinar su visión a los colores. Éstas son subjetivas, ya que según su visión del color el sujeto debe decir qué número o figura observa y de qué color, mientras que nuestro método, al estar basado en las RP adquiridas por VOG, se transforma en una metodología completamente objetiva.

Estudio

Se requiere tener un ambiente controlado, puesto que el estudio debe realizarse en un cuarto oscuro. Es indispensable la adaptación previa del sujeto bajo estudio; de este modo, sus conos (encargados de la visión del color) responden exclusivamente a los colores con que están siendo estimulados, ya sea con una contracción (colores claros) o una dilatación (colores oscuros).

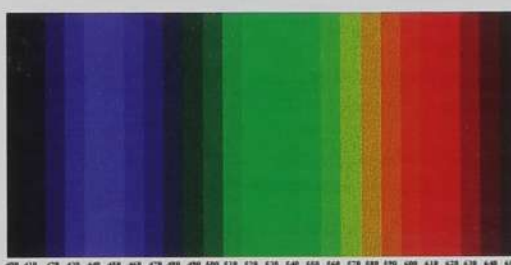


Figura 10. Estímulos visuales desplegados por el software PG20.

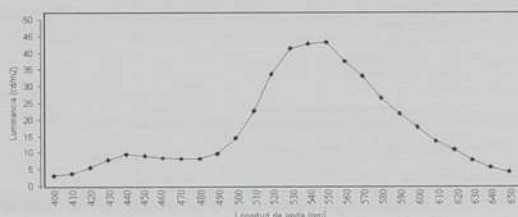


Figura 11. Luminancia del monitor caracterizado en las diferentes λ de estimulación de 400 nm a 650 nm.

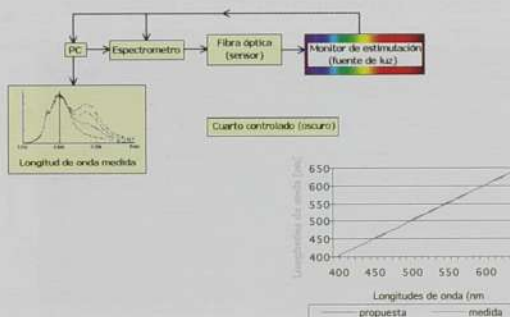


Figura 12. Caracterización de la λ desplegada por el monitor de estimulación.

Con metodologías no invasivas es posible evaluar la conducta de la respuesta pupilar durante el proceso de rehabilitación o el efecto farmacológico de un medicamento específico o, simplemente, observar el daño degenerativo.

El sujeto bajo estudio únicamente debe observar la pantalla de estimulación sin decir qué color ve. De este modo se registran las RP correspondientes a cada uno de los colores, a través del reflejo consensual de forma *no invasiva*. Estas imágenes posteriormente son procesadas y analizadas para determinar las variaciones pupilares en estado estable y así calcular la latencia (L), el diámetro (DP) y AP, el porcentaje de dilatación pupilar (%DP) y la iluminación retiniana (IR) debidos a los estímulos presentados.

Procesamiento de las RPC

En el procesamiento de las imágenes se analiza cada una de las RPC debidas a las diferentes λ . El diámetro pupilar se mide a lo largo de los 6 segundos (180 cuadros/s de video). Por cada paciente se analizan 4 680 imágenes correspondientes a los 26 estímulos presentados.

Resultados

Se han realizado 123 estudios en colaboración con diferentes voluntarios (tabla I).

Tabla I. Grupo de sujetos incluidos en el estudio de percepción cromática

Procedencia	GC	GD	GEP
Cinvestav-IPN, unidad D.F.	16		
Aleaciones metalúrgicas			
S.A. de C.V., León, Guanajuato			33
Fundación Conde de Valenciana, México, D.F.		24	
Cámara de diputados, México, D.F.	9		
Cinvestav-IPN, unidad Saltillo.	19	1	
Hospital Regional 1° de octubre ISSSTE, D.F.		21	
Total (123)	44	46	33

Todos los sujetos y pacientes que han participado en este protocolo son voluntarios. Con la finalidad de catalogar a los sujetos, ordenarlos y conocer sus antecedentes médicos y familiares, éstos fueron entrevistados previamente al estudio. De este modo estamos enterados de la salud y/o grado de deterioro de su visión.

- De los 123 sujetos analizados, 74 son hombres (13-72 años) y 49 mujeres (23-83 años).
- GC: 44 sujetos, 19 mujeres y 25 hombres.
- GD: 46 pacientes, 26 mujeres y 20 hombres (5 meses a 35 años de diagnóstico).
- GEP: 33 sujetos, 4 mujeres y 29 hombres (una semana a 11 años de exposición).

Análisis de los resultados

Una vez capturadas las imágenes correspondientes a cada uno de los estímulos cromáticos, se mide el diámetro pupilar (DP) en milímetros de cada una de ellas.

Considerando a la pupila como una circunferencia, se calcula su área (AP) y el porcentaje de dilatación pupilar (%DP) con base en su AP máxima.

Por otro lado, la iluminación retiniana (IR) representa la cantidad de luz que entra al ojo, la cual depende de qué tan dilatada o contraída está la pupila, así como de la luminancia del estímulo.

Finalmente, se calculó la latencia (L) correspondiente al tiempo que tarda el ojo en responder a un estímulo visual.

Una vez calculadas todas las variables de todos los sujetos analizados se tienen las gráficas promedio correspondientes a los DP, AP, %DP, IR y L.

Para graficar estas variables se consideraron las RPC en estado estable, es decir, una vez que se presentaron la latencia y el tiempo transitorio, a partir del segundo 3 correspondiente a 90 cuadros de video después del estímulo.

De acuerdo con lo esperado, los promedios de la mayoría de los grupos muestran una contracción en los colores claros y una dilatación en los colores oscuros, es decir, responde adecuadamente a los cambios de contraste.

Por otro lado, el tamaño de la pupila depende en gran medida del género y la edad de sujeto; ésta presenta crecimiento hasta los 15 años y decrece de forma continua durante el proceso de envejecimiento.

Con base en lo anterior se tiene el siguiente análisis para cada una de las variables incluidas en esta metodología.

Diámetro pupilar

El DP es una variable muy importante porque en ésta se observa el tamaño de la pupila, así como la forma que presenta. En los grupos GC y GEP se observa una pupila circular, mientras que en el GD se observa, en algunos casos, una pupila ovalada, lo cual podría deberse a una afección a nivel SNA, ya que al estar dañado no actúa de forma uniforme el esfínter de la pupila para contraerla adecuadamente.

En la figura 13 se observa el DP promedio de los tres grupos bajo estudio, mientras que en la tabla II se presentan las variaciones máximas y mínimas de DP y la λ donde se presentaron.

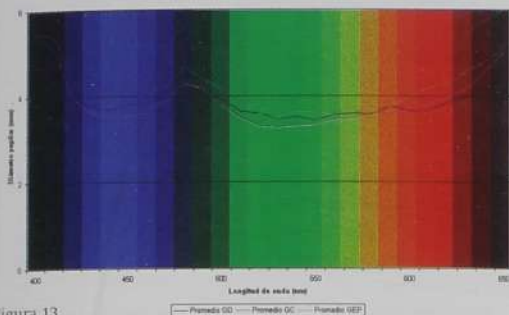


Figura 13.

Tabla II. Variaciones de DP por grupo
(valores en mm)

Grupo	Mínima	Máxima
GC	3.26 (530 nm)	5.48 (400 nm)
GD	3.42 (550 nm)	4.44 (400 nm)
GEP	3.50 (530 nm)	5.65 (400 nm)

Área pupilar

El AP, al igual que el DP, muestra el comportamiento de la pupila a cada uno de los estímulos aplicados.

En el GC se observan cambios de área muy marcados al pasar de un color a otro, mientras que en el GD se aprecian cambios muy pequeños, es decir, la reacción de su pupila es muy pequeña a los cambios tan marcados de contraste (pantalla negra a pantalla de color). Esto es porque se da un cambio gradual de una pantalla oscura a una de color oscuro, mientras que de una pantalla oscura a una clara se tiene un cambio de contraste muy grande, lo que genera una RP rápida. Este comportamiento se observa en todas las edades (figura 14).

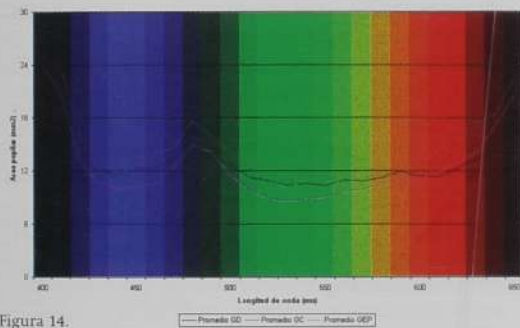


Figura 14.

En la tabla III. Se presentan las variaciones máximas y mínimas de las AP así como las λ donde ocurrieron.

Tabla III. Variaciones de AP por grupo
(valores en mm²)

Grupo	Mínima	Máxima
GC	8.57 (530 nm)	24.11 (400 nm)
GD	9.73 (550 nm)	15.72 (400 nm)
GEP	10.05 (530 nm)	25.99 (400 nm)

Porcentaje de dilatación pupilar

Esta variable se utiliza para determinar el grado de dilatación o contracción de la pupila generado por cada uno de los colores de estimulación.

Se aprecia que las máximas dilataciones se encuentran en los colores oscuros y que las máximas contracciones se dan en los colores más claros; su dilatación máxima se da en todas las edades por arriba de 70% y la mínima por arriba de 20% del tamaño de su pupila (figura 15).

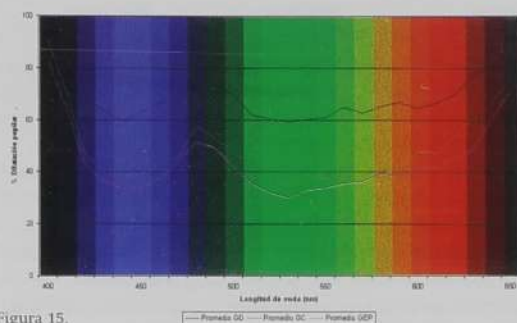


Figura 15.

La tabla IV muestra los valores máximos de %DP, así como el color donde ocurrieron.

Tabla IV. Variaciones de %DP por grupo
(valores en porcentaje)

Grupo	Mínima	Máxima
GC	30.08 (530 nm)	83.20(400 nm)
GD	60.98 (550 nm)	92.08(400 nm)
GEP	34.96 (530 nm)	93.35(400 nm)

Iluminación retiniana

La IR determina, de acuerdo con la apertura de la pupila, la cantidad de iluminación que entra al ojo; a mayor AP se tiene mayor IR y, por lo tanto, menor contracción. En los colores claros se aprecia una mayor IR, ya que los estímulos son más luminosos, la cual disminuye gradualmente en los colores oscuros (figura 16).

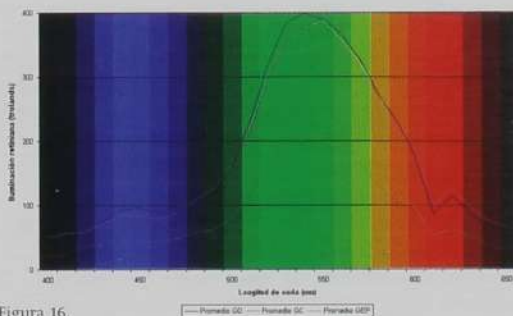


Figura 16.

La tabla V muestra los valores máximos de IR, así como el color donde se presentaron.

Tabla V. Variaciones de IR por grupo
(valores en trolands)

Grupo	Mínima	Máxima
GC	51.14 (530 nm)	388.84 (400 nm)
GD	35.43 (550 nm)	446.43 (400 nm)
GEP	55.19 (530 nm)	469.13 (400 nm)

Latencia

En cuanto a la latencia, se tiene que a la mayoría de los sujetos les toma prácticamente el mismo tiempo responder a los diferentes estímulos presentados, tardándose más tiempo en responder a los colores oscuros que a los claros. También se observa una respuesta diferente en el GD, ya que presenta una L mayor a los 600 ms, mientras que el resto presenta un promedio de 250 ms en prácticamente todo el espectro (figura 17).

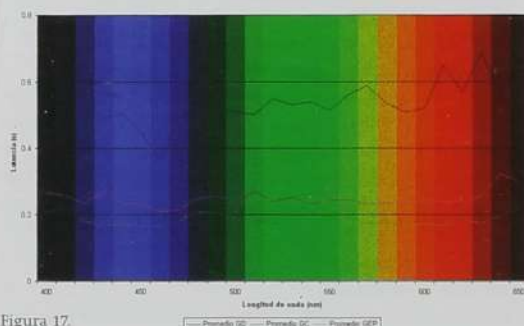


Figura 17.

La tabla VI muestra las variaciones máximas y mínimas de L de los tres grupos, al igual que las λ donde se manifestaron.

Tabla VI. Variaciones de L por grupo
(valores en segundos)

Grupo	Mínima	Máxima
GC	0.24 (530 nm)	0.35 (400 nm)
GD	0.45 (550 nm)	0.91 (400 nm)
GEP	0.19 (530 nm)	0.25 (400 nm)

Discusión y conclusión

Para algunas patologías oculares es indispensable medir la RP; la mayoría de las pruebas existentes para medirla son subjetivas, ya que sólo determinan el reflejo pupilar a la luz. De igual modo, hay muchas patologías tanto oculares como sistémicas que afectan

la RPC; algunas de ellas son el daltonismo, glaucoma, cataratas, diabetes mellitus, hipertensión, sífilis, esclerosis múltiple, alcoholismo, desnutrición, efectos secundarios a medicamentos, envenenamiento tóxico, etcétera.

Actualmente se ha incrementado el uso de las RP en el diagnóstico de lesiones de la vía visual y el funcionamiento normal de la retina. Del mismo modo, la RP ha sido usada en clínica en estudios neurooftalmológicos, así como los efectos secundarios causados por fármacos.

Los métodos actuales para determinar las respuestas cromáticas son totalmente subjetivos, es decir, dependen de la percepción del sujeto bajo estudio.

Con la metodología objetiva propuesta es posible determinar la respuesta pupilar no sólo para la luz, sino también para los colores.

Con esta metodología no invasiva es posible determinar cuantitativamente la RP de acuerdo con la edad, el género y los estímulos cromáticos. Del mismo modo, con esta metodología será posible evaluar la conducta de la respuesta pupilar durante el proceso de rehabilitación o el efecto farmacológico de un medicamento específico o, simplemente, observar el daño degenerativo.

El comportamiento de la RP es semejante en los tres grupos bajo estudio (GC, GEP, GDM), aunque existen diferencias notorias en algunas variables.

Se observó que las RPC dependen en cierto grado de la edad, el género y las características del estímulo (longitud de onda y luminancia).

En forma general, la RPC puede dividirse en tres etapas:

- Una vez que se observa el estímulo cromático, la pupila se contrae; esto ocurre entre los 100 y 300 ms después de presentarse el estímulo (respuesta transitoria).
- Inmediatamente después, la pupila empieza a dilatarse hasta llegar a un estado estacionario con variaciones mínimas (alrededor de los 3s).
- A partir de este punto, la pupila presenta una contracción casi constante hasta terminar el despliegue del estímulo (respuesta estable).

La respuesta pupilar a las pantallas negras se caracteriza por la dilatación creciente hasta llegar prácticamente a 100%, una vez transcurridos los 20s.

Respuesta pupilar en los sujetos normales

Todos los sujetos estimulados presentaron una contracción pupilar al ser estimulados con colores claros y

Mediante los cambios de área pupilar se analizan de manera directa y objetiva las respuestas pupilares debidas a estímulos cromáticos que se involucran en el proceso de contracción y dilatación.

una dilatación al ser estimulados con colores oscuros. Su tiempo de latencia se presentó alrededor de los 300 ms.

Respuesta pupilar en los sujetos expuestos a plomo

Todos los sujetos estimulados presentaron una contracción pupilar al ser estimulados con colores claros y con una dilatación al ser estimulados con colores oscuros. Su tiempo de latencia se presentó alrededor de los 200 ms. Algunos de los sujetos presentaron alteraciones en el espectro rojo.

Respuesta pupilar en los pacientes diabéticos

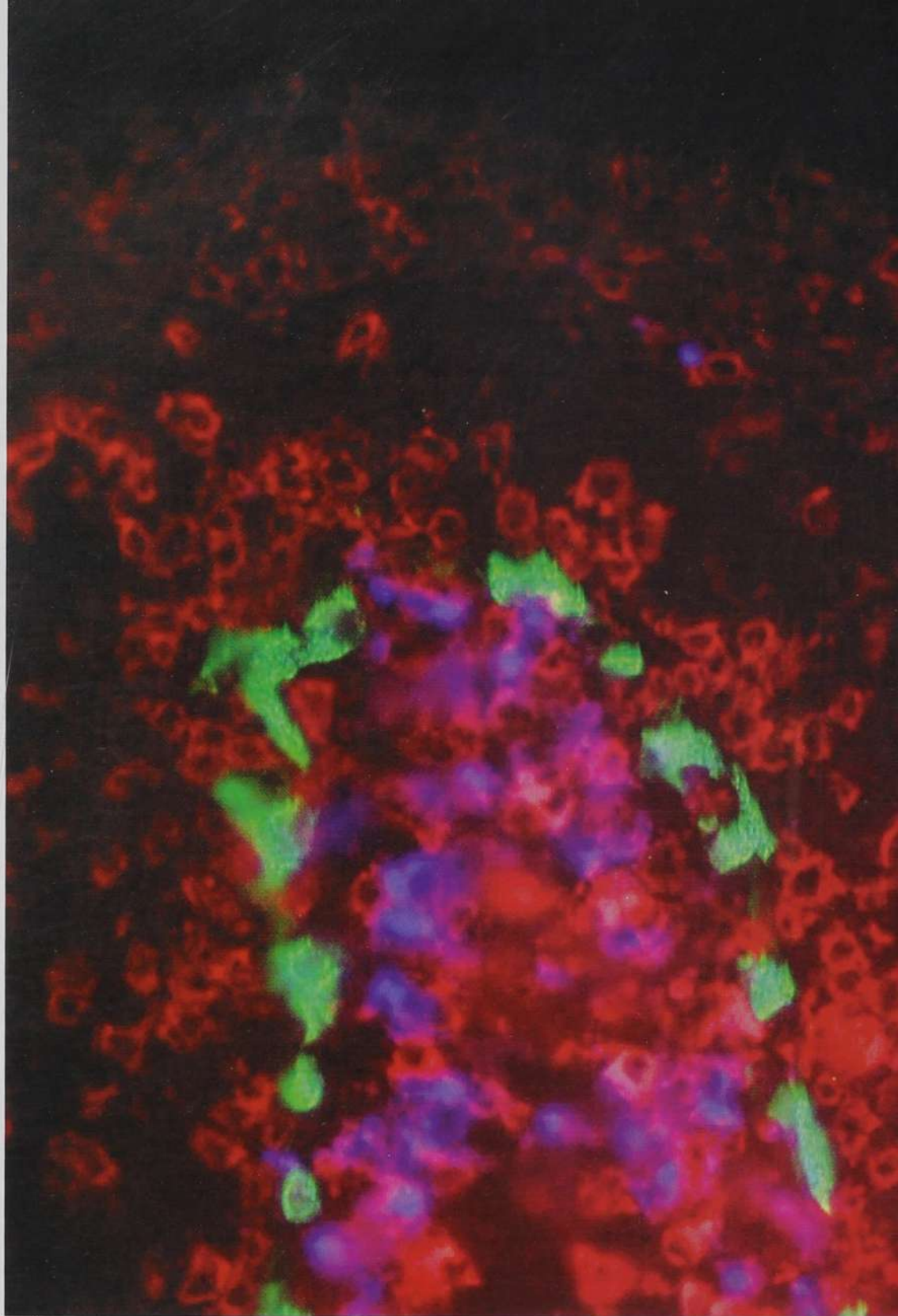
Al presentar los estímulos cromáticos claros, no siempre se presentó la contracción esperada, ni la dilatación en los estímulos oscuros o en las pantallas negras. Algunos pacientes presentaron una contracción constante en casi todo el espectro visible, es decir, su pupila se mantuvo del mismo tamaño en una parte o en todo el espectro visible. Otros presentaron cambios pupilares muy pequeños, es decir, no tuvieron una RP notoria a los cambios de contraste color/negro. El tiempo de respuesta al estímulo (latencia) en la mayoría de ellos se presentó entre 250 ms y 1 s, incluso hubo quienes presentaron una variación pupilar después de los 5 s. La mayoría de los sujetos respondió con alteraciones en el espectro azul.

Al analizar los resultados obtenidos de los sujetos diabéticos se observó que algunos de ellos presentan una respuesta casi lineal en todo el espectro; esta falta de reacción se debe a que el sistema nervioso está afectado por la DM, lo cual altera el proceso de dilatación/contracción pupilar. Esta patología característica de la DM es la neuropatía autonómica diabética (NAD); para que un paciente diabético sea diagnosticado con NAD debe ser sometido a una serie de estudios, una vez que el paciente presenta un cuadro de múltiples padecimientos crónicos. Es decir, el paciente debe primero sufrir por meses o años hasta que los síntomas se manifiesten.

A partir de comentarios realizados por los especialistas, con esta metodología es posible determinar de modo temprano si un paciente diabético es propenso a padecer una NAD; así se ofrece una mejor calidad de vida al paciente, ya que se trataría de modo temprano con medicamentos y terapias, evitando y/o retrasando los múltiples padecimientos crónicos típicos de la DM. Utilizar esta metodología no implica que el paciente no padecerá la NAD; únicamente servirá para retrasarla (mediante algún tratamiento preventivo) y, como ya se mencionó, para brindarle una mejor calidad de vida. ●

[Referencias]

- Malacara, D. *Color vision and colorimetry, theory and applications*. SPIE Press, 2002.
- Artigas, J.M., Capilla P., Felipe, A., Pujol, J. *Optica fisiológica. Psicofísica de la visión*. McGraw Hill, México, 1995.
- Ishihara, T. *Test for colour blindness*. Kanehara and Co. Tokio, 1925.
- Farnsworth, T. Color disks for color abnormalities. *J Opt Soc Amer.* 33:568-590, 1943.
- Pupil abnormalities. Module 2, Part 4, april 2000. www.optometry.co.uk
- Yamaji, K., Hirata, Y. y Usui, S. The pupil as a possible monitor of the autonomic nerve system. Proceedings, 19th. International conference, IEEE/EMBS Oct 30 -Nov 2. Chicago, IL, USA, 1997.
- Kohn, M. y Clynes, M. Color dynamics of the pupil. *Annals New York Acad Sci.* 156: 931-950. 1969.
- Wyatt, H.J. The form of the human pupil. *Vision Research.* 35 (14): 2021-2036. 1995.
- Birren, J.E., Casperson, R.C. y Botwinik, J. Age changes in pupil size. *J. Gerontol.* 5: 216-221. 1950.
- Urbina Vicario, C. *Neurobiología de la visión*. Ediciones UPC. España, 1996.
- Werne, A. Spectral sensitivity of the pupillary system. *Clinical and Experimental Optometry.* 86 (4): 235-238. 2003.
- Foster, D. H. (ed.). Inherited and acquired colour vision deficiencies; fundamental aspects and clinical studies. En *Vision and visual dysfunction*. Vol. VII. Macmillan Press. EUA. p. 42. 1991.
- Hreidarsson, A.B., Gundersen, H.J. Reduced pupillary unrest, Autonomic nervous system abnormality in diabetes mellitus. *Diabetes.* 37 (4): 446-51. 1988.
- Karavanaki, K., Davies, A.G., Hunt, L.P., Morgan, M.H., Baum, J.D. Pupil size in diabetes. *Arch Dis Child.* 71 (6): 511-5. 1994.
- Straub, R.H., Jeron, A., Kerp, L. The pupillary light reflex. 2. Prevalence of pupillary autonomic neuropathy in diabetics using age-dependent and age-independent pupillary parameters. *Ophthalmologica.* 204 (3): 143-8. 1992.
- Cahill, M., Fustace, P. y de Jesus, V. Pupillary autonomic denervation with increasing duration of diabetes mellitus. *Br J Ophthalmol.* 85:1225-1230. 2001.
- Barbur, J.L. Learning from the pupil - studies of basic mechanisms and clinical applications. En *The Visual Neurosciences*. Vol. 1. Chalupa, L.M. y Werner, J.S. (eds.). Cambridge, MA. MIT Press. 2004.
- Rodríguez Guzmán, D., Zuñiga López, A. y Suaste Gómez, E. Respuestas pupilares a estímulos cromáticos en el espectro de 400 nm a 650 nm, en el estado estable. *Revista Mexicana de Física.* 51 (4): 365-370. 2005.
- Rodríguez, D. y Suaste, E. Dinámica pupilar en el espectro visible. *Revista Bioingeniería y Física Médica Cubana.* 7 (1). 2006.



Tinción inmunofluorescente de células de una vellosidad intestinal de cerdo adulto. En verde se muestran las células con marcador para MCH-II (células dendíticas y endotelio capilar); en rojo, los linfocitos CD3 y en azul (fuera de foco), células CD4.

Inmunobiología de las mucosas, un nuevo enfoque de la protección y la adaptación al medio de nuestro organismo

LA SORPRENDENTE DICOTOMÍA DE LA RESPUESTA INMUNE EN LA MUCOSA INTestinal, QUE PERMITE LA INDUCCIÓN DE TOLERANCIA A MOLÉCULAS INOCUAS (ALIMENTOS) Y LA EXCLUSIÓN INMUNE CONTRA LA FLORA NORMAL, ABRE UN INMENSO CAMPO DE ESTUDIO QUE DEBEMOS EXPLORAR EN LOS PRÓXIMOS AÑOS.

Marco Antonio Vega López

Nuestro cuerpo está protegido contra las infecciones y la aparición de células cancerosas por una serie de mecanismos de defensa inespecíficos (resistencia) y específicos (inmunidad), que conforman lo que conocemos como nuestro sistema inmune. Sus funciones principales son la *protección, la vigilancia y el mantenimiento de la homeostasis* del organismo. El conocimiento que tenemos de esas funciones proviene, principalmente, de los estudios realizados a partir de la inmunización intramuscular, que induce protección circulante (sistémica) por medio de anticuerpos séricos y de células citotóxicas, éstas últimas capaces de destruir células neoplásicas o infectadas por patógenos intracelulares. Paradójicamente, la inmunidad sistémica no protege, o lo hace de una manera muy ineficiente, a la piel y a las mucosas, que son las principales superficies de contacto de nuestro cuerpo con el medio.

Las mucosas respiratoria y digestiva del organismo tienen, en conjunto, una superficie de casi 400 m²,

doscientas veces mayor que la de la piel. De ahí que sean el sitio de contacto más frecuente por donde los agentes patógenos se asientan o penetran produciendo neumonías y diarreas, que son las enfermedades más prevalentes en nuestro medio y la causa principal de mortalidad infantil e incapacidad transitoria de un gran número de adultos. En 2005 se reportaron a nuestro sistema de salud más de 36 millones de casos de enfermedades respiratorias e intestinales agudas (*Boletín de vigilancia epidemiológica*, semana 52, ene/1-7/06, SSA), lo que realza la importancia de esos sitios cuya defensa corre a cargo del sistema inmune de las mucosas. Éste forma parte de nuestro sistema inmune general pero tiene rasgos distintivos, que trataremos de abordar brevemente en este trabajo.

Particularidades de la inmunidad en las mucosas

La mayoría de nuestros conocimientos sobre inmunidad parte de 200 años de experiencia en vacunación

MARCO ANTONIO VEGA LÓPEZ Químico farmacéutico biólogo por la Universidad Nacional Autónoma de México. Doctor en Inmunología (Ph.D.) por la Universidad de Bristol (Reino Unido). Ha sido profesor visitante de la Vaccine and Infectious Disease Organization de la Universidad de Saskatchewan (Canadá); actualmente es profesor titular del Departamento de Patología Experimental del Cinvestav. Ha trabajado en desarrollo inmune, transferencia de inmunidad de la madre al recién nacido, inmunología del intestino delgado y del

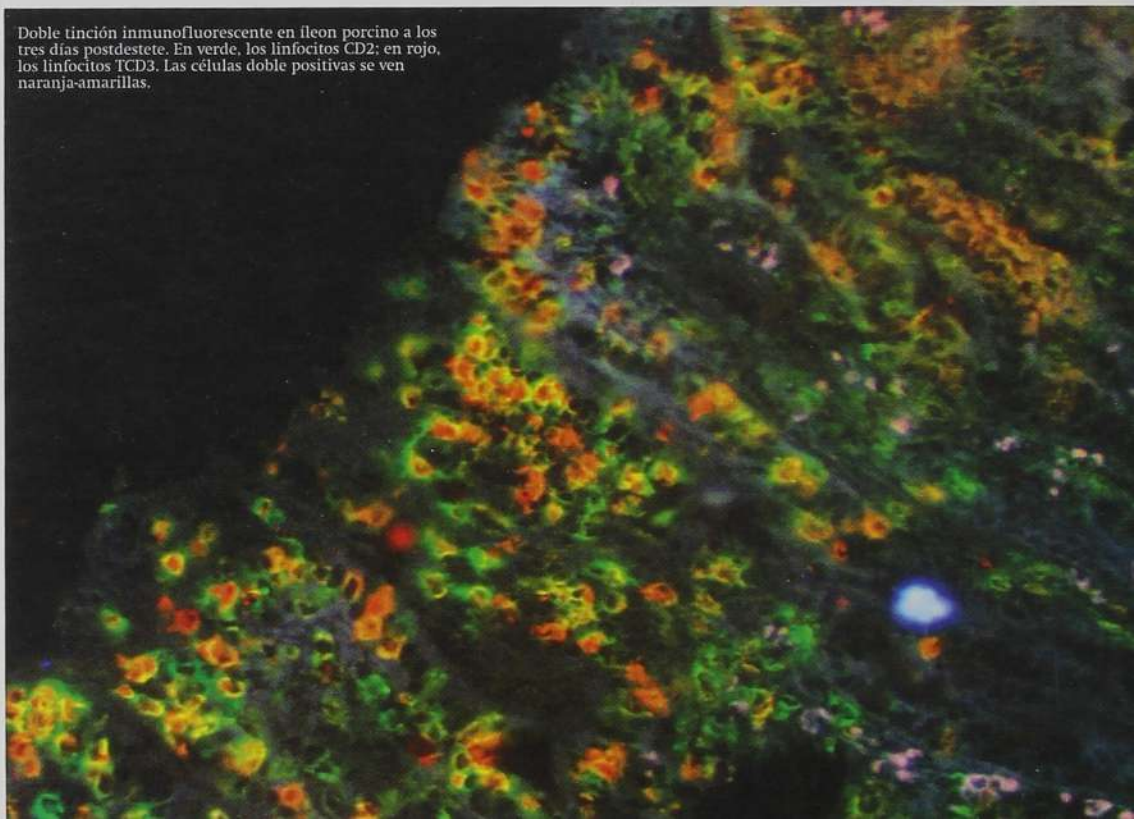
pulmón y desarrollo de protocolos de inmunización mucosal. Tiene 17 artículos publicados en revistas científicas. Ha participado en un centenar de congresos nacionales e internacionales y publicado 10 capítulos de libros. Ha dirigido 12 tesis de licenciatura y cuatro de postgrado. Ha recibido apoyos nacionales e internacionales para sus investigaciones. Recibió la medalla al "Mérito Universitario" de la UNAM. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores desde 1992. mavega@cinvestav.mx

intramuscular exitosa, lo que nos ha brindado un panorama bastante claro de cómo actúa el sistema inmune ante una infección dentro del organismo. Los mecanismos de resistencia (inflamación, complemento, fagocitosis) trabajan de manera coordinada con el sistema inmune para detectar, confinar, destruir, eliminar y reparar el daño causado por microorganismos, parásitos, virus y células propias aberrantes, y lo hace a través de una *inmunidad esterilizante* que genera memoria. En contraste con lo que ocurre dentro de nuestro organismo (por ejemplo, en el bazo, el hígado o el riñón, donde es intolerable la presencia de agentes extraños o células transformadas), en las mucosas, por ser una interfase entre el interior y el exterior de nuestro cuerpo, normalmente se encuentran grandes cantidades de moléculas extrañas y microorganismos. Así, el sistema inmune de las mucosas debe inducir: a) una respuesta especializada que genere tolerancia o no reacción contra las moléculas benéficas; b) una respuesta inmune no esterilizante para la flora normal, y c) una inmunidad esterilizante contra los patógenos. Esta triple función determina las diferencias principales entre el sistema inmune interno y el de las mucosas, por lo que las funciones principales del sistema inmune de las mucosas son la *inducción de tolerancia, la adaptación al medio y la protección*.

Aunque existen antecedentes remotos ¹, el estudio sistemático de la inmunología de las mucosas tiene apenas unos veinticinco años de desarrollo. A pesar de

que ha habido avances importantes, en la actualidad aún se desconoce la exacta anatomía inmune de las mucosas, su cinética de desarrollo y maduración con la edad, y la regulación inmune en esos sitios, temas que hemos abordado en nuestro trabajo de investigación de los últimos quince años. Este retraso en su progreso se debe, en parte, a la tendencia de seguir las pautas descritas en la inmunidad sistémica para estudiar la inmunidad de las mucosas. Un ejemplo ilustrativo ha sido el intento, la mayoría de las veces fallido, de inducir respuesta inmune mucosal por la vía oral, tratando de imitar los esquemas de vacunación parenteral y, más aún, evaluando la inmunidad inducida, no en la mucosa, sino en el suero sanguíneo! La inducción de tolerancia contra el antígeno ²⁻⁴, en vez de respuesta inmune, seguramente fue el resultado de muchos de esos intentos tempranos, lo que contribuyó a considerar erróneamente que la respuesta inmune gastrointestinal era "de corto plazo", "de poca eficacia" y que "no generaba memoria". Sin embargo, gracias a esa inducción de tolerancia podemos ingerir cantidades importantes de alimentos (todos conformados de moléculas extrañas y antigénicas) sin producir una respuesta inmune contra ellos. Más aún, la inducción de tolerancia por la vía de las mucosas podría ser una esperanza terapéutica racional para los cada vez más abundantes casos de autoinmunidad e hipersensibilidad en nuestro mundo industrializado. De manera similar, nuestra respuesta hacia la flora normal de las mucosas

Doble tinción inmunofluorescente en fleon porcino a los tres días postdestete. En verde, los linfocitos CD2; en rojo, los linfocitos TCD3. Las células doble positivas se ven naranja-amarillas.



está acotada, es decir, el sistema inmune de las mucosas sólo reacciona lo suficiente para evitar su entrada al organismo, sin destruirla o eliminarla ⁵, y lo hace a través de un mecanismo llamado *exclusión inmune*, mediado por anticuerpos de isotipo IgA. No obstante, ante la llegada de un patógeno y la liberación de sus productos se desencadena un proceso inflamatorio local y una respuesta inmune mucosal vigorosa que, en la mayoría de los casos, también produce inmunidad sistémica. Esta característica hace a la inmunización mucosal ideal para inducir ambos tipos de respuesta (local y sistémica) confiriendo una protección integral, como la que ocurre contra la poliomielitis cuando se emplea la vacuna Sabin (virus atenuado).

Sitios inductores y efectores

En la mucosa gastrointestinal existen sitios especiales para la estimulación de la respuesta inmune, llamados sitios inductores, y otros en donde se desarrolla la función inmune, denominados sitios efectores.

Las placas de Peyer (PP) intestinales son los *sitios inductores* reconocidos del tejido linfoide asociado al intestino (GALT por sus siglas en inglés). En el epitelio de esas placas existen células especializadas (células M) que se encargan de “muestrear” el contenido del tracto intestinal. Por debajo de ese epitelio se encuentran abundantes células dendríticas (DC), con capacidad fagocítica, que expresan en su superficie moléculas especiales, denominadas clase II del complejo principal de histocompatibilidad (MHC-II), que las capacita como células presentadoras de antígeno (APC). Después de captar los antígenos, esas células los procesan intracelularmente y migran hacia el interior de las PP para interactuar con los linfocitos T (células inductoras de la respuesta inmune) presentándoles esos antígenos, ya procesados en la molécula MHC-II, para iniciar la respuesta inmune. Una vez realizada la activación, los linfocitos T y los B (productores de los anticuerpos), específicos contra el antígeno (Ag), proliferan y abandonan el sitio inductor a través de la linfa llegando a los ganglios linfáticos regionales (mesentéricos). De ahí viajan a través de la sangre y llegan a las otras mucosas del organismo en un derrotero que les permitirá alcanzar sitios lejanos como la glándula mamaria y los tractos respiratorio y genitourinario. Finalmente, la mayoría de esas células llegan a la lámina propia (LP) intestinal a través de este mecanismo de recirculación de células, conocido como *ecotaxia* (*homing*), mediado por moléculas que se expresan en la superficie de los linfocitos mucosales y el endotelio alto de las vénulas sanguíneas de las mucosas. De esta

manera, al menos en teoría, las principales mucosas del organismo quedan protegidas contra un patógeno determinado a través del sistema inmune mucosal común (MALT) ⁷.

Las células activadas llegan a las mucosas para su diferenciación final y se convierten en células efectoras, ya sea células plasmáticas productoras de anticuerpos en el caso de los linfocitos B o células productoras de citocinas en el caso de los linfocitos T. Los lugares de la mucosa que alojan a las células efectoras y las de memoria se denominan *sitios efectores*. El tejido linfoide asociado a los bronquios (BALT) en el tracto respiratorio y la LP en el gastrointestinal son los sitios efectores reconocidos de esas mucosas. Ya que las células de memoria también se alojan en estos sitios, se les considera los lugares de recapitulación de la experiencia inmune del organismo; también se les ha llamado *órganos linfáticos terciarios*.

El sistema inmune gastrointestinal

La descripción anatómica del sistema inmune de las mucosas es un paso preliminar para la elucidación de su fisiología. Los estudios *in vivo* realizados en la mucosa intestinal han sido abundantes y detallados. Sin embargo, la descripción de la organización de las células del sistema inmune en la mucosa ha sido relativamente reciente ⁶.

Nuestros estudios han demostrado que en la LP del intestino porcino (y ocurre algo similar en casi todas las especies) las células del sistema inmune se organizan en nichos particulares, lo que indica que la estructura está directamente relacionada con la función ⁶. Existen cuatro compartimientos principales en la mucosa intestinal: el epitelio, la LP de las vellosidades y de las criptas, y la submucosa (figura 1). En cada uno de ellos se alojan varios tipos de células de manera característica. En el epitelio es posible detectar una gran cantidad de linfocitos, llamados por esta razón *intraepiteliales* (IEL); la mayoría tiene fenotipo CD2+CD4-CD8-, con una importante heterogeneidad morfológica y posiblemente también funcional ⁸. Se han detectado cambios en la frecuencia (células/mm de epitelio) de IEL en infecciones ⁹⁻¹², lo que podría representar un índice de la reacción inmune al estímulo antigénico y el preludio de la regulación de la reacción correspondiente. Se postula que la mayoría de esas células está conformada por linfocitos NK (*natural killer*) citotóxicos, colocados estratégicamente para la defensa contra células infectadas por agentes patógenos intracelulares, pero también podrían ser células centinela, productoras de citocinas tempranas de perfil

Paradójicamente, la inmunidad sistémica no protege, o lo hace de una manera muy ineficiente, a la piel y a las mucosas, que son las principales superficies de contacto de nuestro cuerpo con el medio.

Distribución de células en el intestino delgado

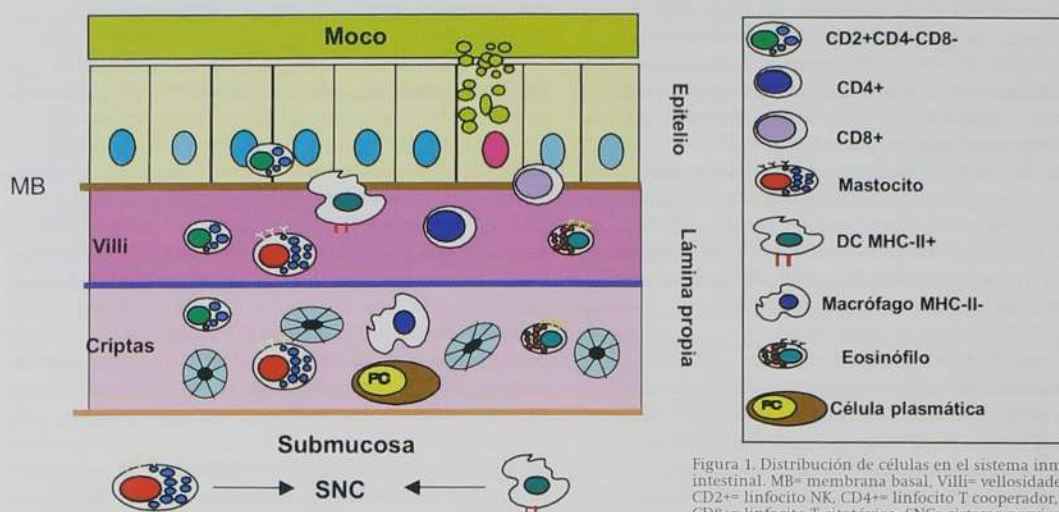


Figura 1. Distribución de células en el sistema inmune intestinal. MB= membrana basal, Villi= vellosidades, CD2+= linfocito NK, CD4+= linfocito T cooperador, CD8+= linfocito T citotóxico, SNC= sistema nervioso central, DC= célula dendrítica.^{6, 8}

TH1 (IL-2, IFN- γ) que modulan la respuesta inmune citotóxica local.

En la zona de la membrana basal del epitelio del intestino delgado se encuentran DC que expresan fuertemente la molécula MHC-II y linfocitos T CD8+ (citotóxicos), que también podrían generar una respuesta inmune contra células infectadas intracelularmente. Un poco más adentro de la LP de las vellosidades se encuentran principalmente los linfocitos T CD4+ (cooperadores) que, al activarse con el antígeno presentado por las DC, secretan citocinas del perfil TH2 (IL-4, IL-5, IL-10) para la proliferación y diferenciación de los linfocitos B, que producen anticuerpos de isotipo IgA principalmente. En la LP también se encuentran numerosos mastocitos y eosinófilos; al contacto con el antígeno, éstos también son capaces de liberar citocinas del perfil TH2, además de desempeñar su conocido papel en el proceso inflamatorio.

Las vellosidades constituyen la zona de absorción del intestino, así que la presencia de todo el equipo inmune para reconocer antígenos (APC, linfocitos cooperadores y citotóxicos) parece lógica y oportuna. En cambio, en las criptas intestinales se tiene la zona secretora de agua y enzimas para la digestión y es ahí donde se encuentra un gran número de células plasmáticas (PC) productoras de anticuerpos (Abs), que son secretados a la luz intestinal a través de las glándulas de Brünner. También se encuentran en ese sitio macrófagos "carroñeros"

(scavenger), que no expresan MHC-II y que realizan labores de limpieza de células envejecidas y apoptóticas⁶. Asimismo, en esa zona hay abundantes mastocitos y eosinófilos, seguramente implicados en la defensa inflamatoria del intestino^{13, 14}. Finalmente, en la submucosa intestinal hay mastocitos y DC en número variable que podrían tener un papel en el eje neuroinmunoendocrinológico (figura 1).

Maduración inmune

Nuestros estudios de cinética de maduración postnatal en la mucosa intestinal demostraron que el arreglo arquitectónico de las células del tejido de adulto no se alcanza antes de las 8 semanas de vida en el modelo porcino^{6, 8, 15}.

Al nacimiento, la LP intestinal tiene células de linaje linfóide CD2+ (células NK) y en el caso de los IEL, pronto representan más de la mitad del total de células linfoides en el intestino, lo que sugiere que tienen un papel importante en la fisiología y regulación inmune del órgano¹⁶. La aparición de otras subpoblaciones en la mucosa también es rápida y a las tres semanas de vida ya es posible encontrar linfocitos T CD4+, mientras que los linfocitos T CD8+ arriban a la mucosa un poco después (figura 2). Eso podría explicar la alta susceptibilidad de los animales jóvenes a las infecciones en el periodo de la lactancia, misma que, se ha visto, se exagera en el destete, entre la tercera y quinta semanas

Las vellosidades constituyen la zona de absorción del intestino, así que la presencia de todo el equipo inmune para reconocer antígenos parece lógica y oportuna.

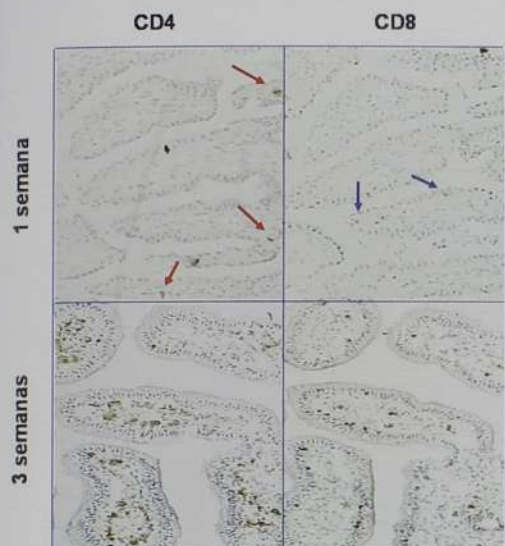


Figura 2. Desarrollo de subpoblaciones de linfocitos en el intestino delgado porcino. Cortes seriados congelados de animales de una y tres semanas de edad que fueron teñidos por inmunohistoquímica con anticuerpos monoclonales contra CD4 y CD8. A la semana de vida muy pocas células de ambos fenotipos están presentes (flechas). Las células CD4 son ya evidentes a las tres semanas de edad, sin embargo, las CD8 son escasas y sólo elevan su número hasta después del destete^{6,8}.

de edad. Este modelo reproduce con gran proximidad lo que ocurre en la mucosa gastrointestinal del humano, donde, por obvias razones, estos estudios son más difíciles de realizar.

Perspectivas

La investigación de la arquitectura del sistema inmune intestinal ha permitido profundizar el estudio y entendimiento de su fisiología. Todas las células del sistema inmune están presentes en la mucosa y sus

funciones *in vitro* aún no han sido adecuadamente evaluadas. El análisis del desarrollo de este sistema, desde el nacimiento hasta la etapa adulta, ha hecho evidente el aparente retraso en el arribo de ciertas subpoblaciones de células al intestino, lo que podría explicar la mayor susceptibilidad que los individuos jóvenes tienen hacia las infecciones. Sin embargo, ese aparente retraso también podría tener una función biológica que esté relacionada con la inducción de tolerancia y la adaptación del organismo a su nuevo ambiente. Por ello, los estudios del papel del microbismo ambiental y del calostro en la etapa neonatal, así como del efecto que los tratamientos con pro y prebióticos puedan tener en la estimulación del arribo de células inmunes en el intestino, son importantes para entender su compleja regulación, su papel en la inducción selectiva de tolerancia y su eficiencia en la detección de agentes nocivos para su pronta eliminación.

Conclusiones

La inmunología de las mucosas tiene diferencias significativas con la inmunidad sistémica a nivel de activación, regulación y funciones efectoras. La sorprendente dicotomía de la respuesta inmune en la mucosa intestinal, que permite la inducción de tolerancia a moléculas inocuas (alimentos) y la "exclusión inmune" contra la flora normal, abre un inmenso campo de estudio que debemos explorar en los próximos años para comprender mejor el papel que los llamados sistemas de defensa tienen en la adaptación del individuo a un entorno siempre cambiante.

Agradecimientos

Conacyt apoyó parcialmente esta investigación con los proyectos 4263-M y 26361-B. Agradecemos los comentarios de la QFB Laura G. Martínez y el Dr. Víctor M. Zendejas, que enriquecieron este trabajo. ●

[Referencias]

- Nicolle, P. Life, work and personality of Alexander Besredka. *Ann.Sclavo*. 14, 497-504. 1972.
- O'Neill, E.J., Sundstedt, A., Mazza, G., Nicolson, K.S., Ponsford, M., Saurer, L., Streeter, H., Anderson, S. y Wraith, D.C. Natural and Induced Regulatory T Cells. *Ann.N.Y.Acad.Sci.* 1029, 180-192. 2004.
- Helvoort, J.M. van, Samsom, J.N., Chantray, D., Jansen, W., Schadee-Eestermans, L., Thepen, T., Mebius, R.E. y Kraal, G. Preferential expression of IgG2b in nose draining cervical lymph nodes and its putative role in mucosal tolerance induction. *Allergy*. 59, 1211-1218. 2004.
- Li, W., Chou, S.T., Wang, C., Kuhr, C.S. y Perkins, J.D. Role of the liver in peripheral tolerance: induction through oral antigen feeding. *Am.J.Transplant.* 4, 1574-1582. 2004.
- Brandtzaeg, P.E. Current understanding of gastrointestinal immunoregulation and its relation to food allergy. *Ann.N.Y.Acad.Sci.* 964, 13-45. 2002.
- Vega-López, M.A., Telemo, E., Bailey, M., Stevens, K. y Stokes, C.R. Immune cell distribution in the small intestine of the pig: immunohistological evidence for an organized compartmentalization in the lamina propria. *Vet.Immunol.Immunopathol.* 37, 49-60. 1993.
- Allez, M. y Mayer, I. Regulatory T cells: peace keepers in the gut. *Inflamm.Bowel Dis.* 10, 666-676. 2004.
- Vega-López, M.A., Arenas-Contreras, G., Bailey, M., González-Pozos, S., Stokes, C.R., Ortega, M.G. y Mondragon-Flores, R. Development of intraepithelial cells in the porcine small intestine. *Dev.Immunol.* 8, 147-158. 2001.
- Kaneko, M., Mizunuma, T., Takimoto, H. y Kumazawa, Y. Development of TCR alpha beta CD8 alpha alpha intestinal intraepithelial lymphocytes is promoted by interleukin-15-producing epithelial cells constitutively stimulated by gram-negative bacteria via TLR4. *Biol.Pharm.Bull.* 27, 883-889. 2004.
- Bernardin, F., Magierowska, M., Dandekar, S., Van Rompay, K.K. y Delwart, E.L. Number of CD4+ and CD8+ T-cell CD33 clonotypes expanding during acute infection of macaques with simian immunodeficiency virus. *Virology*. 322, 105-117. 2004.
- Bozic, F., Marinculic, A. y Durakovic, E. Analysis of intestinal intraepithelial lymphocyte populations in experimental *Trichinella spiralis* infection of mice. *Folia Parasitol (Praha)*. 47, 55-59. 2000.
- Yoshikai, Y. The interaction of intestinal epithelial cells and intraepithelial lymphocytes in host defense. *Immunol.Rev.* 20, 219-235. 1999.
- Benítez Barreto, H.A. Análisis de poblaciones celulares del sistema inmune intestinal de cerdos jóvenes ante la infección experimental con *Trichinella spiralis*. Tesis de licenciatura en Biología. ENEP-Iztacala-UNAM. México. 2002.
- Solis, C., Hernández, J.C., Borbolla, G., Vega-López, M.A. Development of small intestinal mast cells in pot bellied pigs. Proceedings of the 17th Congress of the International Pig Veterinary Society, June/2-5/02, Ames, Iowa, USA. Pg. 267. 2002.
- Vega-López, M.A., Bailey, M., Telemo, E. y Stokes, C.R. Effect of early weaning on the development of immune cells in the pig small intestine. *Vet.Immunol.Immunopathol.* 44, 319-327. 1995.
- Fujihashi, K., Dohi, T., Kweon, M.N., McGhee, J.R., Koga, T., Cooper, M.D., Tonegawa, S. y Kiyono, H. Gut-associated T cells regulate mucosally induced tolerance in a dose-dependent fashion. *Int.Immunol.* 11, 1907-1916. 1999.

El proceso de convergencia europea en educación superior: una oportunidad para la comunidad iberoamericana

SE PRESENTAN LOS ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL PROCESO DE CONVERGENCIA EUROPEA EN EDUCACIÓN SUPERIOR. DESTACAMOS AQUELLOS QUE CONSIDERAMOS QUE GENERARÁN MAYOR IMPACTO EN EL QUEHACER UNIVERSITARIO, ASÍ COMO LAS NOVEDADES MÁS IMPORTANTES EN EL SISTEMA ESPAÑOL DE ENSEÑANZA SUPERIOR.

Rodrigo Trujillo González

Motivaciones de una gran reforma

Para entender el proceso de convergencia europea, o creación del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), consideramos que hay dos puntos de partida: por un lado, los elementos básicos de legislación de la Unión Europea (UE) sobre movilidad de trabajadores y, por otro, los objetivos globales fijados que buscan colocar a la UE a la cabeza de la economía basada en el conocimiento.

El Tratado de Maastrich y sus consecuencias

El Tratado de la Unión Europea (TUE) de 1992, también llamado el *Tratado de Maastricht*, constituye una piedra angular en el proceso de integración europea, ya que por primera vez se sobrepasaba el objetivo económico inicial de la comunidad (construir un mercado común) y se le daba una vocación de unidad política consagrando oficialmente el nombre de Unión Europea, que sustituía al clásico de Comunidad Europea, y consagrando la figura del ciudadano europeo.

El TUE se fundamenta en tres pilares: por un lado, el reconocimiento de una ciudadanía europea, la Unión Económica y Monetaria (UEM) y los fondos estructurales y de cohesión; por otro lado, dos acuerdos de cooperación entre los gobiernos en las áreas de la Política Exterior y Seguridad Común (PESC), así como de la Justicia y Asuntos de Interior (JAI).

En materia de educación, el TUE promulga responsabilidad exclusiva de los estados miembros en la organización del sistema educativo. La tarea de la UE se limita a promover la cooperación entre los estados en materia de educación, apoyando y complementando las medidas adoptadas por cada país. La UE ha puesto en marcha diversos programas para fomentar esta cooperación al facilitar los contactos y el trabajo conjunto de alumnos y profesores europeos. El programa Sócrates se centra en la educación no universitaria, el Leonardo da Vinci en la formación profesional y el Erasmus en la educación superior.

RODRIGO TRUJILLO GONZÁLEZ Doctor en Matemáticas por la Universidad de La Laguna. Actualmente es profesor titular de Análisis Matemático en esta universidad. Ha realizado estancias de investigación en diversas universidades de EUA y la UE. Su área de investigación es el análisis armónico. Desde el 2003 es coordinador del proyecto piloto de

organización docente basada en el crédito europeo ECTS de la Facultad de Matemáticas. Ha impartido conferencias relacionadas con el proceso de convergencia europea en diferentes facultades de universidades españolas.
rotrujil@ull.es





A esta eliminación paulatina de fronteras en muchos temas importantes (capitales, comercio, servicios, derechos, libertades, etcétera), hay que añadir la consideración de toda la UE como un único y amplio mercado laboral abierto a cualquier ciudadano europeo. Nuestra próxima sección aborda este tema.

Un amplio mercado laboral con algunos problemas

Desde el 1 de enero de 1992, el principio de igualdad de trato supone que los ciudadanos de todos los países de la UE y del Espacio Económico Europeo¹ tienen la misma prioridad que los nacionales para acceder al empleo en cualquier estado miembro, esto es, desaparece cualquier disposición nacional que limite en número o en porcentaje el empleo para los extranjeros.

Si el mercado laboral promueve que donde haya trabajo se puedan incorporar los ciudadanos europeos idóneos procedentes de cualquier estado miembro, realidad que en EUA es un *modus vivendi* asumido desde hace décadas, el germen de esta *cultura laboral* debe abonarse desde lo más básico, y la enseñanza es uno de estos puntos, de manera que todas las barreras que frenen esta circulación libre de trabajadores deben eliminarse.

Ahora bien, en la práctica resulta que los mejor cualificados, los titulados superiores, se encuentran con un panorama de descoordinación enorme en todo lo que se refiere a transferencia de su certificación

académica entre los países de la UE. Muchos titulados europeos, que han obtenido su certificado académico en la propia UE, deben someterse a un proceso de homologación de sus estudios si cambian de país de residencia, que llega a ocupar hasta un año en algunos títulos (por ejemplo, los títulos de doctor), teniéndose en algunos casos el extremo de que ese título es único del país de origen en toda la UE.

El programa Erasmus de movilidad universitaria en la UE mitiga en parte esta poca capacidad de transferencia por medio de acuerdos puntuales entre facultades y escuelas de distintas universidades, pero el acuerdo es previo a la elección de alumno por lo que condiciona sus opciones y la libertad de elegir la universidad donde continuar sus estudios. Si desease cambiar de centro educativo, puede enfrentarse a toda una batería de trámites de convalidación-homologación de los estudios realizados hasta el momento, que en la mayoría de los casos le acarrearán más disgustos que alegrías.

Obviamente, todo esto no fomenta en absoluto la movilidad de los trabajadores que están en mejores condiciones para hacerlo (conocimiento de idiomas, experiencia de estancia en otros países, vinculación a actividades de ámbito supranacional, etcétera), impone a la universidad europea una restricción que incluso niega su propio nombre, empaña el valor de su función y mitiga su capacidad de captación de estudiantes extranjeros, uno de los aspectos que más la dignifica y revaloriza.

Toda esta problemática tiene aún mayor relevancia si tenemos presente el modelo económico que está promoviéndose como el ideal en los países desarrollados, y que se recomienda asuman cuanto antes aquéllos en vías de desarrollo, Iberoamérica completa entre otros. Nos referimos a la estrecha relación entre la enseñanza superior y la *economía basada en el conocimiento* que es el centro de nuestra siguiente sección.

La economía basada en el conocimiento

Con este apartado esperamos ayudar a entender un poco mejor las razones que motivan el proceso de convergencia europea. Consideramos que es un elemento decisivo para justificar la demanda a los gobiernos y demás agentes sociales de la necesidad de su implicación en todo el proceso.

Ahora el punto de partida no es una legislación como el *Tratado de Maastrich*, sino una declaración de intenciones a la que le han marcado una hoja de ruta. En marzo de 2000, el Consejo de Europa celebrado en Lisboa llegó a un importante pero difícil compromiso: *hacer de la economía europea la más dinámica y competitiva del mundo en tan sólo 10 años*. Este acuerdo se denominó la Estrategia de Lisboa² y de sus fundamentos destacamos los apartados 1 y 5, que muestran la relevancia del tema que abordamos:

1. La Unión Europea se enfrenta a un enorme cambio fruto de la mundialización y de los imperativos que plantea una nueva economía basada en el conocimiento.
5. La Unión se ha fijado hoy un nuevo objetivo estratégico para la próxima década: convertirse en la economía basada en el conocimiento más competitiva y dinámica del mundo, capaz de crecer económicamente de manera sostenible con más y mejores empleos y con mayor cohesión social. Obtener dicho objetivo requiere una estrategia global dirigida a: preparar el paso a una economía y una sociedad basadas en el conocimiento mediante la mejora de las políticas relativas a la sociedad de la información y de I + D (Innovación+Desarrollo), así como mediante la aceleración del proceso de reforma estructural a favor de la competitividad y la innovación, y la culminación del mercado interior.

Obviamente, esta declaración de todos los jefes de estado de la UE en el inicio del nuevo milenio tiene un elemento central: la economía basada en el conocimiento. Se refiere no a una teoría académica ni a un listado de principios, sino a un fenómeno global de transformación de los principios básicos de la economía mundial, estrechamente vinculado a otros términos más

presentes en los medios de comunicación, como *globalización, sociedad del conocimiento, sociedad tecnológica* y similares, que está en redefinición constante y bajo estudio permanente de los especialistas.³

Su definición no está completamente fijada, ya que es un concepto en continua revisión y debate cada vez más amplio y que ve incorporado a cada instante más matices y variantes. El Ministerio de Transporte e Industria del Reino Unido la define como "la economía en que la generación y explotación de conocimiento juega un papel predominante para la creación de riqueza". En el informe "*Defining the knowledge economy*", realizado en el marco del Knowledge Economy Programme Report de la Work Foundation [e1], podemos encontrar otras definiciones similares:

Es lo que obtienes cuando las compañías aúnan potentes computadores con mentes bien preparadas para crear riqueza.

Es el uso y explotación más efectivo de todo tipo de conocimiento en cualquier actividad económica.

No es una simple descripción de industrias con alto nivel tecnológico sino un conjunto de nuevas fuentes de competitividad que se aplican a todos los sectores, todas las compañías y todas las regiones.

La consecuencia de la revolución de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) que permiten a las compañías explotar el conocimiento científico y tecnológico llevándolas a unos límites de competitividad superior por abaratamiento de costes de procesado y transacciones.

Para los países a la vanguardia de la economía mundial, la balanza entre conocimiento y recursos se ha ido decantando hacia el lado del conocimiento de forma progresiva en las últimas décadas; además, para muchos países con economías emergentes (China e India principalmente) es uno de los motores de sus cambios. La transformación se fundamenta en pasar de la importancia del trabajo y el capital a sustentar el crecimiento económico en la acumulación de conocimiento y, fundamentalmente, en el desarrollo tecnológico (y el conocimiento en el que está basado). Los avances tecnológicos generan plataformas para más innovación, que a su vez generan mayor crecimiento, y la recuperación de la inversión a muy corto plazo.

Hablamos de la batalla de los países por liderar la innovación y el desarrollo (I+D), ser los que inicialmente saquen mayor partido a las nuevas tecnologías (comunicaciones, servicios integrados, logística, atención al usuario, etcétera) para que sus empresas (tradicionales o vinculadas a los nuevos negocios)

En marzo de 2000, el Consejo de Europa celebrado en Lisboa llegó a un importante pero difícil compromiso: hacer de la economía europea, la más dinámica y competitiva del mundo en tan sólo 10 años.

tengan una mayor expansión y, a partir de aquí, sean los que exporten mayor número de soluciones tecnológicas y dominen mayores cuotas de mercado.⁴

En este nuevo modelo, los trabajadores pueden ser definidos como "analistas de símbolos" (esencialmente procesados por el computador), trabajadores que manipulan símbolos más que máquinas, desde arquitectos a diseñadores de ropa, de ingenieros a educadores, de analistas políticos a asesores financieros. Hay estudios que estiman que en 2004, en economías avanzadas como las del Reino Unido y Holanda, 40% y 48%, respectivamente, de sus trabajadores desarrollaban actividades en este nuevo ámbito laboral [e1].

La literatura relacionada con este tema es abundante ([1, 2, 3, 4]) pero nos interesa destacar la especialmente relacionada con la enseñanza superior. Por un lado, la obra de varios autores *Universities and the Global Knowledge Economy* [5] y, por otro, el informe del Consejo de Lisboa (www.lisboncouncil.net), titulado *The economics of knowledge: Why education is key for Europe's success* [e2] realizado por el responsable de la División de Análisis e Indicadores de la Dirección de Educación de la Organización para la Economía, la Cooperación y el Desarrollo (OCDE) y autor del informe PISA, Andreas Schleicher. En este estudio se nos presenta una foto fija muy precisa de cuáles han sido las claves, principalmente en el ámbito educativo, para que unos países estén a la cabeza del desarrollo y la innovación y, por ende, lideren esta economía basada en el conocimiento. De forma resumida se concluye que, desde hace décadas, su inversión en la formación superior ha sido determinante para alcanzar la posición que ocupan.

El conocimiento y la tecnología (lo que se conoce como Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, TIC, o ICT en inglés) se conforman así como factores de producción, y el crecimiento económico está liderado por la acumulación de ambos. No obstante, hay que dejar bien claro que comprar tecnología no es suficiente para desarrollar una economía; hay que saber aplicarla (desarrollo), adaptarla a los cambios e implementarla (innovación). Cualquier avance tecnológico es la base para generar nuevas actividades económicas y, para ello, la necesidad de gente preparada es fundamental. El nuevo modelo económico demanda trabajadores con altas capacidades y este status se convierte en la condición que proporciona más perspectivas laborales en la UE. Estos cambios en el mercado laboral se ven acelerados por la fuga masiva de los procesos de manufactura a países con costes laborales más bajos, con China e India a la

cabeza de los receptores de grandes industrias de la confección, el ensamblaje, etcétera, siendo la causa principal de que en Europa se pierdan numerosos puestos de trabajo en sectores como el textil [e3], ya que dichos países también ofrecen mano de obra altamente cualificada a bajo coste.

Para alcanzar un puesto de trabajo de calidad, el trabajador europeo se enfrenta a un futuro que de forma extrema puede verse reducido a dos posibilidades bien diferenciadas. Por un lado, incorporarse a puestos de trabajo que no pueden ser contratados en el exterior (por ejemplo la educación, la sanidad o los servicios sociales que son de alta cualificación); por otro lado, incorporarse a empresas que consigan ofertar productos avanzados con alto valor añadido; esto es, que basados en alta tecnología, tengan una alta capacidad de captación de usuarios o clientes con interés global y que permita conseguir cuotas de mercado altas por su especificidad y calidad (basta recordar los datos de población activa anteriormente mencionados en Holanda y Reino Unido para hacerse una idea de qué cuota de mercado laboral estamos hablando).

Todo este panorama, presentado de forma esquemática porque el tema es complejo, es el centro de las políticas económicas de muchos estados o provincias (las regiones-estado descritas por Ohmae [2]). Su relación con la educación superior es capital, y para introducir la propuesta de toda la UE de reforma de su sistema universitario basta citar el estudio [e1]:

[...] la evidencia muestra –de forma consistente y a lo largo del tiempo– que los países y continentes que invierten fuertemente en educación se benefician social y económicamente de esa elección. De cada euro invertido en conseguir alta cualificación, los contribuyentes verán retornado más dinero en forma de crecimiento. Es más, la inversión proporciona beneficios tangibles a la sociedad –y no sólo a los individuos que reciben las grandes oportunidades ofertadas en educación.

La Declaración de Bolonia

Todo lo expuesto hasta ahora pone a la enseñanza superior en el centro de muchas demandas. Podríamos decir que le ha llegado a la universidad el momento de su "reconversión", al igual que muchos otros ámbitos –sectores como la minería, la pesca o la agricultura, entre otros– que han tenido que reestructurarse para adecuarse a los objetivos de la UE y que, además, han generado grandes debates nacionales y han supuesto, para muchos ciudadanos, sufrimientos considerables (pérdida de puestos de trabajo, migraciones a zonas más favorecidas, etcétera).

La economía basada en el conocimiento se refiere a un fenómeno global de transformación de los principios básicos de la economía mundial, estrechamente vinculado a otros términos como globalización, sociedad del conocimiento, sociedad tecnológica y similares.



El mensaje es claro: si la formación avanzada es fundamental para el desarrollo de la UE, y la movilidad de trabajadores debe ser la mayor posible de forma que donde haya necesidad siempre pueda encontrarse al personal adecuado para atenderla, la oferta universitaria de la UE debe ser lo más sólida, comparable y potenciadora de esta movilidad posible, de forma que nunca el lugar donde se ha obtenido la formación suponga un obstáculo para continuar su formación o desarrollar una carrera profesional en cualquier parte de la UE.

Además de ser capaces de formar a nuestros profesionales de forma adecuada para generar una economía basada en el conocimiento fuerte, otro aspecto que preocupa a los dirigentes políticos, debemos generar una oferta educativa lo suficientemente atractiva que sea capaz de atraer a estudiantes brillantes, que mejoren y dignifiquen nuestras aulas y valoren incorporarse a nuestro propio mercado laboral.⁵

La oferta universitaria de la UE no es vista de forma conjunta a como se percibe la oferta de EUA, donde claramente no todas las universidades son iguales. La disparidad de formatos en la UE es enorme, desde la duración de los estudios según el país, e incluso en un mismo país, para obtener un mismo título (3, 4 y 5 años), pasando por la diferencia de oferta de títulos académicos

(por ejemplo, en España no existía hasta ahora el título oficial de *master*) y terminando con el extremo de que algunas titulaciones son únicas en algún país.⁶

Todo esto genera una imagen muy dispersa de la oferta universitaria, que interfiere enormemente en el debate conjunto de temas mucho más importantes como son la calidad de las mismas, la conexión con el mercado laboral, la capacidad investigadora, etcétera. A todo esto se añade la escasa presencia de universidades europeas en los primeros puestos en los *ranking* de universidades.⁷ A modo de resumen, puede decirse sin rubor que la oferta universitaria europea es globalmente mucho menos competitiva y atractiva para cualquiera, ciudadano europeo o no, que la de EUA. Todo este escenario ha sido en parte el caldo de cultivo para la necesidad de plantear una reestructuración total de los estudios universitarios en toda la UE. El proyecto global es la construcción del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES).

Principios fundamentales del EEES

La construcción del Espacio Europeo de Educación Superior es un proceso que se inicia con la Declaración de la Sorbona (1998) y que se consolida y amplía con la Declaración de Bolonia (1999),⁸ en las que los ministros europeos de educación instan a los estados miembros de



Universidad de Oxford.

la Unión Europea a desarrollar e implantar en sus países las siguientes actuaciones:

- Adoptar un sistema de titulaciones comprensible y comparable para promover las oportunidades de trabajo y la competitividad internacional de los sistemas educativos superiores europeos mediante, entre otros mecanismos, de la introducción de un suplemento europeo al título.
- Establecer un sistema de titulaciones basado en dos niveles principales.
Grado: comprende las enseñanzas universitarias de primer ciclo y tiene como objetivo lograr la capacitación de los estudiantes para integrarse directamente en el ámbito laboral europeo con una cualificación profesional apropiada.
Posgrado: integra el segundo ciclo de estudios, dedicado a la formación avanzada y conducente a la obtención del título de *master*, y el tercer ciclo, conducente a la obtención del título de doctor, nivel más elevado de la educación superior.
- Establecer un sistema común de créditos para fomentar la comparabilidad de los estudios y promover la movilidad de los estudiantes y titulados.
- Fomentar la movilidad con especial atención al acceso a los estudios de otras universidades europeas y a las diferentes oportunidades de formación y servicios relacionados.

- Impulsar la cooperación europea para garantizar la calidad y para desarrollar unos criterios y unas metodologías educativas comparables.
- Promover la dimensión europea de la educación superior y, en particular, el desarrollo curricular, la cooperación institucional, esquemas de movilidad y programas integrados de estudios, de formación y de investigación.

Posteriormente, en el Comunicado de Praga (2001), se introducen algunas líneas adicionales:

- El aprendizaje a lo largo de la vida como elemento esencial para alcanzar una mayor competitividad europea, para mejorar la cohesión social, la igualdad de oportunidades y la calidad de vida.
- El rol activo de las universidades, de las instituciones de educación superior y de los estudiantes en el desarrollo del proceso de convergencia.
- La promoción del atractivo del Espacio Europeo de Educación Superior mediante el desarrollo de sistemas de garantía de la calidad y de mecanismos de certificación y de acreditación.

La Cumbre de Jefes de Estado, celebrada en Barcelona en marzo de 2002, aprobó un programa de trabajo que, entre otras acciones, solicita la introducción de instrumentos concebidos para garantizar la transparencia de los diplomas y cualificaciones (ECTS, suplementos a los diplomas y

certificados, CV europeo) y una cooperación más estrecha en materia de diplomas universitarios en el marco del proceso Sorbona-Bolonia-Praga. El compromiso establecido en la Declaración de Bolonia es alcanzar estos objetivos antes de finales del 2010.

El lector no debe confundirse, pues el proceso hacia el EEES no tiene la finalidad de implantar un sistema único en toda la UE. Lo que pretende es establecer criterios y mecanismos para facilitar la adopción de un sistema comparable de titulaciones universitarias, el establecimiento de objetivos comunes y el refuerzo de todo lo necesario para lograr que las universidades europeas sean más atractivas y competitivas internacionalmente.

Otra idea que queremos que quede clara es que este proceso de cambio no está llevándose a cabo, ni por asomo, de forma ordenada y tranquila, al menos en España. Por una parte, se ha creado un gran frente crítico que destaca más los defectos que las bondades. Algunos tachan todo el proceso de mercantilización de la universidad que se pliega a las exigencias del dinero y los empresarios, o bien que las evaluaciones y acreditación de los estudios llevará a supeditar toda la enseñanza a obtener buenos resultados académicos, lo que implicará un alto grado de relajación en los niveles de exigencia hasta ahora presentes. Por último, también están los que usan argumentos tan simples como lo innecesario de hacer cambios, ya que llevamos muchos años así y tan mal no está la situación. En otro sentido estamos los que vemos la necesidad de modernización de los estudios universitarios, la importancia de saber atender las demandas sociales y tecnológicas que están marcando el futuro de los países, la relevancia de poder hacer las reformas a la misma vez que las grandes universidades europeas, y del mundo, porque, no nos engañemos, lo que propone el EEES tiene muchos elementos ya presentes en las mejores universidades del mundo, aquéllas que conocemos y que nos cuesta tanto emular.

Nuestra postura ante las críticas es que está en nuestras manos, las de los miembros de la comunidad universitaria, llevar a cabo los cambios de forma que se eviten grandes errores, sin que signifique pérdida de autonomía de las instituciones y ganando aún más calidad en las enseñanzas impartidas. La hoja de ruta está marcada (la Declaración de Bolonia), los plazos también (2010), pero es evidente que todo este paquete de propuestas de cambio va a generar muchas reacciones, enfrentamientos y debates, por razones legítimas o no, por razones personales o institucionales, por criterios altruistas o mercantilistas, pero estamos totalmente seguros que no dejará indiferente a nadie, bueno, tal vez a aquellos que no amen la universidad.

Centrándonos en el ámbito del modelo universitario español, nos gustaría comentar las iniciativas que a nuestro parecer suponen una mayor novedad, que de forma más directa incidirán en los métodos de enseñanza, en la programación de las asignaturas, en la organización de los estudios y, en resumen, en la forma de realizar sus tareas toda la comunidad universitaria. No nos referimos a nuevos trámites burocráticos a implementar, a la que todos nos adaptamos aunque sea a regañadientes, sino a procesos y herramientas que afectarán a todos los estamentos, profesores, alumnos y administración, que requieren un cambio muy profundo de mentalidad sobre el quehacer universitario, generando nuevas actividades y rompiendo modelos que en muchos casos están siendo utilizados desde hace décadas.

Nos centraremos en tres aspectos concretos: la introducción de los sistemas de evaluación y acreditación de las titulaciones (apartado 5), la asunción de una nueva escala de medida del quehacer docente, el crédito ECTS (apartado 3) y la regularización de una cuenta pendiente en la enseñanza universitaria española, los títulos oficiales de *master* (apartado 2). Son los que han generado desde el primer momento mayor grado de controversia, origen alguno de ellos del aplauso más entusiasta y a su vez de la crítica más acérrima, pero desde nuestra óptica los elementos más importantes de todo el proceso.

La evaluación y acreditación como salvaguarda de la calidad del sistema

¿Cómo considera el lector que reaccionaría la comunidad universitaria si se plantease que aquella titulación que no alcance unas tasas "razonables" de abandonos, aprobados, licenciados (egresados) y ocupados tras finalizar sus estudios pueda perder la condición de título oficial? ¿Le gustaría conocer estos parámetros de la universidad donde desea enviar a sus hijos a estudiar? Si es docente en alguna universidad, ¿estaría orgulloso de tener buenos ratios y lo pregonaría a los cuatro vientos para captar a los mejores alumnos?, ¿entendería que la financiación de su universidad, al menos en parte, estuviese condicionada a tener buenos "números", como ya ocurre en algunas universidades?⁹⁹ Si estas preguntas le generan un mínimo de reflexión sin estar envuelto en el proceso de Convergencia Europea, ¡imagínese si lo estuviese!

La evaluación del trabajo universitario no es nueva, y si guardamos las formas, todo universitario tiene que demandar estos procedimientos de certificación de la

Hay que dejar bien claro que comprar tecnología no es suficiente para desarrollar una economía, hay que saber aplicarla (desarrollo), adaptarla a los cambios e implementarla (innovación).



calidad y mejora de las deficiencias. La realidad es que nos hemos acostumbrado a pasar toda una batería de evaluaciones de nuestra actividad investigadora (censores de las revistas científicas donde remitimos nuestros trabajos, comités de evaluación de nuestros proyectos (subsidijs) de investigación o complementos salariales, etcétera), y a pesar de todas las críticas que puedan generar las metodologías utilizadas, aquellas áreas que no han cuidado estos sistemas de evaluación (amiguismo, fraude, manipulación de datos y fuentes, etcétera) sufren de grandes cotas de desprestigio y desconsideración, muchas de ellas injustas pero otras merecidas.¹⁰

La única novedad que el proceso de convergencia europea propone en este ámbito es que ahora la evaluación llega a la actividad docente, la que mayor impacto social tiene, de forma uniforme para todas las instituciones y con reconocimiento en toda la UE.

La premisa es clara, si se desea un sistema universitario con elementos básicos comparables y que fomenten el reconocimiento supranacional, debe arbitrarse un protocolo de evaluación y acreditación (certificación) de la calidad de las enseñanzas que imparte cada centro universitario de la UE. Para ello,

cada país reglamentará el procedimiento y determinará el organismo encargado de hacerlo de forma coordinada con los restantes países de la UE. En España, estos aspectos ya están configurados de forma bastante clara con una ley,¹¹ anterior incluso a la propia definición de la estructura de los estudios universitarios.¹²

El protocolo en España es claro: las universidades deberán someter, cada seis años, a evaluación de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA) el desarrollo efectivo de las enseñanzas correspondientes a los planes de estudios homologados e implantados en su totalidad. A partir de la recepción del informe emitido por la ANECA, la universidad dispondrá de un año para subsanar las deficiencias identificadas en aquél. Finalizado el plazo, la ANECA elaborará un nuevo informe de acreditación. Si el informe es negativo, la titulación perderá la acreditación de título oficial y se reducirá a ser un título propio de la universidad que lo imparte.

Lo que va a evaluar concretamente la ANECA se basará en el Comunicado de Berlín de 19 de septiembre de 2003, donde los ministros de los estados signatarios del Proceso de Bolonia invitaron a la European Network

for Quality Assurance in Higher Education (ENQA) a desarrollar "un conjunto consensuado de criterios, procedimientos y directrices para la garantía de calidad" [e4]. Los pilares del proceso de evaluación de la calidad se sustentarán en los siguientes puntos:

- Política y procedimientos de las instituciones para la garantía de la calidad.
- Aprobación, control y revisión periódica de los programas y títulos.
- Evaluación de los estudiantes.
- Garantía de calidad del profesorado.
- Recursos de aprendizaje y apoyo a los estudiantes.
- Sistemas de información que recopilan, analizan y utilizan información pertinente para la gestión eficaz de sus programas de estudio y otras actividades.
- Información pública actualizada, imparcial y objetiva, tanto cuantitativa como cualitativa, sobre los programas y títulos que ofrecen.

Siguiendo este guión, la ANECA ya ha propuesto sus propios criterios y directrices [e5]. Destacamos que los resultados académicos tendrán un alto interés, se valorarán las tasas de abandono, graduación y eficiencia, esto es, los resultados académicos serán seriamente analizados para conceder la acreditación de todo título. Esto en España, y especialmente en la mayoría de las titulaciones del perfil de ciencias y técnicas, supondrá un muy serio tema para el debate ante las altísimas tasas de abandono y de fracaso que se tienen y la larga duración media real de los estudios.

En España, procesos similares han sido llevados a cabo de forma voluntaria por las universidades.¹³ Desde nuestro punto de vista, no han tenido a la larga el impacto deseado; muchas veces la evaluación se hizo de forma muy autocomplaciente, sin entrar a fondo en los problemas reales de las titulaciones y, lo que es más desalentador, muchas otras quedaron aparcadas una vez terminadas, sin que sirviesen como referente para la mejora de las mismas.

La evaluación en conjunto de nuestros resultados académicos es algo que nos debe llevar a una enorme reflexión, a todos: alumnos, profesores, instituciones académicas y agentes sociales. Para empezar, ya surge el primer debate circular alrededor de la misma: quien consiga los mejores alumnos tendrá más posibilidades de presentar los resultados más satisfactorios; para captar esos mejores alumnos, la universidad deberá ofertar los mejores servicios, la oferta académica más atractiva, el mayor apoyo al aprendizaje, la más alta cualificación de su profesorado y la mayor conexión

posible con el mundo laboral para que proporcione el mayor abanico de oportunidades al graduado; para ofrecer todo esto hacen falta medios, luego los gobiernos y las universidades deben asegurar la mejor financiación y gestión posible. Ahora bien, ¿cómo podemos hacer todo esto si se plantea que la financiación procedente de las arcas públicas estará condicionada a los resultados? Si queremos mantener un sistema público de universidades, el mayoritario en España, se requiere un compromiso de todos para llevar a cabo una reforma de la universidad que permita cumplir los objetivos generales de toda la sociedad, realizar la transformación con amplitud de miras pero con compromiso y responsabilidad de todos.

A modo de resumen, la comunidad universitaria española (y la europea) deberá incorporarse a una nueva dinámica, donde la evaluación de la calidad de sus servicios será el eje central del diseño de su oferta a la sociedad, y el que no alcance los mínimos establecidos de calidad puede perder el reconocimiento oficial de sus estudios, una verdadera condena para una facultad y universidad, y para la sociedad que la sustenta.

El nuevo paradigma docente: el crédito ECTS

Si el EEES no significa "todas las universidades y títulos iguales" (algo que nadie puede desear y mucho menos pensar en consensuar), ¿cómo vamos a arbitrar la comparabilidad o el reconocimiento supranacional de los estudios? Que se han impartido en un centro de calidad ya lo asegurarán los programas de evaluación y acreditación de cada país, pero ahora falta fijar cómo valorar la instrucción recibida. La herramienta será el crédito ECTS, siglas de European Credit Transfer System ya utilizado en los programas de movilidad europeos.

La organización docente de la universidad española no es muy diferente de la mayoría de las universidades iberoamericanas, toda la planificación se basa en las horas de clase presencial del alumno. Así, la mayoría de las titulaciones españolas son de cuatro cursos académicos, y el montante total es de unas 3 mil horas lectivas. Esencialmente, la carga de una titulación se mide en términos del volumen de trabajo de aula del profesorado. En el nuevo diseño, los créditos ECTS asignados a una asignatura representan el volumen de trabajo que se considera que debe realizar por término medio el estudiante para superarla satisfactoriamente. En adelante se deberán contabilizar las horas de lecciones magistrales, de trabajos prácticos y seminarios, periodos de prácticas, trabajo de campo, trabajo personal -en bibliotecas o en el domicilio-, así como todos los

"[...] la evidencia muestra -de forma consistente y a lo largo del tiempo- que los países y continentes que invierten fuertemente en educación se benefician social y económicamente de esa elección."

procesos de evaluación que tenga que realizar (exámenes, exposiciones orales, proyectos, etcétera).

Así pues, el ECTS se basa en el volumen total de trabajo del estudiante y no se limita exclusivamente a las horas de asistencia en clase; traduce el volumen de trabajo que cada unidad de curso requiere en relación con el volumen total de trabajo necesario para completar un año de estudios en el centro. Con la idea de que la jornada de un estudiante se asemeje a la de un trabajador medio con 40 horas semanales de dedicación, como cada curso académico debe tener 60 ECTS, cada crédito ECTS debe equivaler a 25/30 horas de trabajo del alumno. Los planes de estudio deberán ajustar su organización a estos números, y el profesorado deberá programarse y coordinarse entre sí para cumplir sus objetivos específicos pero ciñéndose lo máximo posible a estos límites.

Esto implica que la labor de cada docente tiene un impacto en el global de la organización docente, asociado no sólo a la dificultad de lo que enseña sino al trabajo que genera para asimilarlo y ser evaluado. Dos asignaturas pueden tener la misma cantidad de actividad presencial en el aula pero tener asignados distinto número de créditos ECTS, ya que el plan de estudio considera que una supone mayor carga de trabajo al alumno que la otra, cosa que en la actualidad ni se plantea, pero que sucede por ejemplo con aquellas que tienen prácticas de computadora.

Estas valoraciones sobre el trabajo que generan al alumno las enseñanzas son en nuestra cultura docente una auténtica novedad; significa pasar de centrar la tarea docente fundamentalmente en la enseñanza de los contenidos a dedicar la atención de forma prioritaria al aprendizaje de los mismos, esto es, pasar de la pregunta ¿de cuántas horas dispongo para explicar este concepto? a tener que trabajar sobre la pregunta ¿cuántas horas requiere el alumno para aprender este concepto y el profesor poder verificarlo?

Tristemente, esto no tendría ni que enunciarse, ¡por supuesto que el docente quiere que sus alumnos aprendan! Pero, seamos sinceros, ¿se han confeccionado nuestros planes de estudio teniendo presente una medida precisa de lo que se puede asimilar?, ¿alguna vez se han confeccionado valorando el cómo se van a impartir? En nuestro entorno podemos afirmar que mayoritariamente no se ha hecho así; hemos seguido las pautas del pasado –a mí me lo enseñaron así–, las temporizaciones heredadas sin valorar los cambios que se han producido en el perfil del alumno de secundaria –yo cuando la estudié ya sabía algo–. Entendemos que las

transformaciones requieren tiempo para realizarse, y la propuesta del nuevo modelo es sólo el inicio y asumir este nuevo esquema supone el principio del verdadero cambio.

Lo asequible o complicado que sea una asignatura no sólo incide en sus resultados y, por ende, ante la evaluación global de la titulación, sino que puede modificar la carga de créditos ECTS asignada inicialmente al curso, lo que implica un desajuste en la planificación de los estudios que requiere reflexión e intervención. Piensen en un ejemplo concreto, una asignatura introduce una nueva actividad docente para reforzar el aprendizaje de un concepto –buena práctica metodológica, aplauso–, requiere la consulta bibliográfica, la resolución de algún apartado práctico y la redacción y presentación de un informe. El profesor debe estimar cuánto tiempo debe ocupar al alumno por término medio para la realización de todo lo relacionado con su asignatura –planificación concienzuda del trabajo asignado, ¿siempre presente?–, pero el profesor comete el error de no modificar ninguna de las actividades que ya realizaba en los cursos anteriores –comprensible porque esas actividades ya sabe que ayudan a asimilar la asignatura–, por lo que la nueva actividad se suma aumentando la carga total de trabajo de la asignatura –nula reflexión sobre el trabajo del alumno y sus tareas en todo el curso–. A esto se añade algo muy común, por ser la primera vez que se propone, la nueva tarea propuesta supone al alumno una carga mucho mayor de la que el profesor ha previsto, el doble en algunos casos, y automáticamente se resiente el seguimiento de los alumnos de las otras asignaturas, que ya tienen ajustadas sus actividades –protesta de los otros profesores en las reuniones de coordinación–. El alumno declara que se ha producido una sobrecarga en la asignatura, que implica que se haya incrementado la carga de créditos de la misma –protesta de los alumnos–.

Ante todo esto podemos mirar para otro lado –no asistimos a las reuniones de coordinación– o promulgar a los cuatro vientos que el alumno debe hacer lo que se le mande –para eso son alumnos y nosotros trabajamos mucho cuando éramos alumnos, aunque no nos acordemos cuánto–, pero si todos tiramos para nuestro lado sin tener una visión global, tendremos que, de los 60 ECTS anunciados, realmente el alumno debe cursar un alto porcentaje más; luego se limitan sus posibilidades de superar las asignaturas, aumentarán los niveles de bajo rendimiento y abandono, la duración media de los estudios, etcétera, y de aquí todas las consecuencias negativas que se deriven, porque no vemos ninguna positiva.

El proceso hacia el Espacio Europeo de Educación Superior no tiene la finalidad de implantar un sistema único en toda la UE, sino de establecer criterios y mecanismos para facilitar la adopción de un sistema comparable de titulaciones universitarias, el establecimiento de objetivos comunes y el refuerzo de todo lo necesario para lograr que las universidades europeas sean más atractivas y competitivas internacionalmente.



Parlamento Europeo.

Situados en este punto, ¿cómo enfrentamos este tema sin caer en malas prácticas? Es evidente que no bastará con premiar a todos con las mejores calificaciones sin muchas exigencias, porque el alumnado lo dejará bien claro en las encuestas: "habré aprobado pero no he aprendido nada, estos estudios no valen nada". No podemos pensar que el alumnado sólo le interesa sacar sus estudios sin ninguna exigencia de calidad, y si es así, es que no hemos sabido explicarles el valor de la formación que impartimos. En esto podemos fracasar todos.

La convergencia europea promulga metodologías docentes y procesos de evaluación que dediquen una atención más personalizada al alumno, buscando crear mecanismos de mejora de los procesos de aprendizaje –sí, de aprendizaje que arrastran a los de enseñanza–; ayuda a la detección de las dificultades para aplicar soluciones, y de corrección de deficiencias y de difusión de las medidas que se valoren como rentables. Esto es esencial, pues el docente no tendrá conocimiento de los niveles de asimilación si no tiene un contacto directo con el alumno –lo que se conoce como sesiones tutoriales individuales o con grupos pequeños–, permitiéndole así promover actividades específicas que

ayuden a superar los obstáculos –no todos los alumnos aprenden igual–, así como temporizar de forma más ajustada las actividades a realizar y los tiempos para cumplir los objetivos del curso.

La oferta de posgrado

La ausencia en España, hasta este curso académico 2006–2007,¹⁴ de una oferta reglada y oficial de los estudios de master consideramos que ha sido uno de los mayores lastres de la universidad para su desarrollo. Este terreno ha sido atendido hasta ahora de forma dispar por organismos privados y las propias universidades, sin criterios comunes, sin órganos que velasen por su calidad y tristemente clasificando su valía por el precio de su inscripción.

Los master son la puerta para la especialización después de haberse conseguido la formación universitaria básica, es la oferta de mayor calidad para la vuelta a las aulas universitarias de la sociedad profesional (el aprendizaje a lo largo de la vida que promueve el EEES); es también la vía de modernización de la oferta académica que mejor sustenta la formación básica y que permite introducir los avances más importantes en sus enseñanzas, la moneda de presentación al exterior más

valiosa de la universidad para la captación de alumnos de otros países, para fomentar acuerdos con otras universidades y gobiernos, para la formación de investigadores y el establecimiento de vínculos sólidos. Todo esto lo hemos visto aprovechar por terceros países, donde muchos de esos alumnos eran compatriotas.

Las desventajas que han padecido nuestros alumnos, al no disponer de esta oferta académica oficial a precios públicos, ha sido enorme en el marco de una proliferación de universidades en los años 80 y 90, que han generado una oferta tal vez sobredimensionada de casi una universidad por provincia. Se puede pensar que sin una oferta amplia no se generaban tantas desventajas, accesible sólo para los que podían pagar las altas tasas de la oferta no oficial, pero todo esto debe analizarse en el marco de la competitividad de nuestros titulados. Durante años hemos admitido en nuestras aulas de la Facultad de Matemáticas de la Universidad de La Laguna alumnos del programa Erasmus de movilidad europea. En particular, hemos tenido un fluido intercambio de alumnos de la National University of Ireland-Maynooth (NUI), ubicada en Irlanda, uno de los países modelo de desarrollo en concordancia con la economía basada en el conocimiento [2, 3]. La circunstancia que se ha producido es que los contenidos que impartimos en el último curso en nuestra titulación de Licenciado en Matemáticas corresponden con gran parte de los contenidos de los programas de *master* en Matemáticas de la NUI, de esta forma, los alumnos irlandeses venían mayoritariamente de este programa y los nuestros cursaban allí las asignaturas para una titulación superior a la correspondiente en España. Al final, los dos tienen los mismos conocimientos, pero el alumno irlandés termina con dos titulaciones en su currículo; aparte, el nuestro ha tardado en media bastante más en terminar sus estudios de licenciatura que el irlandés. Aun cuando ambos terminan con casi la misma edad, el alumno de Irlanda obtiene más alta cualificación que, de hecho, le hace estar por delante en las convocatorias de becas de investigación, ofertas de trabajo, etcétera. Este ejemplo, al vivirlo con nuestros alumnos, ha supuesto un verdadero punto de reflexión y la conclusión de que la reforma se hace necesaria. No es un problema de "número de títulos", sino de situar al alumno en las mejores condiciones, ser más competitivo, ajustado a su edad y formación recibida.

Una oportunidad para la universidad española e iberoamericana

Desde nuestro punto de vista, todo este proceso supone una oportunidad histórica para modernizar y actualizar

la oferta universitaria de España. Los que hemos tenido la oportunidad de visitar, estudiar o investigar en otras universidades europeas y norteamericanas hemos podido apreciar las grandes diferencias que existen con respecto a nuestras universidades. Si bien en capital humano podemos sentirnos orgullosos, la calidad de las instalaciones, los servicios y las bibliotecas, la flexibilidad de la oferta educativa para atender los múltiples intereses de los alumnos, entre otros, suponen en muchos casos razones de envidia. Todo esto se podría abordar para su mejora sin apelar a ninguna revolución, pero hay algunos elementos que vienen en el paquete de la convergencia europea y que consideramos de gran valor, a saber: la revalorización de la enseñanza superior como generadora de riqueza y la planificación de reformas en el ámbito de toda la UE como un proyecto común.

Ya comentamos que las demandas sociales para desarrollar la economía basada en el conocimiento ponen a la enseñanza superior en el centro de las estrategias,¹⁵ en el ámbito de la formación inicial (la oferta que esencialmente se hace ahora) y a lo largo de la vida (la que debemos diseñar en el futuro para atender con garantías todas las demandas). Los mejor preparados tendrán más oportunidades; esas oportunidades aparecerán en cualquier lugar de la UE y luego, los que mayores miras tengan, serán los que mejor podrán aprovecharlas. Se pretende que esa actitud se adquiera en la universidad, con ofertas académicas atractivas, con programas de movilidad que rompan localismos inútiles, relacionada con el entorno estableciendo vías de comunicación entre lo académico y lo social, que sea accesible al mayor número de ciudadanos posible y a lo largo de toda su vida. Todo esto asegura un entorno mediático alrededor de la universidad que realizará sus bondades, pero que también la analizará con lupa y le demandará resultados.

Ahora bien, si no somos capaces de configurar en nuestra universidad una oferta académica competitiva y dejamos que otros lo hagan, los programas de ayudas y de atención a los alumnos, las políticas de captación de buenos alumnos, las campañas de publicidad y los resultados de las evaluaciones y acreditaciones pueden llevar a nuestra universidad al ostracismo y desprestigio, que no podrán compensar ni la muy buena docencia ni los excelentes currículum de su profesorado. Basta citar como ejemplo el territorio ganado a las universidades públicas españolas por las universidades privadas, de muy reciente creación, al introducir la oferta de dobles y triples titulaciones que han registrado una altísima demanda social.

La convergencia europea promulga metodologías docentes y procesos de evaluación que dediquen una atención más personalizada al alumno, buscando crear mecanismos de mejora de los procesos de aprendizaje.



No queremos concluir este artículo sin hacer un pequeño análisis de qué puede aportar este EEES a la comunidad iberoamericana. Para explicar la especial emoción que nos suscita este tema, debo retrotraerme a nuestras primeras estancias en EUA, donde tuvimos la oportunidad de compartir muchas horas de conversación con universitarios y profesores de casi todo el espectro latino: mexicanos, salvadoreños, guatemaltecos, panameños, brasileños, venezolanos, colombianos, argentinos y chilenos. Tal vez, ser originario de las Islas Canarias es una buena tarjeta de visita cuando uno se acerca a estos hermanos latinoamericanos; yo me sentía uno de ellos y ellos me acogieron así.

Estos amigos cursaban todas las opciones de la oferta educativa de las universidades norteamericanas, desde los cursos de inglés para extranjeros o los programas *undergraduate* hasta lo más común de los programas de master y doctorado, e incluso programas de intercambio por periodos cortos con universidades latinoamericanas. En esos momentos, hace casi 15 años, ya me

preguntaron si mi universidad tenía alguna oferta similar. En ese momento me percaté de qué significa tener una oferta educativa competitiva.

Han pasado los años y la situación no ha cambiado hasta ahora; ha sido necesaria la presión legislativa de la UE para que España inicie la oferta oficial de una formación avanzada especializada, no vinculada directamente al doctorado. Si la hubiésemos tenido desde antes, posiblemente serían muchos más los latinoamericanos que hubiesen buscado financiación para cursar nuestros master, en un ambiente más próximo, más barato que el norteamericano, sin barreras idiomáticas y, si me permiten la licencia, tal vez como en casa, si lo hacen en Canarias donde los vínculos con Latinoamérica son enormes.

Todo esto ha supuesto hasta la fecha la pérdida de un tiempo precioso para establecer vínculos profesionales, culturales y personales, iniciar colaboraciones y acuerdos institucionales para fomentar la movilidad y el intercambio, fuente de riqueza y motor de la difusión de las ideas. Toda



Iberoamérica ha perdido oportunidades, en unos años de desarrollo cuando el conocimiento avanzado ha sido fundamental. España no lidera este movimiento, pero su situación en la UE le coloca en buena situación para engancharse al carro. Iberoamérica debe hacerlo lo antes posible, como lo están haciendo las economías asiáticas, ya que es una de las tablas de salvación para mejorar sus economías [3].

El modelo de organización universitaria que propone el EEES es exportable, no es exclusivo de la UE, y ya se están dando pasos muy esperanzadores. En julio de 2006 se fijaron los principios básicos del denominado Espacio Iberoamericano del Conocimiento en el marco de la XVI Conferencia Iberoamericana de Educación celebrada en Uruguay [6]. En esta Declaración se propone la definición de Espacio Iberoamericano del Conocimiento como

[...] un "ámbito" en el cual promover la integración regional y fortalecer y fomentar las interacciones y la cooperación para la generación, difusión y transferencia de los conocimientos sobre la base de la complementariedad y el beneficio mutuo, de manera tal que ello genere una mejora de la calidad y pertinencia de la educación superior, la

investigación científica e innovación que fundamente un desarrollo sostenible de la región.

La Declaración es bastante densa y ambiciosa.

Propone un diseño del espacio iberoamericano de educación superior más interrelacionado pero, con respecto al EEES, las medidas están a diferentes niveles, como puede apreciar el lector con una revisión detenida de esta Declaración de Montevideo y la de Bolonia. De todos los objetivos marcados en la Declaración, se consideran que deben ponerse en marcha de forma prioritaria los siguientes:

- Fomento de la cooperación interuniversitaria, de la comparabilidad y armonización de la educación superior en Iberoamérica.
- Fomento de la mejora de la calidad y pertinencia de la oferta de las IES.
- Creación de capacidades para la I+D.
- Fomentar investigaciones en áreas estratégicas y problemas críticos para el desarrollo.
- Favorecer los procesos de innovación en el sector público y el sector privado.
- Favorecer las relaciones ciencia-tecnología-sociedad. Evidentemente, las condiciones de partida son muy

España no lidera el movimiento de modernización de la formación superior, pero su situación en la UE le coloca en buena situación para engancharse al carro. Iberoamérica debe hacerlo lo antes posible, como lo están haciendo las economías asiáticas, ya que es una de las tablas de salvación para mejorar sus economías.

distintas, la UE tiene una estructura legislativa propicia para tomar acuerdos globales y plantear retos muy concretos (todos con la misma estructura universitaria, todos los títulos con el mismo valor, total reconocimiento de los títulos, criterios comunes de calidad y acreditación, etcétera). Iberoamérica no tiene este marco de actuación, pero no debe ser obstáculo para empezar la tarea marcada, ya que el ámbito universitario es lo suficientemente amplio para superar estas deficiencias y establecer los acuerdos que sean necesarios.

Las medidas propuestas son importantísimas y necesarias pero, desde nuestro modesto punto de vista, los procesos europeo e iberoamericano marchan en estos momentos por diferentes caminos. Realmente, parece que se llevan 15 años de diferencia, lo que se promulga en Iberoamérica ahora ya se inició hace años en la UE y son políticas bastante consolidadas, y ya que la UE está atacando otro problema, el diseño del espacio Iberoamérica de educación superior debería aprovechar esta experiencia y acelerar sus reformas con el objetivo de evitar los mismos problemas -hay que coger todos los atajos posibles para ofertar lo mejor-.

Todas estas medidas mejorarán la colaboración universitaria sin lugar a dudas, pero creemos que

siempre habrá divergencia en los modelos universitarios que dificultará la interconexión, como la que existe en la UE en estos momentos que han motivado el proceso de Convergencia Europea. No ofrecer las mejores condiciones para poder comunicarse de forma fluida con los grandes modelos universitarios del mundo, el ya consolidado de EUA y el preconizado como de excelencia del EEES, frenará la capacidad de crecimiento y mejora de la educación superior en toda la región y, por ende, la mejora de sus economías y sociedades.

Debemos diseñar el futuro universitario teniendo un horizonte amplio de objetivos, con los brazos abiertos a la mayor comunidad posible. La comunidad iberoamericana debe buscar ampliar sus fronteras en materia educativa, ser ambiciosa en el modelo a diseñar para asumir los retos de los países con mayor tradición universitaria, ayudar a aumentar el nivel de competencia de sus educadores y profesionales, para que en un periodo de varias décadas se recojan los frutos de esta inversión, y que el barco de la enseñanza superior los ayude a mejorar su crecimiento económico y social. Nosotros, desde España, estamos dispuestos a ayudarles desde ya, pero especialmente cuando hagamos nuestra reforma, si somos capaces de hacerla bien. ●

Notas

- [1] Mercado único que cubre no sólo a la propia UE, sino también a los países de la Asociación Europea de Libre Comercio (AELC). (www.europarl.europa.eu/factsheets/63_2_2_es.htm)
- [2] Declaración de Jefes de Estado del Consejo Europeo de Lisboa, 23-24 de marzo de 2000. (http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1_es.htm)
- [3] En abril de 2006, la Work Foundation ha anunciado el inicio del mayor programa de estudio sobre la economía basada en el conocimiento, financiado con cerca de 3 millones de dólares. Los objetivos son identificar lo que realmente es y cómo las naciones avanzadas usan el conocimiento y la información para mejorar su crecimiento económico y la competitividad en el siglo XXI. (www.theworkfoundation.com/futureofwork/research/knowledgeconomy.aspx)
- [4] Una panorámica de la situación mundial puede consultarse en los Paneles de Innovación de los años 2002-2006 realizados por la Comisión Europea. (http://trendchart.cordis.lu/tc_innovation_scoreboard.cfm)
- [5] La Comunidad Autónoma de Madrid (el equivalente español a un estado de muchos países latinoamericanos) tiene un programa específico para becar a los mejores alumnos universitarios de todo el territorio nacional que quieran estudiar en alguna de las universidades de su jurisdicción. (<http://www.emes.es/Becasestudiantes/Excelencia/tabid/361/Default.aspx?pid=25>)
- [6] Para tener una panorámica de las titulaciones universitarias en España, y su relación con las análogas en la UE, recomendamos consultar los Libros Blancos, realizados bajo el auspicio de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA), donde se presentan estudios y supuestos prácticos útiles en el diseño de diferentes titulaciones adaptadas al nuevo modelo promovido por el proceso de Convergencia Europea. (http://www.aneca.es/modal_eval/conver_docs_titulos.html). Para el ámbito específico de las matemáticas recomendamos también el artículo del Prof. A. Quiros, uno de los representantes españoles en el proyecto *Tuning Educational Structures in Europe*, publicado en la revista electrónica de divulgación matemática *Matemática*. (http://www.matematicalia.net/index.php?option=com_content&task=view&id=63&Itemid=70)
- [7] Si nos remitimos a uno de los más citados, el realizado por la Shanghai Jiao Tong University (China), en su último estudio del 2006 puede constatar que de las veinte primeras universidades del mundo, sólo dos están en la UE, y en particular ambas en el Reino Unido (Univ. Cambridge y Univ. Oxford). En particular, la primera ubicada en Iberoamérica es la Universidad de Brasil en el rango de puestos del 100 al 150, y la primera española, la Universidad de Barcelona, se encuentra por encima del puesto 150. (<http://ed.sjtu.edu.cn/ranking.htm>)
- [8] www.aneca.es/modal_eval/docs/declaracion_bolonia.pdf
- [9] Este modelo de financiación ya ha sido asumido por las universidades de la Comunidad Autónoma de Andalucía. (<http://www.andaluciajunta.es/aj-nota.html?idNot=112555&idCanal=214351>)

- [10] El fraude del biólogo coreano Hwang Woo-Suk en la investigación de la clonación terapéutica, publicado en la prestigiosa revista *Science*, es uno de los más sonados de los últimos años, y cuya repercusión afecta a todas las disciplinas científicas. A partir de este caso se realizaron muchas revisiones de otros trabajos detectándose malas prácticas (retoque fotográfico, maquillaje de datos, etcétera) que han puesto en alerta a toda la comunidad solicitando mayores cotas de exigencia a los editores de publicaciones científicas. (<http://www.elmundo.es/elmundosalud/2006/11/29/biociencia/1164799603.html>)
- [11] Real Decreto 49/2004 sobre homologación de planes de estudios y títulos de carácter oficial y validez en todo el territorio nacional (www.boe.es).
- [12] Reales Decretos 55/2005 y 56/2005 por los que se establece la estructura de las enseñanzas universitarias y se regulan los estudios universitarios oficiales de grado y postgrado. Se ha propuesto una reforma de estos decretos en septiembre de 2006 que puede consultarse en http://www.mec.es/mecd/gabipren/documentos/Propuesta_MEC_organizacion_titulaciones_Sep06.pdf
- [13] Plan Nacional de Evaluación de la Calidad de las Universidades (1995-2000) y II Plan de la Calidad de las Universidades (2001-2007).
- [14] Oferta oficial de Master para el curso 2006-2007. (http://www.mec.es/educa/ccuniv/html/GRADO_POSGRADO/Documentos/Posgrados_Resolucion.pdf)
- [15] En el informe *The economics of knowledge: Why education is key for Europe's success*.

Referencias

- [1] Friedman, T. *La Tierra es plana*. Ed. Martínez-Roca. Madrid. 2005.
- [2] Ohmae, K. *El nuevo escenario global. Desafíos y oportunidades en un mundo sin fronteras*. Ed. Granica. Barcelona. 2005.
- [3] Oppenheimer, A. *Cuentos Chinos*. Ed. Sudamericana (Buenos Aires). Ed. Debate (Madrid). 2005.
- [4] Toffler, A. y H. *La revolución de la riqueza*. Ed. Debate. Madrid. 2006.
- [5] H. Etzkowitz et al. (eds.). "Universities and the Global Knowledge Economy". En *Science, Technology and International Political Economy*. Continuum. London. 1997.

Referencias electrónicas

- [e1] <http://www.theworkfoundation.com/products/publications/azpublications/definingtheknowledgeconomy.aspx>
- [e2] http://www.lisboncouncil.net/force-download.php?file=/media/publications/lisbon_council_economics_of_knowledge.pdf
- [e3] <http://www.levante-emv.com/secciones/noticia.jsp?pnNumEjemplar=3036&pldSeccion=17&pldNoticia=166907>
- [e4] <http://www.enqa.eu/pubs.lasso>
- [e5] http://www.aneca.es/modal_eval/pa_modelo_0612.html
- [e6] <http://www.oel.es/espacioiberoamericano.htm>

Discurso de toma de protesta como Director General del Cinvestav del Dr. René Asomoza Palacio

8 de diciembre de 2006

Sra. Secretaria de Educación Pública, Lic. Josefina Vázquez Mota,
Sr. Director General del Instituto Politécnico Nacional,
Dr. Enrique Villa Rivera,
Sr. Ing. Eugenio Méndez Docurro, Ex Director del Instituto Politécnico Nacional y uno de los fundadores de este centro de investigación,
Distinguidos miembros del Presidium,
Señores miembros de la Junta Directiva del Cinvestav,
Invitados especiales,
Compañeros del Cinvestav,
Señoras y señores:

Agradezco la confianza que se ha depositado en mí para dirigir este centro de investigación que ha sido no solamente un lugar de trabajo, sino una parte integral de nuestras vidas.

Esta ceremonia pone el punto final a una trama que se inició hace unos meses, cuando los representantes de cada una de las áreas constituyeron la Comisión de Auscultación que habría de conducir el procedimiento para elegir la terna de candidatos a ocupar la Dirección General del Cinvestav. Nueve investigadores registraron su candidatura. De ellos, cinco fueron considerados para la elección de la terna, presentaron sus propuestas de trabajo y respondieron tanto a una serie de preguntas comunes como aquellas de carácter individual que se les hizo llegar. Con base en estos elementos, 94% de los profesores considerados en el padrón electoral emitieron su voto. El resultado mostró, más que la existencia de divisiones profundas, la convicción común a favor de la diversidad y del respeto

a los reglamentos y a los acuerdos institucionales. Mostró también la madurez de nuestra comunidad y su voluntad de participar en todas las experiencias, esperanzas y metas de la ciencia y de sus actividades principales: la investigación, la formación de recursos humanos y el desarrollo tecnológico y educativo.

Las autoridades de la Secretaría de Educación Pública y el Presidente de la Junta Directiva han correspondido a esta señal de maduración mediante un procedimiento inédito en nuestra historia. Los tres miembros de la terna fuimos citados y recibidos por la licenciada Josefina Vázquez Mota, Secretaria de Educación Pública (por cierto, la primera mujer en nuestra historia que ocupa este cargo), y por sus colaboradores. Personalmente, me sorprendió no sólo su esmero para escuchar nuestros proyectos, sino también el interés por el Cinvestav y el conocimiento de su funcionamiento e importancia nacional. Estoy convencido de que la decisión que se ha tomado es producto de la confluencia entre lo expresado por los profesores a través de su participación activa y consciente y la búsqueda, por parte de las autoridades, de los acuerdos necesarios para llevar a cabo acciones de largo plazo y de alcance nacional, tanto dentro del sistema educativo como del científico y tecnológico.

En esta ocasión, el inicio de la nueva gestión en la Dirección General del Centro coincide con el cambio en el gobierno federal. Más que ver los retos que esto representa, quiero plantear las oportunidades y los compromisos y hacer un exhorto para que exploremos juntos las primeras y establezcamos los segundos de forma compartida. A lo largo del proceso de



Josefina Vázquez Mota, Secretaria de Educación Pública
y René Asozmoza Palacio, Director del Cinvestav

auscultación al platicar con investigadores de los departamentos y las unidades, de varias generaciones y de disciplinas diferentes, escuché más planes e ideas que inquietudes o demandas. Recordé lo dicho por René Dubos, después de que éste concluyó una estancia en el Laboratorio Nacional de Brookhaven entre científicos que trabajaban en las lindes del conocimiento y del entendimiento: "... En ningún otro lugar -escribió Dubos- he apreciado más cabalmente que los hombres de ciencia no consideran su vocación sólo como un asunto práctico que les produce satisfacciones, sino como la dedicación a las necesidades del alma humana y al cumplimiento del destino del hombre".

Para mí, esto no es un ejercicio de retórica sino una realidad que vivimos y compartimos día con día. Incluso en las cuestiones más utilitarias e inmediatas depositamos anhelos y afanes de miras altas, inocentes quizá, pero genuinos y necesarios para continuar con nuestras labores y darles sentido. Confío plenamente en la sensatez de "nuestras emociones", y por ello me he comprometido a crear y realizar con ustedes, los más expertos entre los expertos, un plan de desarrollo institucional sustentado en las propuestas de los colegios de profesores (que son la máxima autoridad académica de los departamentos) en el diálogo entre los grupos de pares de cada una de nuestras áreas y en la búsqueda de soluciones compartidas a los retos y las dificultades comunes. Para que esto sea posible, resulta esencial acrecentar la confianza entre nosotros, en nuestra institución y en las autoridades del sector público al que pertenecemos. Ésta ha sido la máxima fuerza motora de nuestra historia y deberá serlo en el futuro.

No quiero detenerme más en este punto, porque sé que la confianza es un asunto que se define a través de las acciones. Por mi parte, ofrezco un trato equitativo y cortés para todos los sectores, todas las disciplinas y todas las personas. No hay mejor garantía que el apego irrestricto a los reglamentos internos, que son parte de un legado aún vivo y susceptible al cambio, a las leyes federales, al decreto que norma el funcionamiento y la existencia jurídica del

Centro, así como las relaciones laborales y las condiciones de trabajo. En este sentido, me comprometo a presidir una gestión eficiente que dé cuenta de forma permanente de los recursos, su distribución y uso, y de los avances en los planes y las metas convenidas. Me comprometo también a atender las recomendaciones de los cuerpos e instancias colegiadas internos, en particular del Consejo Académico Consultivo y de la COPEL, y a atender los lineamientos que nos señale la Junta Directiva, en la que están representados prácticamente todos los sectores y las dependencias involucrados en el desarrollo social, educativo y científico de México.

Por nuestros vínculos orgánicos e historia compartida, y sobre todo debido a la comunión de nuestras metas y aspiraciones, el Instituto Politécnico Nacional será uno de nuestros interlocutores básicos. Fortaleceremos nuestra relación de cooperación con el Instituto en el contexto de nuestros marcos normativos. Las dos instituciones cuentan con grupos de investigación de primer nivel y existen áreas de investigación en las que la cooperación puede potenciar sus actividades. Agradezco la labor realizada por la doctora Rosalinda Contreras Theurel al frente del Cinvestav. Durante su gestión, el Centro tuvo una expansión importante que deberemos consolidar.

Este año, el Cinvestav está celebrando su cuadragésimo quinto aniversario. Mi gestión terminará justo en la víspera del primer cincuentenario de esta gran institución y al final de la primera década del siglo XXI. Estos referentes cronológicos nos marcan la necesidad no sólo de conmemorar y honrar nuestra historia, sino de ampliar y consolidar el patrimonio físico, cultural y humano que hemos forjado. Debemos considerar la idea -y no es simplemente una idea- de instituir una comunidad que, con base en su heterogeneidad y enorme potencial creativo, vaya más allá de la suma de las personas, de las acciones y de los productos y sea capaz de agregar a cada cifra, a cada ganancia y a cada adelanto, no sólo el elemento de calidad que nos distingue, sino la mezcla de capacidad reflexiva y de pasión propia de la investigación científica y de la ciencia misma.

Muchas gracias.

Discurso de despedida de la Dra. Rosalinda Contreras Theurel

Lic. Josefina Vázquez Mota
Secretaria de Educación Pública
Distinguidos miembros del Presidium
Señoras y señores académicos de este Centro de Investigación

En los 33 años de mi carrera académica, realizada esencialmente en esta institución, he podido ser testigo de su alto desempeño y me enorgullece haber tenido la oportunidad de contribuir a ello.

Quiero compartir con ustedes que estos últimos 4 años he vivido y disfrutado intensamente la vida académica del Cinvestav, me he emocionado con cada ceremonia de graduados, con cada premio o distinción que han obtenido nuestros estudiantes graduados y muchos de los investigadores aquí presentes. Me siento realmente satisfecho de que con la ayuda de todos ustedes y de las autoridades de la SEP, hemos logrado reposicionar al Cinvestav en el lugar más destacado de entre las instituciones de investigación y postgrado, no sólo en el país sino también en el contexto internacional.

Lo que acabo de decir no es sólo mi apreciación personal. Así lo expresó un notable investigador, Profesor Emérito de la UNAM, Miembro de El Colegio Nacional, de la Academia Mexicana de la Lengua y del Consejo Consultivo de Ciencias (CCC), en su artículo publicado el miércoles 29 de noviembre de 2006 en el diario *La Crónica*, me refiero al Dr. Ruy Pérez Tamayo y lo cito textualmente:

"El único centro público dedicado a la investigación científica no dirigida, establecido por el gobierno de nuestro país durante todo el siglo XX fue el Cinvestav. Debe señalarse que este centro fue originalmente planeado como una escuela de graduados del IPN y que gracias a la visión y a la autoridad de Arturo Rosenblueth, quien fue su primer director, la estructura y los objetivos del centro se cambiaron por completo, para convertirlo en lo que actualmente es, una institución científica del más alto nivel de excelencia y con un prestigio internacional."

El Cinvestav nació hace 45 años como una Institución privilegiada, pues se le concedió, desde su nacimiento, plena autonomía académica, de gestión,

presupuestal, administrativa. Esta estructura mantenida con una gran pulcritud a través de 45 años por los diferentes directores ha llevado al Cinvestav a lograr un desempeño ejemplar y a ser considerado por muchas instancias extranjeras como una institución de calidad mundial. Deseo firmemente que nuestra comunidad, el Dr. René Asomoza y la Sra. Secretaria Vázquez Mota mantengan al Cinvestav autónomo, independiente y comprometido fuertemente con sus tareas de educación y trabajo para el desarrollo de nuestro país.

Cómo no emocionarse si todos sabemos que lo más difícil es obtener el reconocimiento de los demás. Qué orgullo para todos nosotros que uno de los más distinguidos investigadores del país se exprese así y coincida con el reporte de evaluación 2006, realizado por la OCDE, emitido el martes 28 de noviembre de 2006, hace solamente 10 días, que expresa textualmente que el Cinvestav es la institución de México con los mejores investigadores y los mejores estudiantes del país. Por esa mención y por ese esfuerzo nuestros investigadores y nuestros estudiantes merecen el reconocimiento y solicito para ellos un aplauso.

Sólo para ubicar los resultados mencionaré que en los últimos 4 años, el Cinvestav otorgó 35% de los 6 000 grados en sus 45 años de existencia. Es evidente que este alto desempeño es producto de la visionaria actitud del Dr. Arturo Rosenblueth, a quien hoy me es grato recordar, ya que seguramente influenciado por el paradigma de calidad con el que operaba la Universidad de Harvard en donde fue investigador, consiguió para el Cinvestav la organización y la capacidad de gestión que garantizaría el cumplimiento de los objetivos que el Gobierno Federal marcó al Cinvestav a través de su decreto. Asimismo, quiero compartir con ustedes que me ha contagiado el entusiasmo con el que recientemente varios gobernadores han manifestado su interés porque el Cinvestav establezca unidades y que su actividad sea un factor importante en la promoción de las



Rosalinda Contreras ex-directora del Cinvestav, Josefina Vázquez Mota, Secretaria de la SEP, y René Asomoza Palacio, Director del Cinvestav

inversiones nacionales y extranjeras y con ello se contribuya al desarrollo en las regiones que gobiernan. Lo único que lamenta es que en 4 años sólo haya podido impulsar el desarrollo del Laboratorio Nacional de Genómica del Cinvestav en Guanajuato, la Unidad Monterrey y la Unidad Tamaulipas en Ciudad Victoria, el nuevo campus de Mérida, la estación oceanográfica, el nuevo campus Coahuila, y las nuevas construcciones de Querétaro. Estos son desarrollos que se han iniciado con los mejores augurios, ya que cuentan con la participación financiera de los gobiernos de los estados en los que se ubican y con la generosa y visionaria participación de la Secretaría de Educación Pública, que durante los años 2005 y 2006 canalizó recursos al fideicomiso Cinvestav para garantizar la continuidad y la viabilidad de estas nuevas unidades del Cinvestav.

La ciencia y la tecnología no admiten posiciones políticas, su motivación sólo puede ser el desarrollo de México. El impulso a la ciencia y la tecnología sólo puede ser logrado con el esfuerzo redoblado en nuestras actividades y con la generosa voluntad de los individuos.

Expreso mis mejores deseos de éxito en su gestión al Dr. René Asomoza, con su audacia y fortaleza no solamente se consolidarán los desarrollos iniciados en estos cuatro años, sino que se ampliará la cobertura del Cinvestav en el territorio nacional.

No tengo dudas de que en los próximos años el Cinvestav se constituirá en todo un sistema de centros de investigación con una amplia cobertura en el territorio nacional para orgullo de la Secretaría de Educación Pública, del Gobierno Federal y de México.

Hago público mi agradecimiento a los miembros de la Junta Directiva y en especial al Dr. Reyes Taméz Guerra por su apoyo permanente a las acciones de desarrollo que propuse se llevaran a cabo.

Agradezco a todo el personal administrativo que con extensas jornadas de trabajo contribuye a también al esfuerzo institucional.

Agradezco a los jefes de Departamento por su colaboración y especialmente a los directores de las Unidades Cinvestav por su magnífica dirección y capacidad de gestión. Estoy segura que este esfuerzo también será reconocido por el Dr. Asomoza en los próximos años.

Permítame Sra. Secretaria en este momento expresar mi agradecimiento a los gobernadores Patricio Patrón Laviada, Eugenio Hernández Flores, Natividad González Parás y a los ex Gobernadores Enrique Martínez y Martínez, Juan Carlos Romero Hicks, a los ex Secretarios Javier Usabiaga, Francisco Javier Mayorga Castañeda, Alberto Cárdenas Jiménez, Sergio García de Alba, a Víctor Villalobos, asesor de la Secretaría de Agricultura, y a los ex Directores de Conacyt Jaime Parada y Gustavo Chapela, sin su valiosa ayuda no habría sido posible lograr la expansión del Cinvestav. Estoy segura que el Dr. René Asomoza continuará logrando la amistad y colaboración de las autoridades federales y regionales y de los Directores de Unidad para llevar a buen término los proyectos actuales e iniciar otros que permitirán al Cinvestav continuar con su vocación de verdadera Institución Nacional.

A ustedes señoras y señores investigadores agradezco su esfuerzo y su dedicación. Por mi parte pueden estar seguros que he dedicado mi mayor esfuerzo a engrandecer al Cinvestav y espero haber cumplido con sus expectativas.

Me siento orgullosa de trabajar en una institución vigorosa y en pleno crecimiento. Es un privilegio y un orgullo para mi entregar, ante usted Sra. Secretaria y ante mi comunidad, los resultados esperados de la casa de estudios más prestigiada de nuestro país. La Secretaria a su cargo nos ha otorgado apoyos importantes y afortunadamente creo que hemos podido corresponder a esa expresión de confianza.

Muchas gracias.

Contribuciones

Las contribuciones para la revista *Cinvestav* deberán enviarse a las oficinas centrales o a la dirección de correo electrónico: msantos@cinvestav.mx

Textos

- Deben entregarse en formato de Word con extensión .doc o .rtf, vía correo electrónico o en CD-ROM.
- Cuando se trate de artículos de investigación; la extensión máxima será de 15 cuartillas, los artículos de difusión tendrán 10 cuartillas y Noticias un aproximado de 50 palabras por nota.
- Si el texto incluye tablas, éstas se entregarán en archivo por separado, en texto corrido y con una impresión adjunta que muestre la forma en que debe quedar la tabla. Además, en el original debe señalarse su ubicación. La indicación también es válida para esquemas y cuadros.
- Todo artículo requiere ilustraciones o fotografías para su inserción (ver imágenes y gráficas).
- Las notas se incluirán al final del trabajo, antes de la bibliografía o de las referencias debidamente numeradas.
- Las referencias deben apegarse a los modelos siguientes:

Libro:

Wiener, Norbert, *Cibernética: o el control y la comunicación en animales y máquinas*, Barcelona, Tusquets, 2003.

Artículo de revista:

Ádem, José, 1991, "Algunas consideraciones sobre la prensa en México", *Avance y Perspectiva*, vol. 10, abril-junio, pp. 168-170.

Se sugiere que las referencias sean cuidadosamente revisadas por los autores y que los títulos de los artículos y los nombres de las publicaciones no se abrevien.

Resumen curricular

Todos los textos deben incluir datos del autor: nombre completo, grado académico, adscripción y cargo que desempeña, teléfono y correo electrónico. El resumen no debe rebasar más de 50 palabras.

Imágenes y gráficas

Deberán venir en archivos por separado tipo JPG o TIFF, a 300 dpi de resolución con tamaño de 20 cm de base (como mínimo). Las imágenes tomadas con cámaras digitales deberán tener la resolución máxima.
NO SE ACEPTARÁN IMÁGENES DE INTERNET.

Cinvestav

revista@cinvestav.mx

T/F (55) 50 61 33 71

www.cinvestav.mx/publicaciones

Av. Instituto Politécnico Nacional 2508

San Pedro Zacatenco, C.P. 07360

México, DF, México

[Nota]

En breve aparecerá una versión electrónica de la revista *Cinvestav*, donde los lectores tendrán la oportunidad de contribuir con sus reflexiones acerca de los temas que se abordan en los artículos.

POR TODO LO QUE DEPENDE DE ELLOS,
TENEMOS A LOS PILOTOS MÁS EXPERIMENTADOS DEL MUNDO.



Capacitados constantemente en los simuladores más avanzados del mundo, nuestros pilotos son hoy en día, reconocidos internacionalmente por sus experimentadas trayectorias; por algo otras aerolíneas capacitan a sus pilotos con nosotros.

MEXICANA 
La primera siempre será la primera.



Pan-American Advanced Study Institute

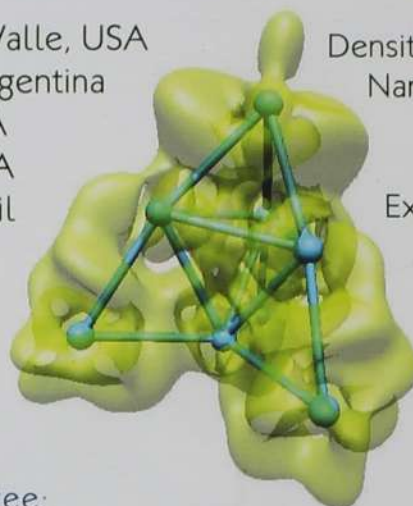
ELECTRONIC STATES AND EXCITATIONS ON NANOSTRUCTURES

June 11-22, 2006

LECTURERS:

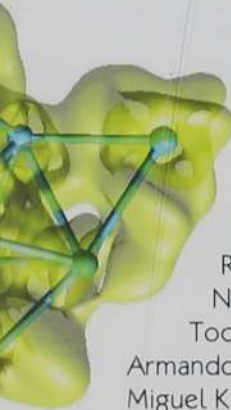
(partial and tentative list)

D. Vanderbilt, USA	C. G. Van de Walle, USA
F. Himpsel, USA	K. Hallberg, Argentina
L. Reining, France	I. Schuller, USA
S. Savrasov, USA	N. Spaldin, USA
A. Selloni, USA	D. Ugarte, Brazil
G. Kotliar, USA	K. Burke, USA
S. Datta, USA	S. Louie, USA
E. Artacho, UK	R. Car, USA
A. Rubio, Spain	R. Martin, USA



TOPICS:

Density Functional Theory
Nanotechnology
Nanomagnetism
Applications
Experiments
LDA+U
TDDFT
GW



International Committee:

Mariana Weissmann, Argentina
Luis Quiroga, Colombia
Anabella Selloni, USA
Patricio Vargas, Chile
Ruben Weht, Argentina
Nicola Marzari, USA
Todd Martinez, USA
Armando Ferraz, Brazil
Miguel Kiwi, Chile

Local Committee:

Rumen Ivanov, UAZ
Noboru Takeuchi, UNAM
Aldo H. Romero, CINVESTAV
Sergio Ulloa, Ohio University
Alberto Vela, CINVESTAV
Stoyan Vlaev, UAZ

Sponsored by



for more information: gro.cinvestav.mx/~pasi2

Zacatecas, Mexico

Application Deadline: March 16, 2006

*Financial Support Available

