

VANCE

y perspectiva

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
Instituto Politécnico Nacional

Investigación en el acelerador LHC

Farmacogenómica
de la población mexicana

Los Premios Nobel
en Ciencias 2008



AVANCE y perspectiva

Sumario

- 84 Características farmacogenómicas
en la población mexicana
C. Hoyo Vadillo

- 92 El Garrafón: un arrecife de El Caribe mexicano
A. I. Gutiérrez Castro *et al.*

EL CINVESTAV EN EL ACELERADOR LHC

- 100 El Gran Colisionador de Hadrones:
el proyecto científico más ambicioso de nuestro
tiempo
G. Herrera Corral

- 106 ¿Es peligroso el acelerador LHC del CERN?
L. M. Montaña Zetina

- 116 El experimento CMS
A. Sánchez Hernández

- 124 El legado de HERA
J. G. Contreras

LOS PREMIOS NOBEL EN CIENCIAS 2008

- 130 Pioneros en la construcción de la teoría moderna
de las partículas elementales
A. García

- 134 Descubridor del origen infeccioso del carcinoma
de cérvix
N. Villegas Sepúlveda

- 138 La linterna verde de las ciencias biológicas
y de la salud
A. Guerrero Hernández y G. Cota Peñuelas

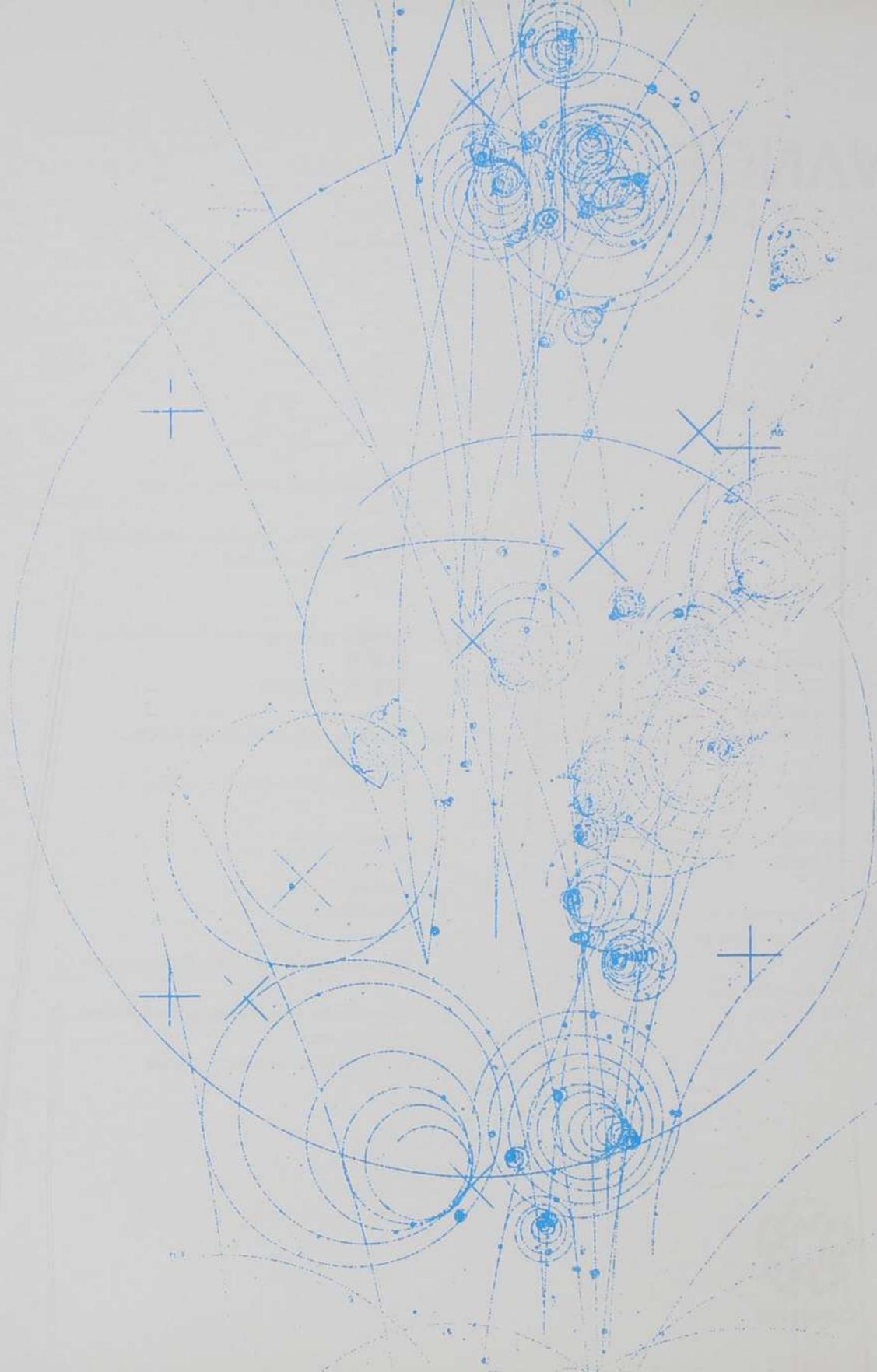
ESPACIO ABIERTO

- 144 Sin Dios
S. Weinberg

NUMERALIA: CIENCIA Y EDUCACIÓN SUPERIOR

- 152 Universidades mexicanas en las clasificaciones
internacionales
F. Collazo Reyes y J. Collazo Rodríguez





Consejo editorial

José Víctor Calderón
Bioquímica

Ricardo Cantoral Uriza
Matemática Educativa

Marcelino Cerejido
Fisiología

Carlos Artemio Coello Coello
Computación

Francisco Javier Espinosa Beltrán
Unidad Querétaro

Alonso Fernández Guasti
Farmacobiología

Julia Elena Fraga Berdugo
Ecología Humana
Unidad Mérida

Eugenio Frixione
Metodología y Teoría
de la Ciencia

Gerardo Gold Bouchot
Recursos del Mar
Unidad Mérida

José Mustre de León
Física Aplicada
Unidad Mérida

Fabiola Constanza Nava Alonso
Ingeniería Cerámica
Unidad Saltillo

Juan José Peña Cabrales
Biotecnología y Bioquímica
Unidad Irapuato

Cristina G. Reynaga Peña
Unidad Monterrey

José Ruiz Herrera
Ingeniería Genética de Plantas
Unidad Irapuato

Martha Rzedowski Calderón
Control Automático

Arturo Sánchez Carmona
Unidad Guadalajara

Revista Avance y Perspectiva

Miguel Ángel Pérez Angón
Susana Quintanilla
Dirección editorial

Héctor Martínez Martínez
Jefe de Difusión

Gordana Ségota
Corrección

María Calderón, ReD basic color
Diseño

Luisa A. Bonilla Canepa
Josefina Miranda López
Coordinación editorial

revista@cinvestav.mx
mirandal@cinvestav.mx
www.cinvestav.mx/publicaciones
Teléfono y fax: 5747 3371

Cinvestav

Dr. René Asomoza Palacio
Director General

Dr. Arnulfo Albores Medina
Secretario Académico

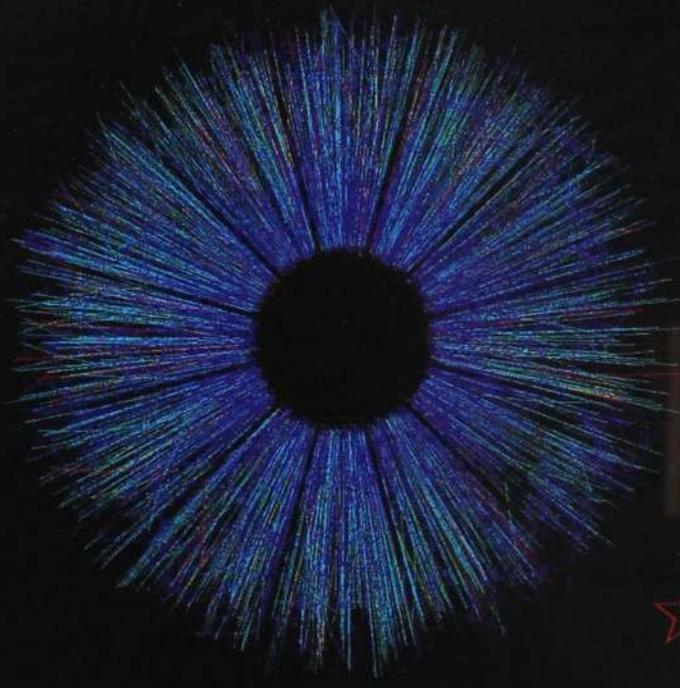
Dr. Marco Antonio Meraz Ríos
Secretario de Planeación

C. P. Guillermo Augusto Tena y Pérez
Secretario Administrativo



La revista *Avance y Perspectiva*, antes *Cinvestav*, órgano oficial del Cinvestav-IPN (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional) 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 julio-septiembre, nueva época, volumen 1, número 2, se terminó de imprimir en diciembre de 2008. Tiraje: 5000 ejemplares. Certificado de Reserva de Derecho de Autor en Trámite, expedido por la Dirección General de Derechos de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Certificado de Licitud de Título y Certificado de Licitud de Contenido en Trámite, 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 Aquiles Serdán, núm. 28, Col. Santo Domingo, Azcapotzalco, C. P. 02160, Del. Gustavo A. Madero, México, D. F. Sede del Cinvestav: Av. Instituto Politécnico Nacional, núm. 2508, Col. San Pedro Zacatenco, C. P. 07360, Del. Gustavo A. Madero, México, D. F. Sitio web: www.cinvestav.mx

Las ilustraciones de esta edición corresponden a trayectorias de partículas elementales observadas directamente o generadas por computadoras en colisiones relativistas.
Cortesía: interactions.org



Características farmacogenómicas de la población mexicana

Dr. Carlos Hoyo Vadillo

Mestizaje

La población mexicana tiene una variabilidad genética considerable debido a su extenso mestizaje trihíbrido. Esto tiene consecuencias en la biología asociada con la aparición de enfermedades y en el uso de fármacos. En este artículo se revisarán los factores genéticos presentes en la población mexicana y su relación con la expresión o funcionalidad de las proteínas metabolizadoras de fármacos, que son un modelo para entender las relaciones más complejas entre genoma y salud.

El hombre llegó a América 30 mil y 43 mil años atrás (figura 1), como lo muestran los datos publicados por varios autores entre ellos Bonatto y Salzano.¹ Su llegada se vio facilitada por el congelamiento temporal del estrecho de Behring quedando posteriormente aislados de los habitantes de Beringia, quienes luego, en una segunda migración, darían origen al grupo Na-Dene, y todavía en una tercera migración a los esquimales; todos estos grupos están emparentados con los actuales chuckchi, que habitan la llamada Behringia en el extremo oriental de Siberia.¹

El Dr. Rubén Lisker² describe una clasificación de la población mexicana en cinco macrogrupos, los cuales están separados entre sí por más de cinco mil años: macromaya, macrozapoteco, tarasco, macronahua y macroyuma. Durante la colonia, los mestizos eran realmente la minoría pero en el siglo XIX la proporción se invirtió. En la actualidad hay unos 12 millones de indígenas; sin embargo, todos ellos son portadores en proporciones variables de herencias española y africana, pues las etnias siempre estuvieron en contacto con los conquistadores, con los nuevos migrantes africanos y sus descendientes. Históricamente, entre los siglos XVI y XVII, la Nueva España era el principal receptor de esclavos en el Nuevo Mundo, pues desde el siglo XVI, fray Bartolomé de las Casas propuso importar esclavos del occidente de África como medida de protección a los indios.³ Esta importación de africanos originó una extensa mezcla con los indígenas dando

El Dr. Carlos Hoyo Vadillo es investigador titular de la Sección Externa de Farmacología del Cinvestav. Correo electrónico: citocromo@cinvestav.mx



Figura 1. Los españoles se mezclaron ampliamente con los habitantes originarios de México.

origen a una complicada clasificación de castas. En la actualidad, en la ciudad de México un habitante típico lleva al menos 1% del componente genómico de esos ancestros africanos, y en algunas regiones ésta componente puede llegar a 20% o más. El componente principal es el indígena, con un promedio de presencia de 65% para los habitantes de la ciudad de México. Hay que resaltar que esta composición depende fuertemente de cada región y de factores sociales.

Por otra parte, la evolución de las poblaciones humanas hace que algunas formas de genes y sus proteínas asociadas acumulen o pierdan ciertas variedades. Aquí se hablará especialmente de una superfamilia de proteínas conocidas como citocromos P450 (abreviadas CYPs). Algunos de sus "sabores" están sobre representados o subrepresentados, como sucede en África, Europa y Asia. En esas poblaciones relativamente homogéneas se han registrado las frecuencias de las principales isoformas, CYP2D6, CYP2C9, CYP2C19 y la más complicada CYP3A4/5. Hay que tener en cuenta que la población mexicana tiene justamente los tres componentes, si bien la contribución oriental difiere por la deriva genética con respecto a los asiáticos contemporáneos.

Hace unos 35 mil años, los primeros colonizadores de América llegaron a la Tierra del Fuego, después de unos mil

años de haber atravesado el estrecho de Behring. La migración implicó una elevada mortalidad con la pérdida de algunas variantes poco favorecedoras para las condiciones de hambruna que prevalecían al final de la glaciación. De aquí surgió el hipotético enriquecimiento de los genes frugales (*trifty*, en inglés), dando como resultado la eliminación de muchos sujetos y, por lo tanto, la eliminación de muchas variantes genéticas de la población original. Esto se conoce como el "cuello de botella" genómico de esta población. Una considerable disminución de estas poblaciones ocurrió posteriormente con la colonización por parte de los europeos en el siglo XVI. Actualmente, varios países de América tienen poblaciones predominantemente caucásicas, pero el resto son —unos más que otros— trihíbridos, como México, por ejemplo. Sin embargo, la región norte tiene una disminución notable en el componente indígena y afroamericano, mientras que otras regiones del país son mayoritariamente indígenas, pero siempre con cierta "contaminación" española.

La realidad es que ninguna población mexicana es completamente pura, pues, como una complicación adicional, hace unos 11 mil años se recibió la segunda oleada de emigrantes llegados de Asia: el grupo Na-Dene. En la actualidad, los indios pima presentan una alarmante prevalencia de diabetes

tipo 2, acompañada de sobrepeso y obesidad; ellos pertenecen a la segunda migración asiática hacia América. Sin embargo, la participación de los factores genéticos todavía es debatida por algunos investigadores al afirmar que el estilo de vida tiene un impacto mayor en el índice de masa corporal y el desarrollo de la diabetes tipo 2. Ciertamente, es difícil discriminar el papel de estos factores, pero estudios realizados con ésta y otras etnias han demostrado la relación entre los polimorfismos (SNPs) y la funcionalidad de proteínas; éste es el caso de proteínas desacoplantes de la mitocondria: en los pima se documentó que esto produce una menor disipación de la energía del ATP en forma de calor, lo cual produce acumulación de grasa.⁴

Los mestizos mexicanos (figura 1) presentan una combinación de las isoformas de los CYPs de sus ancestros. Por las diferencias en el mestizaje es difícil saber qué isoformas expresan y, por lo tanto, a qué velocidad se espera que metabolicen un determinado fármaco.

En general, las poblaciones humanas tienen cada una sus patrones característicos para las mutaciones espontáneas que ocurren en sus proteínas, las cuales se originan en las mutaciones en el ADN (figura 2). La frecuencia de las mutaciones en el genoma, es decir, en el conjunto de cromosomas, son muy irregulares, ya que dependen no sólo de las regiones geográficas donde habitan las poblaciones particulares. Ahora están muy vigentes las mutaciones llamadas SNPs, que son los cambios que ocurren en una sola posición del ADN. Estos SNPs forman patrones dentro de cada población y, en el caso de las poblaciones mestizas, más o menos homogéneas, forman patrones más complicados tal y como se observa, en general, en las poblaciones de África, Europa y el Lejano Oriente. Estas características son de mucho interés, pues se sabe que las mutaciones de un solo nucleótido están relacionadas con la susceptibilidad a enfermedades y la respuesta a los medicamentos, lo cual se conoce como farmacogenómica.

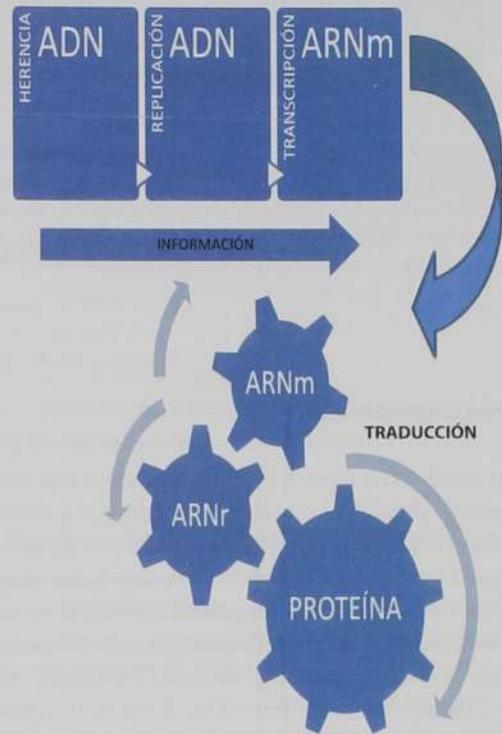


Figura 2. Teorema central de la biología molecular. La información genética fluye del ADN al ADN durante la herencia y la división de las células (replicación), luego al ARN mensajero (ARNm) y finalmente se traduce en proteínas funcionales o estructurales.

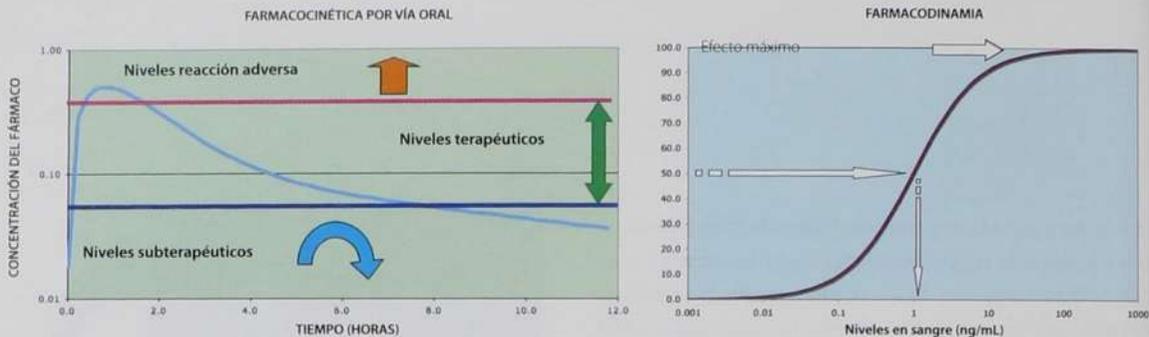


Figura 3. (a) Perfiles de los niveles sanguíneos de un fármaco típico administrado por vía oral. La velocidad del metabolismo determina si los niveles alcanzan el intervalo terapéutico, si lo superan o si quedan por debajo más tiempo del esperado. (b) Relación entre los niveles sanguíneos y el efecto farmacológico. Esta relación tiene un límite para la eficacia conocido como efecto máximo. La potencia se mide en términos de la concentración efectiva 50, que es la que produce la mitad del efecto máximo.

Farmacogenómica

En la actualidad, la forma más común de encontrar la dosis correcta de un medicamento para cada paciente es mediante prueba y error. Al empezar con una dosis baja, para disminuir sus reacciones adversas, se observa la respuesta farmacológica (figura 3); si no se obtiene la respuesta esperada, el médico procede a incrementar la dosis administrada. Debe notarse que cuando se presentan reacciones adversas, el paciente puede abandonar su tratamiento debido a las molestias y lo mismo ocurre cuando el paciente no nota alivio. Ahora se sabe que las características peculiares de cada individuo (idiosincrasia) dependen de su perfil genómico. Esto es, dependen principalmente de las enzimas que determinan la eliminación de los fármacos. Las enzimas principales son los citocromos P-450 (CYPs), que se encargan de oxidar esas moléculas para hacerlas más solubles en agua y así eliminarlas por filtración renal. Los citocromos se dividen en familias, como lo indica el primer nombre en su abreviatura. La más abundante es la tres y la más variable es la dos (figura 4).

Originalmente, los CYPs tienen una función preponderante en la síntesis de hormonas esteroideas y de prostaglandinas, además de limpiar al organismo de toxinas; sin embargo,

una reacción colateral a la desintoxicación es la producción de metabolitos carcinogénicos, pues los cambios en algunos contaminantes, como los que se encuentran en el humo del tabaco, se convierten en potentes sustancias carcinogénicas, que por los cambios adquiridos en su solubilidad pueden ahora acceder al núcleo de la célula atravesando barreras biológicas que antes no podían atravesar.

El proyecto de secuenciación del genoma humano comprendió el desciframiento de la información genética de todos los cromosomas mediante la lectura de las cuatro bases que forman el ácido desoxirribonucleico. Uno de los motores principales para alentar este proyecto fueron las promesas de la farmacogenómica de alcanzar un conocimiento preciso de las respuestas del organismo a los fármacos atribuibles a su genética. La farmacogenómica estudia las diferencias en el metabolismo de fármacos que dependen de variaciones en el genoma, así como las diferencias entre individuos en su respuesta a los medicamentos, a una misma concentración de fármaco en el sitio de acción. Entre las variaciones genómicas más comunes están los polimorfismos de una base (SNP), que han llamado la atención de los biólogos de fines del siglo XX, quienes buscan asociarlas con enfermedades o con factores de protección e incluso como ventajas en el desempeño deportivo.

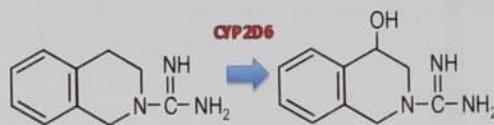
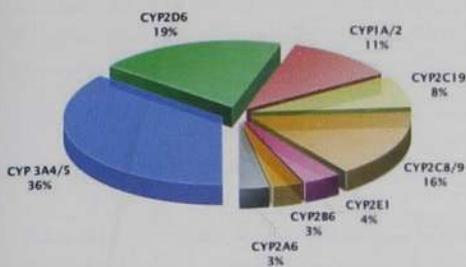


Figura 5. Estructura de la debrisoquina y de su metabolito principal. Reproducido con permiso de la revista *Lancet*.⁵

Figura 4. Proporción de la importancia de los citocromos (CYP) en función del número de sustratos y de su grado de expresión. El CYP3A4 se expresa de manera constante en el hígado y el intestino delgado, de manera que siempre están allí para oxidar sustratos inespecíficos en sus correspondientes sitios activos.

mediante el uso de enzimas de restricción o por otros métodos que utilizan sondas con fluorescencia.

Citocromo de la nicotina

El principal metabolito de la nicotina, la cotinina, se produce por un citocromo estudiado en 1977. Mahgoub y colaboradores⁶ administraron el antihipertensivo debrisoquina (figura 5) a una dosis de 10 mg a 94 voluntarios sanos en Inglaterra, para medir posteriormente en la orina los niveles del fármaco y de su metabolito, la hidroxidebrisoquina (figura 5). Ellos calcularon el índice metabólico, esto es: la concentración del fármaco entre la concentración de su metabolito para cada participante. Finalmente se construyó un histograma de frecuencias con los índices metabólicos, como se muestra en la figura 6. La mayoría de los voluntarios presentaron índices metabólicos entre cero y 10, mientras tres sujetos tuvieron índices metabólicos mayores a 20. Esto constituye una distribución de frecuencias con dos picos, originada por dos fenotipos: el de la mayoría se denomina metabolizador extenso y el otro metabolizador deficiente. Mediante un análisis de pedigree en tres familias se demostró que su herencia es mendeliana, siendo el fenotipo

La historia de la farmacogenómica se ilustra con el caso de la alcaptonuria.⁵ Éste es un padecimiento debido al metabolismo deficiente del aminoácido tirosina, con herencia mendeliana recesiva, donde la orina se vuelve marrón al contacto con el aire. En 1902, el Dr. Archibald Garrod del Hospital de San Bartolomé en Londres descubrió que la alcaptonuria se debía a factores genéticos que implicaban la función no adecuada de una enzima. De hecho, propuso el concepto de error innato en el metabolismo. Ahora se sabe que la alcaptonuria se debe a que la oxidasa del ácido homogentísico no transforma de manera adecuada a la tirosina, lo cual origina un tipo de artritis.

El ejemplo clásico de la farmacogenética —antesora de la farmacogenómica— es el de los acetiladores rápidos y lentos de las sulfamidas. Este polimorfismo fue descubierto por Harris y Evans en los años cincuenta del siglo XX, al observar que algunos pacientes que recibían la sulfamida isoniazida, la acumulaban en el riñón mientras que otros la eliminan rápidamente en la orina. Estas diferencias se originan por polimorfismos, en este caso en la enzima *N*-acetil transferasa isoforma 2, y son reflejo de los cambios en una sola base.

Los SNPs ocurren, en promedio, uno cada 2 mil bases del genoma. Los SNPs se determinan por la secuenciación del ADN,

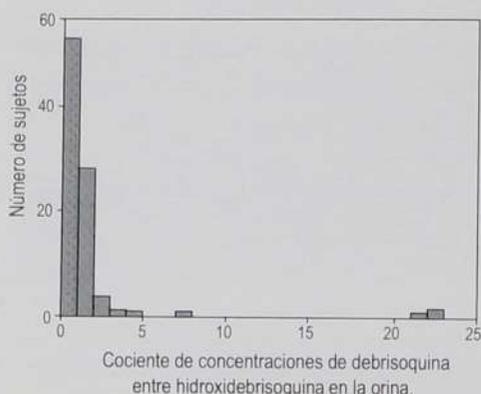


Figura 6. Resultado de la frecuencia de metabolizadores extensos y metabolizadores deficientes dependientes de *CYP2D6*. Actualmente se conoce un tercer genotipo, el de los metabolizadores ultra extensos. Reproducido con permiso de la revista *Lancet*.⁸

extenso el dominante. El gen correspondiente se aisló y en la actualidad se conocen unos 70 SNPs de este citocromo, además de sus duplicaciones, en cuyo caso la actividad enzimática es del doble. Y esto puede hacer que un fármaco no tenga efecto. Se sabe que el *CYP2D6* afecta los niveles de nicotina en la sangre después de fumar, de manera que los sujetos con una actividad baja de la enzima alcanzan niveles más altos de nicotina y entonces fuman menos,⁷ mientras los sujetos con metabolismo extenso tienden a fumar más. Desafortunadamente, los sujetos con metabolismo extenso tienen una mayor predisposición al cáncer de pulmón.⁸ Un estudio reciente en mexicanos encontró la mayoría de las mutaciones descritas en poblaciones europeas y una frecuencia de metabolizadores deficientes más parecida a la de Europa que a la de Asia.⁹

Citocromo de la nifedipina

Hace tiempo se analizó la farmacocinética de la nifedipina (Adalat®) en 30 voluntarios sanos.¹⁰ Se observó un polimorfismo en la gráfica de frecuencias para la biodisponibilidad: un grupo mayoritario de sujetos tenía áreas bajo la curva ma-

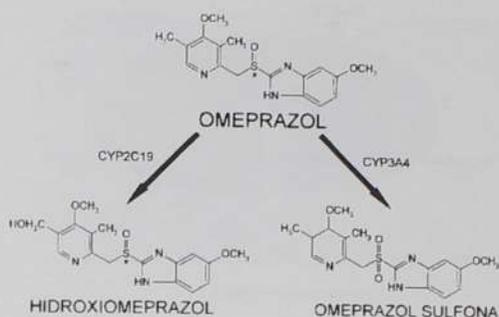


Figura 7. Metabolismo del omeprazol racémico. El isómero *R* tiene afinidad por el *CYP3A4* y el *S* por el *CYP2C19*.

yores a los reportados en la literatura y otro grupo minoritario, semejantes a las poblaciones europeas. Se observó que la antimoda, o sea el valor que separa ambas poblaciones, estaba en el mismo valor que el descrito previamente por Kleinbloesem y colaboradores,¹¹ realizado con voluntarios sanos en Holanda. Sin embargo, nosotros encontramos una mayoría de sujetos metabolizadores lentos (92%) en contraste con 17% observado en Holanda. En su estudio, Kleinbloesem había correlacionado a los sujetos con el área bajo la curva mayores con niveles bajos de su metabolito principal. Es decir, al no producirse suficiente metabolito, el principio activo se acumula y alcanza picos más altos (los cuales producen dolor de cabeza y enrojecimiento de la cara) y, por lo tanto, aparentado una biodisponibilidad mayor con un área bajo la curva mayor.

La farmacocinética de los sustratos del *CYP3A4* depende de algunos componentes en la dieta. El ejemplo clásico es la interacción entre dihidropiridinas –como nifedipina– y el jugo de toronja –. El Dr. Bailey¹² descubrió esto utilizando felodipina y al probar jugo de toronja estándar y jugo de toronja concentrado. De hecho, las etiquetas de varios fármacos dependientes de *CYP3A4* indican esta interacción. Se sabe que ciertos SNPs en el *CYP3A4* pueden representar un riesgo

para contraer cáncer de próstata especialmente en poblaciones africanas, pues una alteración en el metabolismo de la testosterona es un factor de riesgo para este tipo de cáncer.¹³

Citocromo del omeprazol

El CYP2C19 fue responsable de la cancelación del desarrollo industrial del antiépiléptico mefenitoína debido a que las poblaciones orientales presentaban reacciones adversas muy serias. Esto se producía por la acumulación de un metabolito tóxico y debido a la incapacidad de un 30% de los voluntarios japoneses para eliminarlo. En la actualidad, se ha utilizado la evaluación del metabolismo del omeprazol (inhibidor de la bomba de protones en el estómago y por tanto antiácido) y el hidroxiomeprazol (figura 8). En mexicanos se ha observado¹⁴ una muy baja frecuencia de metabolizadores deficientes y, de hecho, el alelo 3 muy común en orientales no está presente. Además se ha observado 4% de metabolizadores ultraextensos que se deben, posiblemente, a la mutación 14 del CYP2C19.

Citocromo de la cafeína

El CYP2A1 metaboliza xenobióticos y participa de manera importante en el complejo metabolismo de la cafeína.¹⁵ Hay

que mencionar que la N-acetil transferasa (NAT-2) también interviene en estas rutas de eliminación,¹⁶ pero el estudio de los metabolitos de cafeína ha sido muy útil para entender la biología del CYP1A2 utilizando un ratón trasgénico que no puede eliminar cafeína.¹⁵

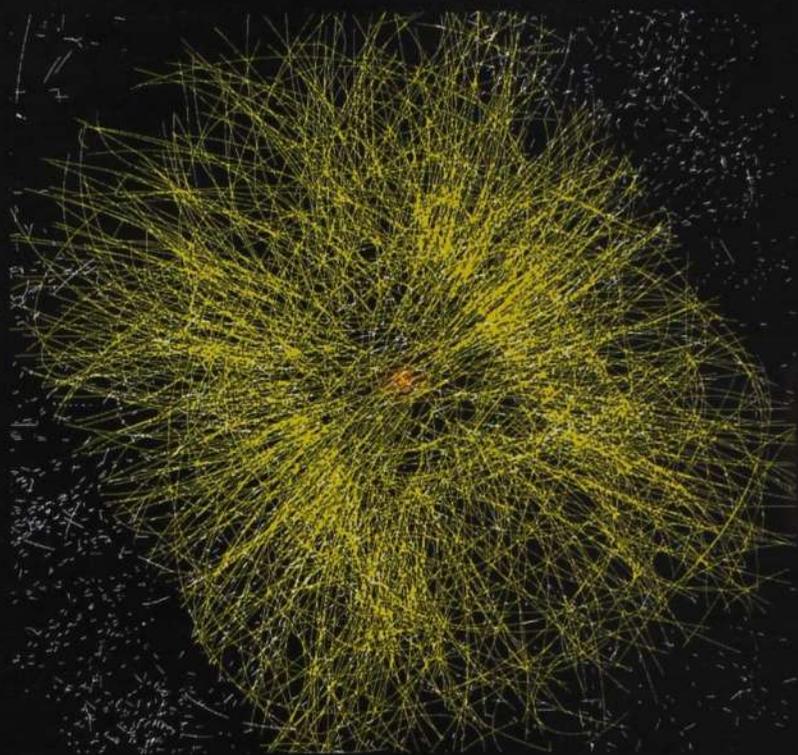
Citocromo del alcohol

Al igual que el CYP1A1, el CYP2E1 elimina del organismo contaminantes ambientales y participa en un 30% de la eliminación del etanol. La enzima más importante en la eliminación del etanol es la deshidrogenasa alcohólica, mientras la aldehído deshidrogenasa disminuye las reacciones posteriores a una intoxicación mediante la eliminación de los molestos aldehídos. Se han identificado polimorfismos en la población mexicana. En mexicanos¹⁷ se utilizó la cloroxazona como marcador de riesgo de exposición a benceno y otros solventes, pues la actividad del CYP2E1 es muy importante para eliminar estos contaminantes.

Respecto al alcohol, se sabe que las personas que lo metabolizan un poco más lento de lo normal tienen una cierta protección para no volverse adictos, porque los efectos secundarios los desalientan; esto ocurre entre los japoneses donde una cara roja es un gran deshonor, razón por la cual no acostumbran tomar alcohol sin alimentos, pues éstos disminuyen la biodisponibilidad del sake.

REFERENCIAS

1. S. S. Bonatto, FM. *Proc. Nat. Acad. Sci. EUA* 64, 1866 (1977).
2. R. Lisker, *Estructura genética de la población mexicana* (Salvat, 1981).
3. V. Riva Palacio, *México a través de los siglos* (Publicaciones Herrerías, 1972).
4. K. Walder, *Hum. Mol. Genet.* 7, 1431 (1998).
5. J. M. Fernández-Canon *et al.*, *Nat. Genet.* 14, 19 (1996).
6. A. Mahgoub, *Lancet* 2, 584 (1977).
7. C. Boustead, H. Taber, J. R. Idle, S. Cholerton. *Pharmacogenetics* 7, 411 (1997).
8. S. J. London, *Carcinogenesis* 18, 1203 (1997).
9. M. López, J. Guerrero, H. Jung-Cook, M. E. Alonso, *Eur. J. Clin. Pharmacol.* 61, 749 (2005).
10. C. Hoyo-Vadillo *et al.*, *J. Clin. Pharmacol.* 29, 816 (1989).
11. C. H. Kleinbloesem *et al.*, *Biochem. Pharmacol.* 33, 3721 (1984).
12. *Lancet* 337, 268 (1991).
13. F. Sata *et al.*, *Clin. Pharmacol. Ther.* 67, 48 (2000).
14. H. M. González *et al.*, *J. Clin. Pharmacol.* 43, 1211 (2003).
15. J. T. Buters *et al.*, *Pharmacogenetics* 6, 291 (1996).
16. *Pharmacogenetics* 2, 116 (1992).
17. D. Lucas *et al.*, *Toxicol. Lett.* 124, 71 (2001).



El Garrafón: un arrecife de El Caribe mexicano

Adriana Isabel Gutiérrez Castro, Daniel Torruco Gómez,
Julia Fraga Berdugo, Miguel Ángel Cabrera Vázquez y Alicia González Solís

Valoración económica y protección de los ecosistemas

El valor de nuestros sistemas naturales es incalculable, pero encontrar una justificación para su conservación y manejo sustentable puede ser una ardua tarea. Reconocidos o no, los sistemas naturales son la cuna y la fuente de la tradición, de la cosmovisión de los pueblos y del arte. Proporcionan medicamentos, alimentos e insumos para diversas actividades, así como bienes y servicios ambientales. A pesar de ello, no se les ha asignado a todos un valor económico que permita negociarlos o intercambiarlos de manera justa en el presente sistema de mercado internacional. La causa: carecen de un equivalente monetario.

Desafortunadamente, en el sistema económico carecer de ese equivalente monetario significa ser categorizado hacia niveles inferiores de utilidad, es decir, no ser valorado de manera adecuada. Esto ocasiona que muchos sistemas naturales registren impactos severos y generalmente irreversibles como consecuencia de las actividades que llevamos a cabo sin la conciencia sobre el valor y beneficio que representan. A esos valores que no encuentran expresión en nuestro sistema económico se les conoce como valores de no uso, debido a que no registran un beneficio económico, aun cuando sean importantes para algún grupo comunitario.

Al aplicar algún método de valoración a ecosistemas, especies, secuencias de ADN y servicios ambientales, buscamos su integración a los mercados internacionales formales, de

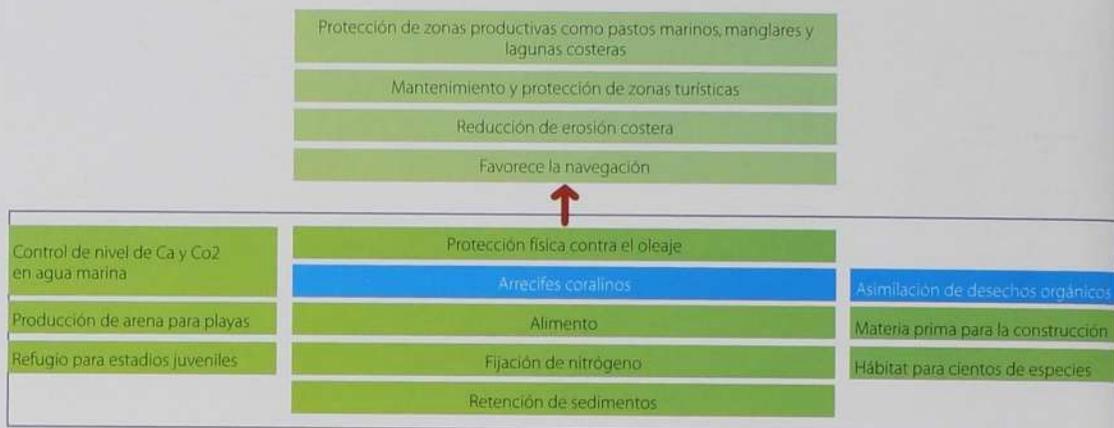


Figura 1. Beneficios arrecifales más importantes.

manera que sea posible la repartición justa de los costos y beneficios de su uso y conservación.^{1,2} Es imposible traducir a términos económicos todos los elementos o beneficios proporcionados por los sistemas naturales, dado el desconocimiento que se tiene de muchos de los procesos y funciones ambientales. El resultado es una aproximación al valor real y generalmente se requiere de un equipo multidisciplinario para desarrollar dicha tarea.^{3,4}

La aplicación de estos métodos de valoración económica puede facilitar el proceso de comprensión sobre los beneficios y servicios que ellos proporcionan, con el propósito de justificar políticas de conservación y protección de los sistemas naturales. Sin embargo, Lorenzo⁵ formuló acertadamente el problema que subyace en la valoración económica de los sistemas naturales: “[...] si el crecimiento exponencial de la extinción tiene una de sus raíces en prácticas relacionadas con actividades económicas: ¿podrán esas mismas fuerzas ser útiles en este esfuerzo en pro de la biodiversidad?” Esta certera observación podría indicarnos que la generación de resultados en el campo de la valoración económica, su interpretación y su uso para resolver problemas no deberán desarrollarse fuera de un contexto multidisciplinario.

Valor de los arrecifes coralinos

Aunque los arrecifes coralinos son sistemas naturales altamente biodiversos, productivos, de gran belleza escénica y generadores de incontables beneficios, sus valores económico, social, cultural y biológico son raramente apreciados. De todos los servicios que prestan, la protección física contra el oleaje es tal vez el más importante, porque proporciona beneficios al reducir la erosión costera. El significado más importante de la protección arrecifal es la diferencia en el valor de las actividades económicas que ocurren con o sin la protección del mismo^{6,7,8} (figura 1).

Si las comunidades y sus gobiernos estuvieran conscientes de esos valores, probablemente el futuro de los arrecifes coralinos no sería tan incierto.⁶ Desafortunadamente, el futuro de los arrecifes mexicanos corre la misma suerte. El desconocimiento sobre sus beneficios ha llevado a los arrecifes coralinos a enfrentar amenazas muy serias, desde la introducción de especies no nativas, contaminación, sedimentación y sobreexplotación de sus recursos hasta su transformación, en ese proceso de facilitación, para actividades recreativas y turísticas, muchas veces no reguladas.⁹



Figura 2. Parque Nacional Punta Cancún, Punta Nizuc y Costa Occidental Isla Mujeres. Ciudad de Cancún vista desde Parque Natural El Garrafón.



Figura 3. Parque Natural El Garrafón. Instalaciones construidas por la primera administración privada.



Figura 4. Parque Natural El Garrafón. Piscina construida al costado del arrecife y el muelle ubicado al extremo norte de la estructura arrecifal.

Arrecifes protegidos en la península de Yucatán

En nuestro país, en particular en la península de Yucatán, los sistemas arrecifales más importantes se albergan en el interior de diferentes áreas naturales protegidas. Entre ellos destacan las reservas de la biosfera Sian Ka'an y Banco Chinchorro, así como los parques nacionales Cozumel, Alacranes, Puerto Morelos, Xcalak y Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (figura 2). Aun cuando los arrecifes coralinos de este último parque nacional se encuentran menos desarrollados que los demás, constituyen importantes recursos biológicos y económicos debido a las particularidades que implica estar ubicado cerca del área de transición del Mar Caribe hacia el Golfo de México, además de la importante influencia y cercanía al polo turístico más importante de México: Cancún, Q. Roo.¹⁰ Entre sus arrecifes más conocidos se encuentra El Garrafón, una estructura bordeante de 235 metros de longitud que corre en forma paralela sobre la costa occidental de Isla Mujeres. Inicialmente fue administrado por el municipio de la isla y después fue concesionado a la iniciativa privada bajo la figura de dos empresas turísticas diferentes: Promotora Xel-Ha y Discovery Dolphin. Hoy, la concesión se encuentra en manos de esta última bajo el nombre de Parque Natural El Garrafón y con la característica de que no se trata de un destino primario de visita turística, pues los visitantes deciden conocerlo sólo después de recibir información sobre su ubicación y servicios en algún punto de la costa de Quintana Roo (figura 3).

Valoración de El Garrafón

La estimación del valor económico por unidad de área de un sistema natural carece de significado si no se interpreta en el marco del uso o beneficio que la sociedad obtiene de él. Por esta razón, los resultados del trabajo de investigación que aquí se presentan, además de estimar la magnitud del valor de uso (beneficio económico neto generado por las actividades recreativas que se realizan en la estructura arrecifal), identifican y monetizan los valores de no uso que la población asigna al

Tabla 1. Disposición de Pago Individual Anual (PIAA) de la población económicamente activa de Isla Mujeres, expresada en MN.

Razón por la que estarían dispuestos a cooperar	Tipo de valor	Cantidad
Para rehabilitar al arrecife de modo que sus hijos o nietos pudieran disfrutarlo tal como ellos lo hicieron	Valor de legado	\$86.7
Porque si se recupera, ellos quieren tener en el futuro la oportunidad de volver a nadar en él	Valor de opción	\$48.7
Porque como todos los arrecifes, El Garrafón tiene valor por ser parte de la naturaleza	Valor de existencia	\$42.5
Porque recuperarlo implica no perder un elemento unido a sus historias personales o familiares a lo largo de su vida en Isla Mujeres	Valor asociado a historia familiar	\$42.5
Porque recuperarlo implica para ellos beneficio económico aunque éste sea indirecto	Valor de uso	\$97.4

arrecife El Garrafón. Se utilizó el método de valoración contingente, bajo el supuesto de que la disposición de pago de la sociedad es un reflejo del valor que ésta le asigna y que la magnitud de este último depende del grado de beneficio. Siguiendo los lineamientos del método, se entrevistó a 196 pobladores y a 92 visitantes nacionales y extranjeros, todos mayores de edad. La confiabilidad de la información para cuantificar el valor que los pobladores y los visitantes asignan a este arrecife radica en la disposición con que accedieron a responder los cuestionarios formulados y a las características de la muestra: proporciones entre sexos prácticamente iguales, muestra de adultos con 37 años como edad promedio, casados en más de 50% y con representación del sector mayoritario de la isla (empleados y amas de casa). Se trata de personas en edad productiva y con responsabilidad económica, que expresaron su disposición de pago para restaurar el arrecife en función de un presupuesto familiar real.

La muestra de visitantes estuvo integrada por personas en su mayoría casadas, entre 26 y 40 años de edad y profesionales en más de 50%. El tipo de visitante de El Garrafón se encuentra en un nivel socioeconómico alto y, además, se trata de un sitio preferido básicamente por personas adultas. Funciones como soporte biológico, hábitat de especies con importancia biológica o económica, protección de la zona costera y servicios ecológicos, son procesos que, dadas las condiciones de dimensión y grado de deterioro, no están determinados para el arrecife El Garrafón, por lo que no pudieron ser valorados. La única función que fue plenamente identificada para este modesto arrecife fue la de recreación turística, razón por la cual sólo se valoró dicha función (figura 4).

¿Cuál es el valor que los habitantes le asignan al arrecife?

De manera hipotética, con el fin de rehabilitar El Garrafón, los pobladores entrevistados expresaron estar dispuestos a pagar anualmente y motivados por cinco diferentes razones (tabla 1). Aunque la cantidad que cada persona está dispuesta a pagar anualmente parece ser pequeña, hay que tomar en cuenta el nivel de ingreso correspondiente al sector al que pertenece esta muestra (entre mil 400 y dos mil 800 pesos quincenales), lo cual significa que no necesariamente la población subvalora este recurso.

De todas las razones incluidas en la tabla 1, el único tipo de valor no mencionado en la literatura especializada es el que denominamos como valor asociado a la historia familiar, por lo que se trata de un valor exclusivo de la comunidad de esta isla. Con estos datos se calculó que en 2005, si toda la población económicamente activa de la isla estuviera dispuesta a colaborar, la cantidad anual destinada para llevar a cabo la rehabilitación del Garrafón podría ser de \$1,308,916.60 pesos. Es decir, éste es el valor que la sociedad de Isla Mujeres le asignó al arrecife. Si se integra a este cálculo el beneficio neto registrado por actividades acuáticas recreativas durante la administración del Parque Ecológico El Garrafón, esta cifra aumenta; esto significa que de haber sido necesaria la determinación de un monto por compensación por daño físico al arrecife, por cada metro cuadrado inicialmente deberían haberse pagado 2,828.39 pesos. El monto final debe incluir los costos por pérdida que representaría para la administración del parque, la suspensión de las actividades recreativas y los

ingresos que dejaran de percibirse en tiendas, restaurantes, islas de bebidas y helados, fotografía, etcétera, hasta la reapertura del parque. También sería necesario integrar a los costos generados por restauración, remoción de cascajo coralino, cimentación de bloques de roca caliza y cabezas coralinas, boyamiento, salario y equipo de buzos, combustible, embarcación y, finalmente, costos de monitoreo para evaluar rehabilitación, servicios profesionales y viáticos.¹¹

Opinión de visitantes

La mayoría de los visitantes nacionales y extranjeros no habían viajado a este arrecife más que una vez. A pesar de la condición biológica real de este arrecife, la calificaron como "buena", por lo que probablemente se trata de visitantes no familiarizados con los arrecifes, pero 80% espera a su regreso cambios relacionados directamente con el arrecife, no con las instalaciones o servicios que el parque ofrece: desean encontrar más peces de colores y más corales que son el mayor atractivo de estos sistemas. Para los visitantes, este arrecife está cumpliendo la función que, en su opinión, es la de todos los arrecifes: proveer recreación. No existió diferencia entre el número de personas que visitaron El Garrafón motivadas por la oportunidad de nadar en un arrecife ni entre las que fueron atraídas por el resto de sus actividades recreativas. Sin embargo, una vez adentro, 70%, expresó su preferencia por nadar en el arrecife.

Al final del primer año de haberse abierto al público bajo la concesión privada (septiembre a diciembre de 1999), el arrecife registró 3 mil 745 visitas. A partir de 2000 y hasta 2005, el número de visitantes aumentó entre 112-148%. Contrario a todo pronóstico, y a pesar del estado de deterioro, el arrecife seguía siendo un sitio atractivo para visitar. La esencia del valor de El Garrafón para el turismo radica en el paisaje y en la calidad de la experiencia recreativa que ofrece a los visitantes. Una proporción de la derrama económica que beneficia a la comunidad de Isla Mujeres es generada, en el caso de este parque, por la presencia del arrecife.

La playa o el arrecife... ¿Qué elegir?

En opinión del visitante, la playa sigue siendo el sistema más productivo y el elegido para vacacionar. Las playas de la isla juegan el papel central en la vida económico-turística y es el sitio preferido de casi la mitad de los pobladores entrevistados (particularmente la playa norte). Esta última es considerada el lugar que el visitante busca preferentemente. Esta predilección se debe al costo nulo de acceso, la belleza que la caracteriza y las oportunidades de trabajo que representa, en comparación con el parque natural El Garrafón. Sin embargo, a pesar de la importancia y predilección del poblador por dicha playa, la conservación de la misma pasa a segundo término si tienen que elegir entre su conservación y el mejoramiento en servicios públicos.

Este parque tiene ventajas sobre las otras opciones turísticas. Es una combinación de diferentes servicios recreativos (restaurante, alberca, asoleaderos, etcétera) y además proporciona la oportunidad de esnorquear al lado del arrecife en forma muy segura. Aun cuando el costo de entrada a la Tortugranja y a la Hacienda Mundaca es muy accesible, los servicios que ofrecen estos lugares son insuficientes para competir con de los delfinarios (el Parque Natural El Garrafón es hoy un delfinario también) pero, el único factor que lo deja fuera de la preferencia del isleño es el gasto que representa la estancia dentro de sus instalaciones, aun cuando su entrada es gratuita por el hecho de ser isleño.

La concesión a la iniciativa privada

Según el Instituto Nacional de Ecología,¹² la concesión es el procedimiento de la sociedad moderna que permite a particulares determinadas actividades o la explotación de bienes federales, siempre y cuando el Estado no esté en condiciones de desarrollarlas, ya sea por incapacidad económica, porque lo estima útil o conveniente, o porque responde a una solicitud de la propia organización. Mediante ese procedimiento se dota a los particulares de derechos y atribuciones que de otro

modo nunca llegarían a tener. Según la Ley General de Bienes Nacionales, en sus artículos 16 al 22, las concesiones no excederán el plazo de 50 años (salvo excepciones previstas), son prorrogables por plazos equivalentes a los señalados originalmente y pueden ser revocadas, entre otras causas, si se provoca daño a los ecosistemas como consecuencia del uso, aprovechamiento o explotación. Su propósito es regular actividades que, por su impacto al ambiente, no pueden ser realizadas de manera ilimitada.¹²

Bajo este estado de concesión, en el Parque Natural El Garrafón se ha restringido el uso subacuático mediante el boyeo del arrecife; existe vigilancia y se hace obligatorio el uso de un chaleco salvavidas que impide la inmersión, colecta y contacto con los organismos. Estas medidas no fueron establecidas durante la administración municipal; sin embargo, durante el periodo de construcción del complejo turístico (alberca, snack bar, muelle, regaderas, etcétera), las condiciones de seguridad para el arrecife no fueron establecidas de manera clara, continua rigurosa. La administración privada llevó a cabo en algunas ocasiones el monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua marina que circunda a la estructura arrecifal, pero los datos no han sido empleados en la interpretación de cambios en las condiciones ambientales, ni relacionados con el mejoramiento o no del remanente de las comunidades bénticas.¹³

Durante la primera administración privada se organizaron algunas actividades de educación ambiental dirigidas a la población y los visitantes, pero en el interior del parque no se llevaron a cabo en forma constante ni sistemática. Desafortunadamente, el presente esfuerzo de valoración para El Garrafón ni el publicado por Corbalá y colaboradores¹⁴ en 2004 (correspondiente a 1997, durante la administración municipal) han sido suficientes para generar acciones que favorezcan su rehabilitación.

Recomendaciones

Uno de los objetivos de este trabajo fue demostrar que los habitantes tienen interés en la conservación de sus recursos naturales y que los visitantes, como producto de la experiencia adquirida durante su visita, pueden igualmente mostrarlo. Los resultados han revelado que el arrecife es importante

para los habitantes de la isla, a pesar de la inconformidad expresada por la condición de concesión. Sería justo establecer campañas de rehabilitación, programas de monitoreo y protección en retribución a los beneficios que proporciona. Casi todos los visitantes le asignaron un valor por encima del que podría esperarse, aunque para algunos no vale el esfuerzo de restauración. Debido al alto impacto sobre las comunidades coralinas (encargadas de mantener y generar el refugio físico de los vistosos peces de colores que el visitante busca), de no tomar medidas, en palabras de Jordán *et al.*¹⁵ “el arrecife podría perder su masa, e incluso, a exponer su núcleo de areniscas, haciendo que definitivamente ya no sea ni pareciera un arrecife coralino”. Si el proceso de deterioro continúa, no existirá justificación para el uso del término “arrecife”.

La mayor contribución de esta valoración radica en su capacidad para facilitar la justificación de políticas de conservación, protección y manejo,⁴ por lo que la generación de una concepción del valor en ese contexto podría ser extensiva para beneficiar al resto de los arrecifes del sistema arrecifal mesoamericano. Programas de educación ambiental en el parque son necesarios para reposicionar a los arrecifes de la región; sobre todo cuando el visitante no tiene experiencia en buceo y desconoce el tema, que en esta muestra fueron prácticamente todos los visitantes.

Bajo la condición de concesión, 88% de los visitantes internacionales entrevistados expresó su deseo de regresar en una segunda ocasión, motivados por el paisaje que en general el complejo turístico les ofrece. Probablemente en ello radica el éxito económico en el uso de este arrecife: la combinación entre servicios de calidad y un magnífico ambiente natural. El arrecife tiene un lugar muy importante en la preferencia del visitante al tener la oportunidad de poder elegir una actividad en el parque. Probablemente la concesión ha contribuido en algún grado a la protección de la estructura arrecifal, pero no ha minimizado los costos sociales. La escasa o nula recuperación justifica la inconformidad del poblador.

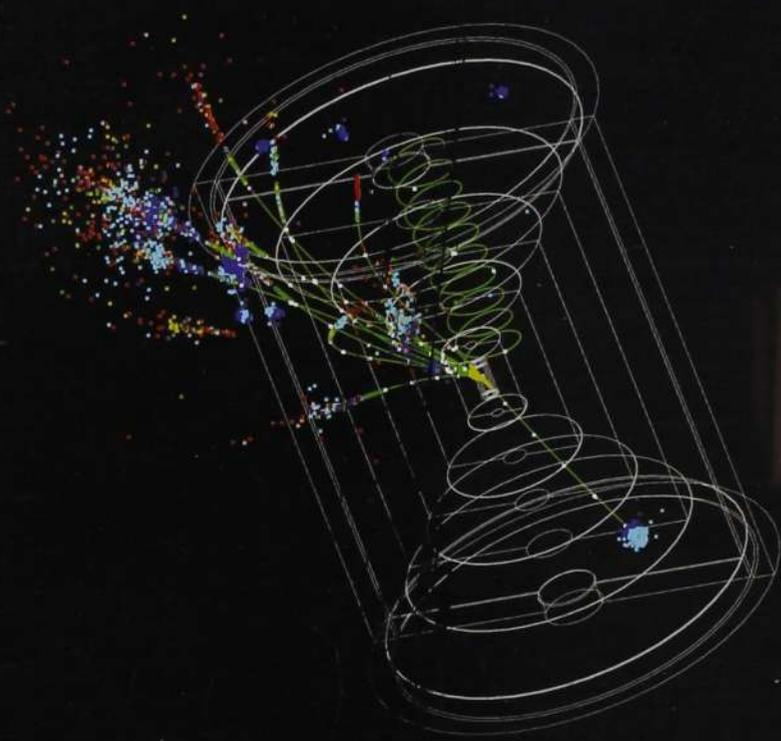
Hoy, la pregunta puede ser: si el metro cuadrado de un arrecife tan modesto como éste puede tener un precio tan alto, ¿cuánto podría aumentar el valor económico por unidad de área de un arrecife de mayor tamaño y mejor desarrollado cuando son incorporados y estimados todos los valores que posee?

Agradecimientos

El presente esfuerzo de valoración del arrecife El Garrafón, así como el desarrollado por Corbalá y colaboradores, han sido posibles gracias a la colaboración y disposición de la primera administración privada del Parque Ecológico El Garrafón (hoy Parque Natural El Garrafón). Queremos agradecer también toda la ayuda, revisión y aportaciones del M. en C. José Ricardo Sáenz Morales, así como al apoyo de Conacyt.

REFERENCIAS

1. F. S. Ávila y J. A. Peña, en *Aspectos Económicos sobre la Biodiversidad de México*, D. H. Benítez, et al., eds. (Conabio, INE-Semarnap, México 1998).
2. B. E. Barbier, M. Acreman y D. Knowler, *Valoración económica de los humedales. Guía para decisores y planificadores*, Oficina de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza), Departamento del Medio Ambiente del Reino Unido, Agencia Sueca de Cooperación para el Desarrollo Internacional (Ascdi) y Obra Social de la Caixa Catalunya, España (versión en castellano, 1997).
3. K. J. Horst, *La obtención del valor total de la biodiversidad a través de la mezcla de instrumentos*, en: *Economía de la biodiversidad, memorias del Seminario Internacional de la Paz, vcs*, F. S. Ávila, C. S. Colin y V. C. Muñoz, comps. (Semarnat-INE, México, 2003).
4. S. G. Pérez, en *Aspectos económicos sobre la biodiversidad de México*, D. H. Benítez, L. E. Vega, J. A. Peña y F. S. Ávila, eds. (Conabio, INE-Semarnap, México, 1998).
5. S. Lorenzo, en *Economía, sociedad y medio ambiente. Reflexiones y avances hacia un desarrollo sustentable en México*, M. C. Villareal y M. A. C. González, comps. (Semarnat, 2000). http://www.ine.gob.mx/publicaciones/descarga.html?cv_pub=313&tipo_file=pdf&filename=313
6. J. P. G. Spurgeon, *Marine Pollution Bulletin*. 24, 529 (1992).
7. R. Costanza, *Nature* 357, 253 (1977).
8. H. S. J. César, en *Collected Essays on the Economics of Coral Reefs*, S. Bettencourt, et al., eds. (CORDIO, Kalmar University, Suecia, 2000). http://www.reefbase.org/pdf/cesar_2000/cesar_04.pdf
9. J. Goldberg y C. Wilkinson, en *Status of Coral Reefs of the World*, Wilkinson C. ed. (Australian Institute of Marine Science and Australian Government, 2004). <http://www.aims.gov.au/pages/research/coral-bleaching/scr2004/index.html#scr2004v1-chapters>
10. INE-Semarnat, *Programa de Manejo de Parque Marino Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc*, (México, 1998) p. 159.
11. J. M. Vargas-Hernández y G. Horta-Puga, *La Jornada*, 31 de enero de 2005.
12. M. Ibáñez de la Calle, B. G. Brachet, S. S. Cortina y V. L. Quiñones, *Instrumentos de política aplicable a océanos y costas*, Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental (2005). Documento de trabajo. INE. http://www.ine.gob.mx/download/instrumen_politica.pdf.
13. A. C. Biocenosis, estrategia operativa en materia de medio ambiente para el Parque Ecológico El Garrafón (2000).
14. A. Corbalá, D. Torruco y A. González, *Memories of the 55th Gulf and Caribbean Fisheries Institute* (2004).
15. E. Jordán, S. M. Sánchez y Ch. E. Martín, *El Arrecife del Garrafón, problemática y perspectivas para su uso futuro. Reporte* (estimación de la condición del arrecife solicitado por Parque Eoarqueológico Xcaret, 1998).



El Gran Colisionador de Hadrones: el proyecto científico más ambicioso de nuestro tiempo

Gerardo Herrera Corral

El acelerador se encuentra en el grupo de los ocho proyectos científico-tecnológicos más costosos de la era moderna: programa Apolo, proyecto Manhattan, telescopio Hubble, estación espacial, el genoma humano, Global Positioning System e International Thermonuclear Experimental Reactor.

Altas energías y bajas temperaturas

El año 2008 ha marcado el inicio de una nueva época para la física de partículas elementales. En septiembre se puso en marcha el acelerador más grande del mundo, inaugurado formalmente un mes después como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés, *Large Hadron Collider*) en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN). Se trata del instrumento científico más grande jamás construido. Con él se podrá observar la estructura de la materia a la escala de una 10 mil millonésima del tamaño de un protón. Este proyecto nació en 1984 con una conferencia en Laussane, Suiza, en donde la comunidad de físicos de partículas elementales analizó la idea y tomó la decisión de impulsarla. Su construcción se decidió en 1994. El acelerador debía entrar en funcionamiento en 2004 pero la complejidad del proyecto retrasó la puesta en marcha.

El acelerador permitirá realizar colisiones de partículas a energías gigantescas y recrear las condiciones que prevalecían una fracción de milésima de segundo después de la gran explosión, que dio origen al Universo hace 13 mil 700 millones de años. Con esta máquina se podrán descubrir nuevas partículas y nuevos estados de la materia. El LHC podría producir una revolución en nuestra manera de pensar y cambiar la forma en que percibimos la materia, sus interacciones y con esto, nuestra visión del mundo.

La resistencia de los cuerpos al movimiento, es decir, su masa, parece provenir de un campo que llena todo el espacio

El Dr. Gerardo Herrera Corral es investigador titular del Departamento de Física del Cinvestav. Correo electrónico: gherrera@fis.cinvestav.mx



Figura 1. El detector de rayos cósmicos ACORDE, ubicado en la parte superior del magneto de ALICE.



Figura 2. El detector V0 en su posición final a 3.2 metros del punto de interacción.

y que se manifiesta como partícula a la que se ha llamado Higgs. Los experimentos que se realizan en el LHC observarán por primera vez al Higgs completando, así, el marco del modelo estándar que nos da una descripción del mundo. Por supuesto, todo esto siempre y cuando la masa no provenga del movimiento de las partículas en una quinta dimensión. Si existen dimensiones más allá de las cuatro en que vivimos (tres espaciales y una temporal), el Gran Colisionador podría dar algunas evidencias de que esto es posible.

El LHC, el más grande acelerador del mundo, tiene una circunferencia de 26 mil 659 metros y está formado por 9 mil 300 imanes superconductores de diversos tipos para guiar a las partículas a lo largo de la curva del anillo, así como para focalizarlas en algunos puntos. Entre estos imanes están mil 232 dipolos que producen un campo magnético de 8.4 teslas.

No fue fácil hacer dipolos capaces de producir este campo magnético, y para mantenerlos fríos se requiere del sistema criogénico más grande del mundo. Todos los imanes serán enfriados primero a menos 93.2 grados centígrados, con la ayuda de 10 mil toneladas de nitrógeno líquido; luego se necesitarán 60 toneladas de helio líquido para llevar la temperatura de los imanes a menos 271.3 grados centígrados, muy cerca del cero absoluto. En esta máquina se harán circular protones en una dirección del anillo a una velocidad muy cercana a la de la luz. Los protones alcanzarán 99.999 999 1 % de la velocidad de la luz. Los protones que circulan en la di-

rección contraria llevan la misma energía y cuando se les haga colisionar, la violencia de la colisión será de 14 tera electrón voltios (TeV). Electrón voltio es una unidad de energía que usan los físicos y equivale a la energía que adquiere un electrón cuando se le pone a una diferencia de potencial de un voltio. La energía del LHC es 14 TeV, es decir, un millón de millones de electrón voltios. El LHC también acelerará iones pesados de plomo y los hará colisionar entre sí. Cuando esto ocurra, en el espacio minúsculo de la colisión se producirán temperaturas que son más de cien mil veces las que existen en el centro del Sol.

México en ALICE

Para registrar lo que ocurra cuando los protones y los iones colisionen con tan alta energía, físicos e ingenieros han construido cuatro grandes experimentos que medirán las trayectorias de las partículas con una precisión micrométrica. Los cuatro detectores del LHC —ATLAS, CMS, LHCb y ALICE— están equipados con electrónica desarrollada especialmente para los detectores con tecnología antes inexistente.

México ha participado desde hace catorce años en el experimento ALICE, que se encuentra a 70 metros de profundidad, al pie de los montes Jura. ALICE está diseñado para el estudio de la colisión de iones pesados ultra relativistas.¹ El proyecto

ha tomado mucho tiempo para entrar en funcionamiento y se llevará por lo menos otros diez años en el estudio de las interacciones de protones contra protones e iones pesados contra iones pesados. Un periodo muy extenso en la vida de un investigador y todo un reto en términos sociológicos: la permanencia de un grupo de colaboradores mientras se lleve a cabo. Por algo será que el tiempo confiere autoridad a lo que perdura. ¿Quizá se debe a que la naturaleza nos enseña que la permanencia es una sucesión de triunfos? Es también la enseñanza de los grandes proyectos que se construyen con el ingenio y las manos de individuos, y que son, al final, el resultado de un esfuerzo común. Así lo muestra el trabajo de un grupo de mexicanos de diferentes instituciones, que participa en el proyecto ALICE. Fue en México donde se realizó el diseño y la construcción de dos de los sistemas que forman parte del detector.

Un grupo formado por investigadores de la Universidad de Puebla, la Universidad de Sinaloa, el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM y el Cinvestav construyó y opera el detector de rayos cósmicos, que ha proporcionado la señal de disparo para casi todos los sistemas del experimento ALICE. ACORDE (por sus siglas en inglés, *A Cosmic Ray Detector*) fue el primer detector en ser instalado. En él se probaron todos los sistemas de disparo, de adquisición de datos de control de detectores, etcétera. También ha proporcionado la información que los demás sistemas necesitan para que, ya en posición final, puedan alinearse con precisión. Asimismo, ha dado servicio de calibración a todos los sistemas de ALICE ya instalados. El detector ACORDE es el sistema de ALICE que más datos ha tomado y el que cuenta con el mayor número de eventos medidos. Durante el periodo que va de 2006 a 2008, este detector ya ha dado un servicio importante al proyecto en general pero aún aspira a tomar datos y, eventualmente, estudiar rayos cósmicos con la ayuda de otros sistemas cuando estén en funcionamiento en el acelerador (figura 1).

Otro grupo formado por investigadores de las unidades Mérida y Zacatenco del Cinvestav, así como del Instituto de Ciencias Nucleares y del Instituto de Física de la UNAM, diseñó y construyó el detector VOA que forma, junto con el detector VOC diseñado y construido en Francia, el sistema de disparo de primer nivel del experimento ALICE.³ Este detector mexicano logró una resolución temporal de 600 pico se-

gundos, es decir que puede distinguir entre dos partículas que lo activen y estén separadas en el tiempo por sólo 0.000000006 segundos. Con esta resolución, el VOA es una piedra angular del sistema que toma la primera decisión sobre los eventos que ocurren en el acelerador (figura 2). Es la primera vez que México participa en un proyecto en física de altas energías al nivel de responsabilidad que involucra diseñar y construir parte del experimento.

Proyectos científico-tecnológicos más costosos de nuestro tiempo

El Programa Apolo, anunciado por John F. Kennedy en 1961 con la finalidad de enviar un hombre a la Luna y regresarlo a salvo antes de que finalizara la década, tuvo un costo de 135 mil millones de dólares. Es, probablemente, el proyecto más costoso de todos los tiempos que concluyó exitosamente en julio de 1969, cuando Neil Armstrong y Edwin Buzz Aldrin alunizaron en el Mar de la Tranquilidad. La misión Apolo es uno de los logros tecnológicos más grandes en la historia de la humanidad. Después del Apolo 11, seis misiones más lograron posarse sobre la superficie lunar con un solo fracaso, el Apolo 13, que no pudo concluir su meta por la explosión de un tanque de oxígeno líquido del módulo de servicio. En su misión, Armstrong y Aldrin estuvieron sólo dos horas y media caminando sobre la superficie lunar, mientras que en el Apolo 17 los astronautas pasaron 3 días en el Valle de Taurus Littrow. Es conveniente notar que este proyecto se desarrolló en el marco de la guerra fría y con el objetivo de consolidar el liderazgo de EUA en la carrera por la conquista del espacio. Sólo la última misión incluyó en su tripulación a un científico. En todas las demás, fueron militares los que viajaron. Si bien podemos considerar al proyecto como científico, la motivación, la gerencia y los objetivos del proyecto fueron claramente militares.

El segundo proyecto científico más costoso de los tiempos modernos es el de la Estación Espacial Internacional. Tiene un costo de 100 mil millones de dólares y se distingue del Programa Apolo en que está financiado por varios países: participan Estados Unidos, Rusia, Japón, Canadá y Europa a través

de la Agencia Espacial Europea. La Agencia Espacial Brasileña participa con la NASA a través de un contrato separado. La Estación Espacial Internacional orbita alrededor de la Tierra a una altura de 360 kilómetros y completa una vuelta al planeta en una hora y media. Desde que el primer equipo humano llegó a la estación en noviembre de 2000, ha habido presencia constante con por lo menos dos personas a bordo. A diferencia del programa Apolo, este proyecto tiene una marcada connotación política. Se trata de una iniciativa de cooperación internacional y con objetivos científicos y tecnológicos.

Uno de los programas más famosos es, sin duda, el Proyecto Manhattan. Se desarrolló en EUA con apoyo parcial de Inglaterra y Canadá entre 1939 y 1945, durante la segunda Guerra Mundial. El objetivo fue construir la primera bomba atómica. Con un costo de 25 mil millones de dólares, es probablemente el tercer proyecto más costoso de nuestros días. Concluyó con la detonación de una bomba de prueba el 16 de julio de 1945 en Alamogordo, Nuevo México, y las dos que fueron arrojadas, el 6 y 9 de agosto de ese año, sobre Hiroshima y Nagasaki, Japón. Este proyecto no puede considerarse estrictamente científico, ni por su motivación ni por sus objetivos.

El proyecto GPS (por sus siglas en inglés, *Global Positioning System*), con una constelación de entre 24 y 32 satélites que transmiten señales precisas de microondas, permite a los receptores determinar la localización, la velocidad, la dirección y el tiempo de objetos sobre la superficie terrestre.

El proyecto fue desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos y es administrado por la fuerza aérea de ese país. En 1983, Ronald Reagan ordenó liberar el sistema

para usos civiles. Desde entonces, GPS se ha convertido en un auxiliar de navegación en todo el mundo. También ha permitido generar mapas y estudios de terreno, entre otras muchas aplicaciones con una alta precisión. El sistema GPS provee de señales de tiempo muy precisas que permiten estudiar sistemas, así como sincronizar redes de telecomunicaciones. La fuerza aérea estadounidense ha invertido 14 mil millones de dólares en el desarrollo del proyecto de 1973 a 2000. Los costos de operación, así como de investigación y desarrollo, continúan y por eso es difícil estimar la inversión real.

El proyecto ITER (por sus siglas en inglés, *International Thermonuclear Experimental Reactor*) está programado para ser construido en diez años y durar veinte años más en operación. Tiene un costo de 14 mil millones de dólares aportados por los países participantes y se construye en Cadarache, Francia. Se espera tener el primer plasma en 2018 y, según el diseño original, deberá producir 500 megavatios por la fusión sostenida de mil segundos. Sin embargo, el objetivo de ITER no es generar energía de manera rentable sino demostrar la viabilidad científica y tecnológica de producción de energía por fusión. Participan la Unión Europea, India, Japón, China, Rusia, Corea del Sur y EUA. Es un proyecto con objetivo tecnológico y de participación internacional.

El Telescopio Espacial Hubble fue puesto en órbita en 1990 por el transbordador espacial. Aunque no es el único ni el primer telescopio espacial, sí es uno de los más grandes y versátiles. El proyecto es una colaboración entre EUA, a través de su agencia espacial NASA, y la Unión Europea, a través de la *European Space Agency*. El telescopio ha tomado las imágenes

Tabla 1. Proyectos más ambiciosos de nuestro tiempo.

Proyecto	Costo (miles de millones de dólares)	Periodo	Tipo de proyecto
Programa Apolo	135	1961-1970	Nacional (EUA)
Estación Espacial Internacional	100	A partir de 1980	Internacional
Proyecto Manhattan	25	1939-1945	Nacional (EUA con apoyo parcial de Inglaterra y Canadá)
Global Positioning System (GPS)	14	1973-2000 (fase I)	Nacional (EUA)
ITER	14	2006-2036	Internacional
Telescopio Espacial Hubble	6	1990-2013	Internacional (EUA, Europa)
Gran Colisionador de Hadrones	6	1994-2015	Internacional
Genoma Humano	3	1990-2003	Nacional

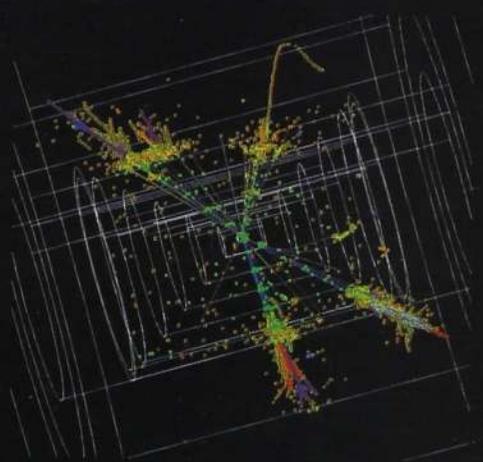
más nítidas del Universo y ha contribuido a medir la tasa de su expansión. Hubble ha sido el único telescopio diseñado para recibir mantenimiento en el espacio. En cuatro misiones de mantenimiento se han reparado varios subsistemas y se han reemplazado instrumentos de observación por otros más modernos. Seguirá enviando imágenes hasta 2013, año en que será reemplazado por un telescopio nuevo: el JWST (por sus siglas en inglés, *James Webb Space Telescope*), sensible en el infrarrojo, a diferencia del Hubble que observa en el visible y el ultravioleta. El proyecto Hubble tuvo un costo de 6 mil millones de dólares.

Por último, el Proyecto Genoma Humano, iniciado en 1990, tuvo como meta descifrar el genoma, lo cual concluyó

exitosamente en 2003. Fue coordinado por el Departamento de Energía y los Institutos de Salud de EUA. En un principio contó con la contribución de Japón, Francia, Alemania, China y otros países. En 2003, dos años antes de los planes originales, Bill Clinton y Tony Blair anunciaron el resultado del proyecto de manera conjunta. Fueron identificados aproximadamente 20 mil genes y determinada la secuencia de 3 mil millones de pares de bases químicas que forman el ADN humano. Esta información se guardó en una base de datos y, para su interpretación, se mejoraron las herramientas de análisis y se transfirieron tecnologías al sector privado. Aunque el proyecto ya terminó, el estudio de los datos continuará por muchos años.

REFERENCIAS

1. L. M. Montaña Zetina, *Avance y Perspectiva* 20, 75 (2001); G. Herrera Corral, *Avance y Perspectiva* 23(4), 29 (2004).
2. G. Herrera Corral, *Cinvestav* 26(4), 48 (2007).



¿Es peligroso el acelerador LHC del CERN?

Luis Manuel Montaña Zetina

La comunidad internacional se preocupó sin fundamento sobre la posible producción de nuevos estados exóticos de la materia en el acelerador LHC: microagujeros negros, strangelets, plasmas de gluones...

Constituyentes de la materia

Cerca de la ciudad de Ginebra, en la frontera entre Francia y Suiza (figura 1), se localiza uno de los centros de investigación en física de partículas más importantes del mundo. En este lugar, conocido como CERN (por sus siglas en francés, *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), se encuentra el acelerador de partículas más grande del orbe, denominado LHC (por sus siglas en inglés, *Large Hadron Collider*). Este acelerador comenzó a acelerar haces de partículas el 10 de septiembre de 2008. Integrado por un complejo sistema de dispositivos, entre ellos grandes magnetos superconductores para contener y acelerar partículas cargadas a velocidades muy cercanas a la de la luz, el LHC fue diseñado para acelerar protones a una energía de 7 TeV, y también iones de plomo a energías de 2.8 TeV por cada nucleón (un nucleón es un protón o neutrón dentro del núcleo de un átomo).

El CERN, creado en 1954 por países europeos como Francia, Suiza, Alemania e Italia, tuvo, y todavía tiene, como misión proveer los recursos necesarios para promover la colaboración de Estados europeos y también del mundo. Su finalidad es el desarrollo de la investigación nuclear con carácter científico, sin fines militares, y cuyos resultados sean accesibles a todo el mundo.

La investigación que se realiza en el CERN trata sobre los constituyentes más fundamentales de la materia (figura 2). Para estudiar, conocer y descubrir estos constituyentes es necesario generar colisiones entre núcleos de átomos u otras

El Dr. Luis Manuel Montaña Zetina es investigador titular del Departamento de Física del Cinvestav. Correo electrónico: lmontano@fis.cinvestav.mx

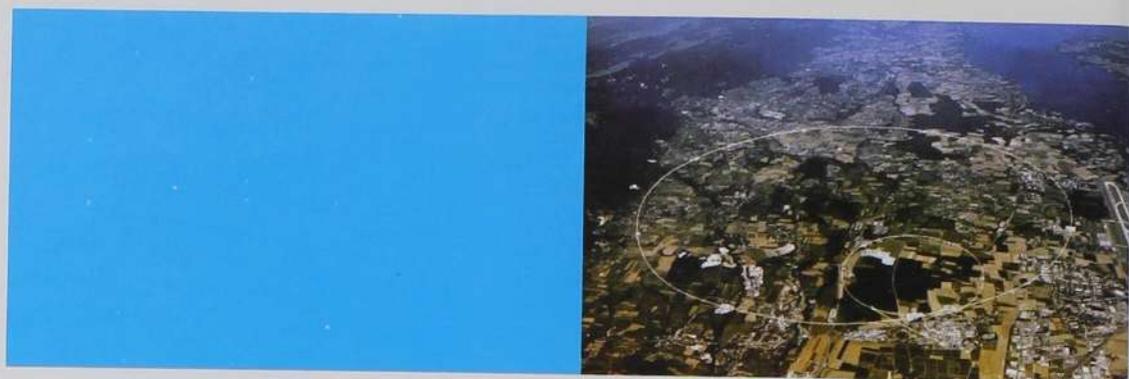


Figura 1. Vista aérea del CERN. Los dos círculos representan el acelerador LHC (círculo grande) y el acelerador SPS (Super Proton Synchrotron, círculo pequeño). Nótese las dimensiones del LHC comparada con el aeropuerto de la ciudad de Ginebra a la izquierda.

partículas subatómicas como protones o electrones, para que, al destruirse, se pueda “ver” lo que contienen en su interior. Entre más energéticas sean estas colisiones, mayor será la probabilidad para descubrir lo que constituye a la materia.

Para tener una idea de estas energías, que para los físicos de partículas elementales es grande, la energía de colisión entre dos iones de plomo equivale a la de dos mosquitos chocando en pleno vuelo. Entonces, ¿por qué son altas estas energías para nosotros? La principal razón es que esa energía se concentra en un espacio muy pequeño, del orden de millonésimas de millonésimas de milímetro. Imagínense la luz que proviene del Sol en una tarde a temperatura templada, digamos a 20 grados centígrados. En general, así no nos quema la piel. Sin embargo, si usáramos una lupa y concentráramos la luz del Sol en un punto incidiendo en nuestra piel, sentiríamos los efectos de la energía solar manifestándose como energía calorífica. Antes y después de la lupa, esa energía es la misma, sólo que, después de que la luz atraviesa la lupa, se concentra en un punto. Esta es una situación semejante a lo que ocurre en las colisiones de haces de partículas en los aceleradores. Colisionan con energías que para nosotros son

pequeñas, pero concentradas en espacios diminutos provocan efectos colosales.

La teoría que describe la física de las partículas elementales se llama modelo estándar.¹ Este modelo unifica tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza: la electromagnética, la interacción débil y la fuerte; no incluye la fuerza de gravedad. El modelo explica con mucha precisión los fenómenos que ocurren en el mundo de lo muy pequeño. Predice que las tres fuerzas de la naturaleza se manifiestan por medio de campos, cuyo modo de interacción con la materia es a través de partículas mediadoras. Para el campo electromagnético, esa partícula es el fotón. Para la interacción débil, son los bosones de norma W^+ , W^- y Z^0 . Para la interacción fuerte, son los gluones. Además, existen partículas llamadas quarks (conocidos como $u, d, s, c, b, y t$), que junto con el electrón, muón, tau y sus respectivos neutrinos forman la estructura más fundamental de la materia. Toda la materia que conocemos se forma de átomos, que a su vez están constituidos por electrones, protones y neutrones. Los protones están formados por tres quarks: dos quarks de tipo u y uno de tipo d y el neutrón de un u y dos d . Por tanto, toda la materia conocida se forma

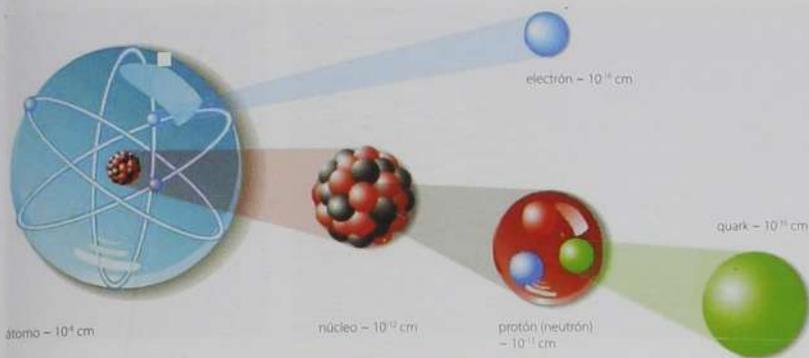


Figura 2. Estructura microscópica de la materia.

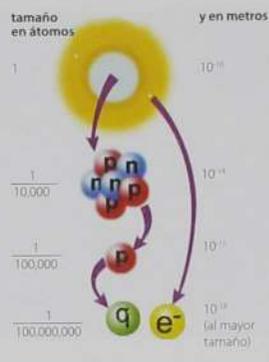


Figura 3. Escalas de energía y de tamaño en el mundo subatómico.

de quarks del tipo *u* y *d*, y electrones con su neutrino. Entre los temas más interesantes que se espera aclarar con el inicio del LHC está el origen de las masas, el confinamiento de partículas subatómicas y la violación de ciertas simetrías básicas, que podrían conducir a los fenómenos principales que dieron origen al Universo tal y como lo conocemos ahora.

Un poco de historia

Para poder "ver" el interior de las partículas atómicas y subatómicas necesitamos provocar colisiones entre haces, constituidos de estas mismas partículas, a energías cada vez mayores. Esto es debido a que, según la mecánica cuántica, teoría que describe la física del mundo subatómico, las partículas presentan propiedades ondulatorias. La energía de estas partículas va en proporción inversa a la longitud de onda de ellas mismas. A mayor energía, menor será su longitud de onda. Al provocar colisiones entre ellas cada vez a mayores energías, logramos penetrar en espacios más reducidos, inclusive más pequeños que las dimensiones de ellas mismas (figura 3). Este proceso

logra llegar a lo más íntimo de su estructura (si tienen alguna), separar sus constituyentes más elementales y liberarlos. Con dispositivos que logran detectar los productos de estos choques podemos conocer de qué estaban constituidas las partículas que forman los haces en colisión.

En el pasado, las únicas fuentes de radiación (partículas cargadas o no eléctricamente y que viajan a gran velocidad) con que contábamos eran los materiales radiactivos que se encontraban en su estado natural y los rayos cósmicos. Con estas dos fuentes de radiación se hicieron las primeras investigaciones para descubrir la estructura de los átomos, núcleos atómicos y muchos de los fenómenos subatómicos. Posteriormente, se tuvo la necesidad de crear fuentes de haces de partículas cargadas para tener un control de las colisiones que se requerían y así continuar con las investigaciones del mundo microscópico. Al obtener resultados cada vez más cercanos a la estructura real de la materia se quiso ir todavía más allá de lo conseguido. Por tanto, se realizaron colisiones a mayores energías. Los instrumentos que logran dirigir haces de partículas de manera controlada hacia un blanco u otro haz se conocen como aceleradores. Primero se inyectan las

partículas que se desea acelerar. Por ejemplo, los electrones se obtienen por calentamiento de metales, mientras que los protones se consiguen quitándole los electrones al hidrógeno. Después, con campos electromagnéticos integrados en el acelerador, los haces se mueven cada vez más rápido hasta colisionarlos con algún material u otro haz de partículas. Finalmente, con dispositivos sensibles al paso de la radiación resultante se verifica lo que crearon esas colisiones: sean partículas ya conocidas o nuevas. A estos dispositivos se les conoce como detectores.

Rayos cósmicos

Ya desde la década de 1927 a 1937 se desarrollaron experimentos para estudiar los rayos cósmicos que estaban formados, en su mayoría, por partículas con cargas positivas. Al colisionar estos rayos cósmicos primarios con la atmósfera se originó una radiación secundaria, formada, principalmente, por muones. Fue Robert Millikan quien dio por primera vez el nombre de rayos cósmicos a esta radiación proveniente del espacio exterior. Pierre Auger estudió los fenómenos de la radiación extraterrestre y concluyó que, efectivamente, eran partículas cargadas que provocaban chorros

o chubascos de partículas secundarias al interactuar con las moléculas de la atmósfera (figura 4). Este chubasco está constituido principalmente de electrones, fotones y muones, los cuales son los que llegan a la superficie de la Tierra.

Para fines de investigación en partículas elementales, estos rayos tienen una gran ventaja pero también una desventaja; por un lado, al llegar a la Tierra, colisionan con las partículas de la atmósfera y producen reacciones a energías jamás logradas por los aceleradores. Sin embargo, estas colisiones ocurren de manera esporádica y en lugares indeterminados, por lo que el estudio de estas interacciones resulta complejo. Al construirse aceleradores de partículas y lograr colisiones entre ellas, podemos tener un control de cuándo y dónde ocurrirán; ésta es la ventaja de los aceleradores con respecto a los rayos cósmicos. La desventaja es que por más energía que se ha logrado conseguir en los aceleradores de partículas, aún se está muy lejos (casi seis órdenes de magnitud) de las energías que se registran en los rayos cósmicos.²

Aceleradores

Uno de los primeros aceleradores que se construyeron para fines científicos en los primeros años del siglo xx fue el gene-



Figura 4. Chubascos de partículas generadas por rayos cósmicos en la atmósfera terrestre.

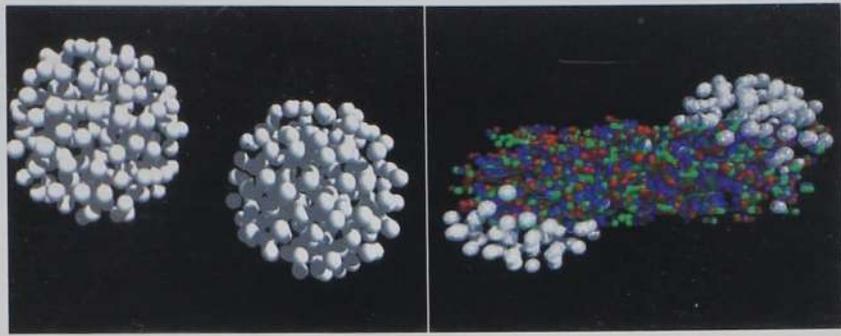


Figura 5. Simulación de una colisión de dos iones de plomo. Antes de la colisión se muestran los nucleones (protones y neutrones) en cada núcleo de plomo. Después de la colisión se muestra la materia que aparece en la interacción de algunos nucleones de ambos iones de plomo.

rador Van de Graaf. Este acelerador funciona con un cinturón en movimiento, que por fricción logra que se acumule una gran carga eléctrica en una esfera metálica. Con él se podían obtener unos pocos MeV de energía, que para su tiempo era una energía considerable. A finales de 1920 surgió el acelerador lineal conocido como Linac. Este instrumento usaba voltajes alternantes de gran magnitud para acelerar partículas linealmente. El Linac más grande del mundo se encuentra en la Universidad de Stanford; mide 2 millas de largo y es capaz de acelerar electrones a una energía de 50 GeV.

El ciclotrón fue el primer acelerador que logró acelerar partículas de manera circular a través de un campo magnético potente. Cada vez que las partículas atraviesan un pequeño espacio entre las dos estructuras principales que constituyen al ciclotrón (llamadas Des) son aceleradas. De esta manera describen una trayectoria en espiral hasta salir disparadas. Por su parte, el sincrociclotrón sincroniza el paso de las partículas aceleradas dentro del instrumento (parecido a un ciclotrón) para mantenerlas dentro del acelerador. Así se evita que se pierdan y ganen cada vez más energía. El sincrotrón consiste en un tubo, en forma de anillo, rodeado por magnetos que logran mantener a las partículas confinadas en trayectorias circulares y acelerarlas en medio del tubo (a estos magnetos se le llaman cuadrupolos). Estos aceleradores trabajan en su mayo-

ría con electrones y protones. Los colisionadores son grandes dispositivos que logran colisionar haces de partículas que viajan en sentidos opuestos. Con ello se logra que las colisiones sean a mayores energías que los experimentos donde el blanco está fijo. Las velocidades de los haces con estos instrumentos son cercanas a la de la luz.

Gracias a los aceleradores, algunas partículas fundamentales, como los muones, piones y partículas extrañas, que al principio fueron descubiertas a través de rayos cósmicos, han podido ser estudiadas con mayor precisión. Posteriormente, al incrementar la energía para acelerar cada vez más los haces y provocar colisiones más energéticas, se descubrieron más partículas inestables, que a pesar de ello proporcionan información valiosa sobre la estructura interna de la materia y sobre las etapas tempranas de la formación del Universo. Inclusive, nos pueden dar información sobre la naturaleza de los mismos rayos cósmicos. Si uno toma en cuenta la edad del Universo, en particular la edad de la Tierra, y a pesar de lo poco frecuente que rayos cósmicos energéticos inciden en la atmósfera terrestre, podremos estimar la cantidad de colisiones que han realizado estos rayos hasta nuestros días. Esta cantidad superaría infinitamente a todas aquellas producidas en los aceleradores. Este aspecto será muy importante para evaluar la radiación generada en los procesos de colisión en el LHC.



Figura 6. Detalle del túnel del LHC en el que se muestra una sección del acelerador.

Riesgos en la operación del LHC

Desde hace tiempo se ha especulado sobre la existencia de ciertos peligros que puede provocar el choque de los haces de partículas en el CERN.³ El LHC reproduce, bajo condiciones controladas de laboratorio, colisiones de haces de partículas a grandes energías (figura 5); sin embargo, estas energías son menores a las producidas en la atmósfera por los rayos cósmicos. Como se mencionó, los rayos cósmicos inciden en la atmósfera de la Tierra desde hace miles de millones de años. Se estima que la cantidad de colisiones que se producen en la Tierra, el Sol, las estrellas de neutrones, las enanas blancas y otros cuerpos astronómicos es mucho mayor que la esperada en el LHC. Y si tomamos en cuenta el tiempo en que los rayos cósmicos realizan el bombardeo de estos cuerpos, la cantidad de colisiones que producirá el LHC resulta ínfima. La estabilidad de los cuerpos astronómicos indica que dichas colisiones no son peligrosas. Entre los riesgos que se le imputan al LHC están la hipotética formación de agujeros negros microscópicos y de objetos llamados *strangelets* (materia con quarks extraños, *s*). Como se explicará más adelante, cualquier agujero negro microscópico que se produzca en el LHC, deberá desintegrarse por la radiación Hawking antes de que alcance las paredes del detector. Por otro lado, si fueran estables, entonces

los agujeros negros microscópicos producidos por los rayos cósmicos habrían sido frenados en el interior de la tierra. Que el planeta todavía exista, indica que la producción o el daño de estos microagujeros negros es mínimo o nulo.

Debido a estas especulaciones sobre el riesgo que podría representar la puesta en operación del LHC, en 2003 y recientemente en 2008, se pidió a científicos del CERN que elaboraran un documento⁴ donde se expusiera el análisis de los posibles daños que pudiera provocar el funcionamiento del gran acelerador. En él se analizan dos riesgos principalmente: la hipotética producción de microagujeros negros, los cuales podrían “comerse” a la materia o a la Tierra misma, y la aparición de *strangelets*. Estos quarks *s* sustituirían a alguno de los quarks *u* o *d* que forman los nucleones (protones y neutrones), y la materia extraña así formada podría representar un peligro, pues al entrar en contacto con la materia ordinaria la trasformaría en más materia extraña y, como este tipo de materia es inestable (no se encuentra en condiciones normales), afectaría de alguna manera a la Tierra. Los estudios indican que si este tipo de materia se forma en el LHC, será en menor cantidad de las que se habrían producido en el acelerador RHIC, el cual es semejante al LHC (figura 6) y está localizado en Brookhaven, Long Island, EUA, sólo que de menor circunferencia.

Agujeros negros

En el caso de los agujeros negros, se sabe que hay tres posibles procesos que pueden dar lugar a su formación en el cosmos: el colapso gravitatorio de una estrella, el colapso de un cúmulo estelar y aquellos llamados primordiales, es decir, originados desde la formación del Universo. Un agujero negro es una región del espacio en donde el campo gravitacional es tan fuerte que nada, ni siquiera la luz, puede escapar a su fuerza de atracción. Es por ello que se le denomina "negro" pues, al no poder escapar radiación electromagnética (en este caso luz) simplemente no se ve: sólo se manifiesta por el gran campo gravitacional que genera y que afecta a otros cuerpos cercanos a él.

Un agujero negro nace cuando cierto tipo de estrellas, mucho más grandes y masivas que el Sol, colapsan al final de sus días. Debido a la gran masa que tienen, la misma atracción gravitacional hace que concentre más y más materia en ella misma hasta acumular una gran cantidad de masa en un espacio muy reducido. Por tanto, tomando en cuenta las máximas energías producidas en las colisiones de haces de partículas en el LHC, se concluye que los agujeros negros son más energéticos que cualquier proceso que pueda producir el acelerador.

La teoría general de la relatividad de Einstein ha predicho la formación, el origen, de los agujeros negros en el universo y, efectivamente, han sido descubiertos muchos de ellos. No se han identificado agujeros negros producidos por procesos fuera de lo que nos explica la relatividad general.

En el caso de los hipotéticos agujeros negros microscópicos, si acaso se producen en las colisiones de haces, entonces deberían decaer también en las partículas a partir de las cuales se formaron. Según la teoría de los agujeros negros microscópicos, éstos deberían decaer vía radiación de Hawking. Esta teoría se basa en principios físicos básicos de consenso general. Aún así, si estos agujeros negros microscópicos fuesen estables, serían incapaces de engullir materia de manera peligrosa para la Tierra. Por tanto, si se produjeran en el LHC se habrían creado a través de los rayos cósmicos que inciden en la Tierra. Finalmente, como el planeta existe todavía, a pesar de los rayos cósmicos y sus hipotéticas consecuencias, se concluye que el LHC no representa ningún peligro.

Sin embargo, existen algunas especulaciones teóricas que indican que a pequeñas distancias, a escalas de las interacciones entre partículas, se puede verificar la existencia de dimensiones extra. En esas teorías multidimensionales es posible que la fuerza gravitacional entre pares de partículas en colisión llegue a ser muy fuerte. Una consecuencia de ello sería la aparición de agujeros negros microscópicos. A pesar de todo esto, se predice que se desintegrarían inmediatamente a través de la radiación Hawking (también conocida como radiación Bekenstein-Hawking, la cual consiste en radiación térmica con un espectro de cuerpo negro debido a efectos cuánticos), por lo que no tendrían tiempo de engullir materia y causar efectos macroscópicos.

De todos modos, una pregunta válida es: ¿qué pasaría si estos agujeros negros microscópicos fuesen estables y se produjeran en el LHC? A pesar de que esto violaría algunos principios básicos de la mecánica cuántica, estos objetos pueden ser eléctricamente cargados o neutros. Si fuesen cargados, al momento de viajar a través de la materia ordinaria, después de su creación interaccionarían con la materia y se detendrían viajando a través de la Tierra. Pero, insistimos, ésta no ha sufrido ninguna catástrofe por supuestos agujeros negros microscópicos, que ya se habrían producido por los rayos cósmicos que la han bombardeado por millones de años. Por otro lado, si estos objetos fuesen neutros, la interacción de ellos con la Tierra sería muy débil, como sucede con otras partículas neutras.

Strangelets

Para el caso de las partículas llamadas *strangelets*, ya deberían haberse producido en el RHIC. La producción de quarks extraños en RHIC, y en otros experimentos previos de altas energías, se ha podido explicar a través de simples modelos termodinámicos de producción, los cuales dependen únicamente de la temperatura y de la densidad neta de bariones. El LHC, por su parte, llegará a producir temperaturas similares asociadas a partículas extrañas pero a menores densidades de bariones, por lo que el LHC produciría *strangelets* en menor

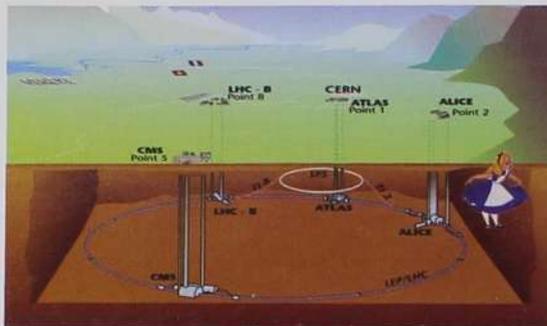


Figura 7. Esquema del LHC y sus cuatro principales experimentos: ALICE, ATLAS, CMS y LHC-b. El LHC está aproximadamente a 80 metros bajo tierra.

cantidad, si acaso realmente existen. Muchos de los estudios teóricos de estos objetos concluyen que, si existen, deben ser inestables y decaer en un tiempo típico de nanosegundos, sin afectar la materia ordinaria a su alrededor. Si se produjeran *strangelets*, esto tampoco representará ningún riesgo.

Se ha especulado que la materia con extrañeza pesaría menos que la materia nuclear convencional con el mismo número de quarks tipo *u* y *d*, aunque sólo para átomos de número atómico menor que 10. En este caso hipotético, los *strangelets* serían estables. Así, siendo estables, este tipo de objetos comenzarían a absorber más materia ordinaria, creciendo en tamaño y produciendo un *strangelet* cada vez más masivo. Esto sí podría causar daño a la Tierra. Sin embargo, si estos objetos se produjesen, RHIC habría ya reportado la aparición de al menos uno. Como se sabe, el LHC trabajará a mayores energías que el RHIC. Esto lo hace menos capaz de producir *strangelets*, pues es difícil para la materia extraña lograr formarse en ambientes a altas temperaturas. En consecuencia, su producción es menos probable en el LHC que en RHIC.

Para dar un ejemplo de que el CERN, lejos de ser peligroso para la humanidad, ha dado importantes contribuciones al desarrollo de la misma, hay que mencionar que ahí nació el *World Wide Web* (www). En 1990, Tim Berners-Lee, un científico de altas energías, miembro de la planta académica del

CERN, inventó un sistema para compartir información rápida y segura entre científicos que trabajaban en diferentes universidades e institutos alrededor del mundo. A finales de 1994 la WEB (como se le conoce familiarmente al www) llegaba a más de 10 mil servidores, de los cuales dos mil eran comerciales con más de 10 millones de usuarios.

Inauguración

El 10 de septiembre de 2008 se hicieron pruebas con el acelerador LHC. Se inyectaron protones sector por sector del acelerador hasta completar la vuelta, que tardó aproximadamente 50 minutos. Todo esto fue para el llamado haz "uno". Posteriormente probaron el haz "dos", que va en sentido contrario (recordemos que en un colisionador se necesitan colisionar dos haces que van en sentidos contrarios), y se logró completar varias vueltas de 27 kilómetros en unos pocos segundos. Esta prueba dio como resultado que el LHC estuviese listo para la inauguración oficial, que se daría cinco semanas después. Sin embargo, el 19 de septiembre ocurrió un incidente en el LHC. Una falla en una conexión eléctrica entre dos imanes superconductores provocó daños en la mecánica, junto con una fuga de helio líquido del magneto al túnel.⁵ A pesar de ello, los sistemas de seguridad para estos casos funcionaron a la perfección. No existieron riesgos para el personal en ningún momento. Actualmente se están reparando las fallas y tomando en cuenta las precauciones para que no vuelva a ocurrir. El LHC volverá a reactivarse en 2009. Esto no quiere decir que la falla haya sido tan severa para tomarse tanto tiempo en su arreglo; esto coincidió con la pausa que el LHC hace y hará en los inviernos para el ahorro de energía.

El pasado 21 de octubre se llevó a cabo la inauguración oficial de las actividades del LHC. En todos los medios del mundo, en particular aquí en México,^{6,7} se habló de este inicio con la participación de cuarenta mexicanos en los detectores ALICE y CMS, dos de los cuatro grandes detectores situados en el LHC.

ALICE (*A Large ion Collider Experiment*) es uno de los cuatro experimentos dentro del programa de investigación en altas energías del CERN.⁸ Los otros tres son: CMS (*Compact Muon Solenoid*), ATLAS (*A Thoroidal LHC Apparatus*) y LHCb (figura

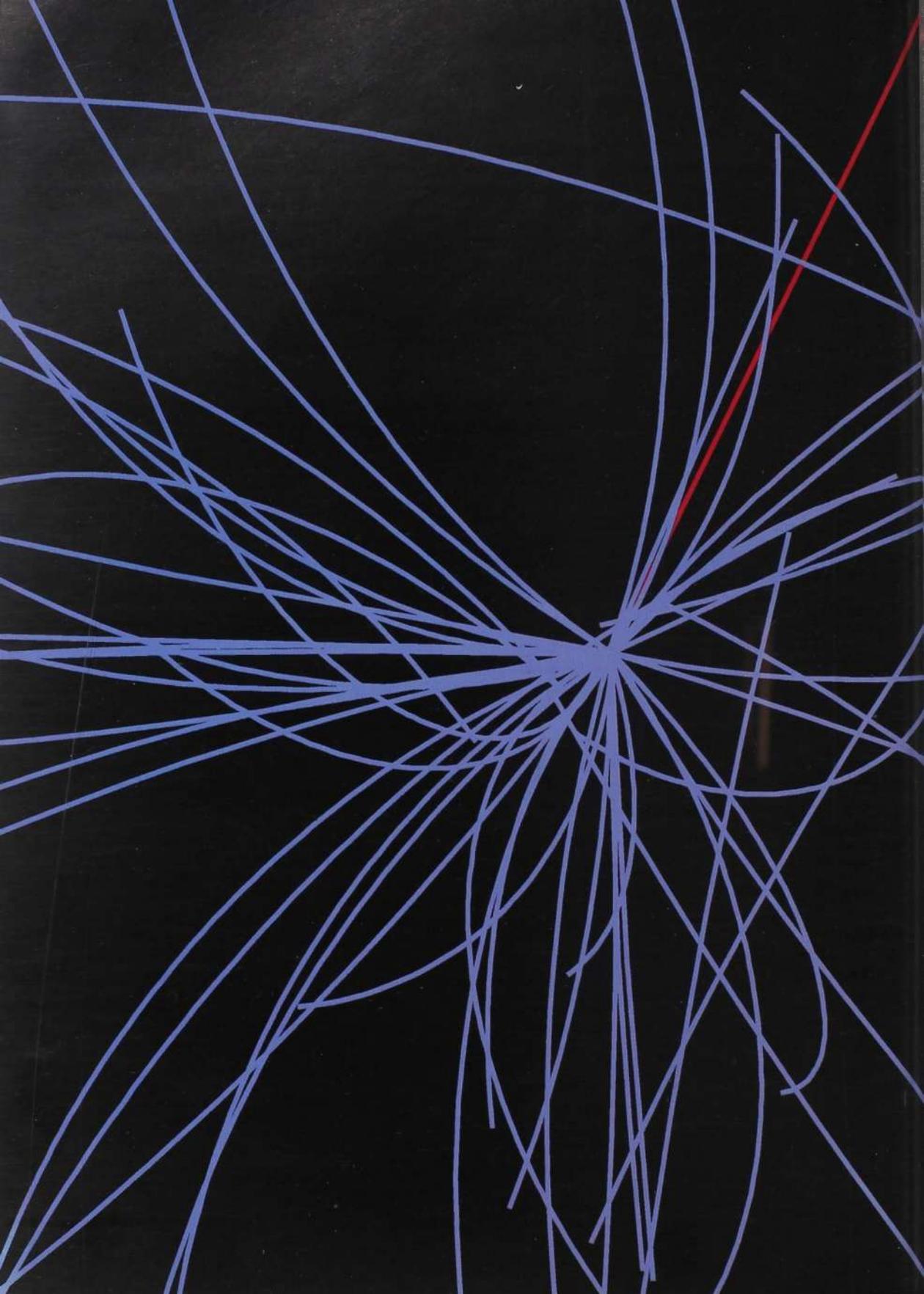
7). El objetivo de CMS y ATLAS es la búsqueda del bosón de Higgs, partícula que, según el modelo estándar, al interactuar con él, las partículas elementales que conocemos adquieren masa. LHCb tiene como misión la medición y origen de la violación de la simetría CP en la naturaleza. ALICE tiene como objetivo la creación de un estado de la materia donde quarks y gluones convivan libremente por tiempos muy pequeños. Se ha visto por experimentos anteriores que los quarks que componen las partículas subatómicas no existen de manera libre, se encuentran confinados en los bariones o mesones. Sin embargo, a densidades grandes y a altas energías se pueden tener quarks libres, aunque sea por unos instantes. En esa convivencia estarían acompañándolos los gluones, que son los mediadores de la interacción fuerte. Este estado de la materia se produjo en los inicios del Universo, poco después de la Gran Explosión. Por eso, ALICE tratará de detectar la situación que tenía el Universo temprano a través de las colisiones de haces con iones pesados, acelerados por el LHC.⁸

En ALICE hay un grupo de investigadores y estudiantes mexicanos que participamos en este proyecto con la construcción de dos de los 16 subsistemas que componen todo el gran detector. Estos dos subsistemas son a su vez detectores menores, llamados ACORDE y VOA. Esta participación marca un hecho sin precedentes, pues es la primera vez que un grupo no sólo mexicano, sino latinoamericano, contribuye a una iniciativa de esta envergadura mediante la responsabilidad de construcción, manejo y mantenimiento de detectores esenciales para un proyecto de colaboración mundial como lo es ALICE.

Entre los investigadores mexicanos, participamos profesores del Departamento de Física del Cinvestav. Nos sentimos orgullosos y felices de ver los frutos de colaboración con otros colegas, para construir y hacer funcionar detectores hechos en México (ACORDE se construyó completamente en el Cinvestav) en el CERN para integrarlos a ALICE.

REFERENCIAS

1. Véase, por ejemplo, A. Zepeda, *Avance y Perspectiva* 23 (4), 41 (2004).
2. U. Cotti, A. Zepeda, *Avance y Perspectiva* 17, 131 (1998).
3. <http://www.eluniversal.com.mx/articulos/48333.html>
4. <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/Safety-en.html>
5. https://edms.cern.ch/file/973073/1/Report_on_080919_incident_at_LHC_2_.pdf
6. Véase, por ejemplo, L. M. Montaña, *Avance y Perspectiva* 20, 75 (2001).
7. L. M. Montaña y G. Herrera, *Avance y Perspectiva* 17, 357 (1998).
8. <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>



El experimento CMS

Alberto Sánchez Hernández

Para la colaboración internacional CMS, la principal meta científica es detectar la producción del bosón de Higgs, la partícula que genera la masa de todas las partículas.

El detector

Compact Muon Solenoid (CMS, por sus siglas en inglés) es un experimento de altas energías que se lleva a cabo en Cessy, Francia, y es parte del Gran Colisionador de Hadrones (LHC, *Large Hadron Collider*) en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN). El nombre proviene de *compacto*, porque el detector es pequeño, apenas 15 metros de diámetro, comparado con su enorme peso, cerca de 12 mil 500 toneladas; *muón*, porque es una de las partículas que identifica este detector, y *solenoid*, por la presencia del gran magneto superconductor en su interior.

El detector de la colaboración internacional CMS (figura 1), al igual que la gran mayoría de detectores de altas energías, utiliza capas de diversos materiales para identificar partículas y medirles su energía. Es altamente eficiente en la detección de muones, electrones y fotones; la detección de los fotones se da a través de un hermético, pero compacto, calorímetro. CMS también posee un sistema de detección de trayectorias con una altísima resolución. Para medir el momento de las partículas con carga eléctrica, CMS utiliza un solenoide hecho de alambres superconductores de apenas siete metros de diámetro, pero es capaz de producir un campo magnético de alrededor de cuatro teslas; esto es, 100 mil veces el campo magnético de la Tierra. Este solenoide operará a -268.5 grados centígrados y es el mayor magneto superconductor jamás construido.

La forma como los detectores de partículas de altas energías funcionan es muy similar entre sí: el LHC colisionará

El Dr. Alberto Sánchez-Hernández es investigador titular del Departamento de Física del Cinvestav. Correo electrónico: asanchez@fis.cinvestav.mx

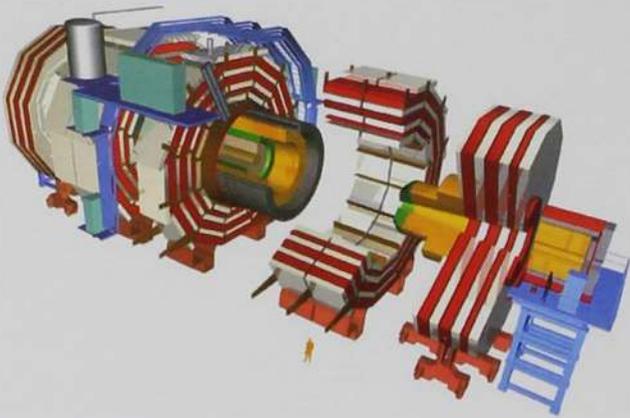


Figura 1. Bosquejo del detector del experimento CMS con casi 2500 toneladas de peso, ubicado en Cessy, Francia, y parte del Gran Colisionador de Hadrones de CERN.

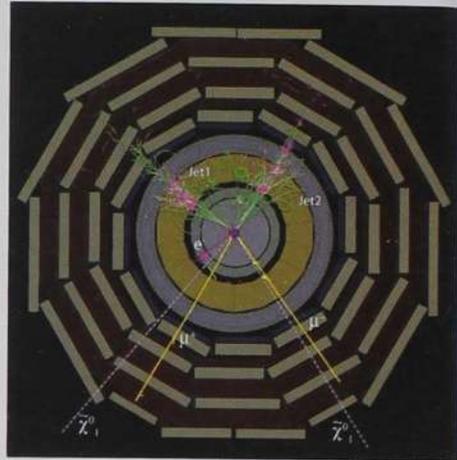


Figura 2. Vista transversal del detector CMS. Bosquejo de un evento de súper-simetría típico; se reconstruyen dos muones, dos chorros de hadrones (jets) y un electrón.

cúmulos de protones a velocidades muy próximas a la velocidad de la luz, a una frecuencia de cerca de 40 millones de veces por segundo y a una energía de 14 tera electrón voltios (TeV). En cada una de estas colisiones parte de la energía inicial se convertirá nuevamente en masa, algunas partículas no observadas previamente se materializarán por un instante muy breve y viajarán a través del detector; estas nuevas partículas darán indicios de cómo la naturaleza se comporta al nivel más fundamental. Cada partícula que emerge de estas colisiones es como una pieza de un rompecabezas, y algunas de éstas se subdividirán más aún al alejarse cada vez más del punto de colisión e interactuar con el material del detector. Todas estas partículas dejarán un rastro característico en su viaje a través del detector. El trabajo de CMS es reunir toda esta información y armar el rompecabezas completo sobre lo que sucedió en la colisión. Para manejar los 40 millones de interacciones por segundo que se espera que ocurran, en cada colisión CMS usa un sistema de disparo o filtro (*trigger*), con el cual sólo selecciona los eventos potencialmente interesantes para su estudio detallado, a un razón de aproximadamente cien eventos por segundo (figura 2).

El sistema GRID

Aun con este sorprendente sistema de filtrado, CMS estará produciendo una gran cantidad de datos para su análisis, más de cinco peta-bytes por año cuando se encuentre en su nivel óptimo de operación. Para poder realizar el análisis de estos datos, el LHC utilizará un método novedoso: un sistema distribuido de computación y almacenamiento de datos llamado GRID. En él, decenas de miles de computadoras tipo PC, distribuidas alrededor del mundo, colaborarán para tener una mayor capacidad de procesamiento que en una súper computadora y dar acceso a los datos a científicos de todo el orbe del mundo. El GRID de LHC sigue un sistema jerárquico bien definido. En el llamado centro "Tier 0", ubicado en el CERN, se realizará la reconstrucción completa de eventos y se empezarán a analizar patrones; pero los datos aún tendrán un proceso largo de estudio. Una vez que ya haya sido hecho el primer registro de datos en CERN, será transmitido a los siete centros "Tier 1", localizados alrededor del mundo: Francia, Alemania, Italia, España, Taiwán, Reino Unido y Estados Unidos. Ahí, los eventos serán nuevamente reconstruidos con

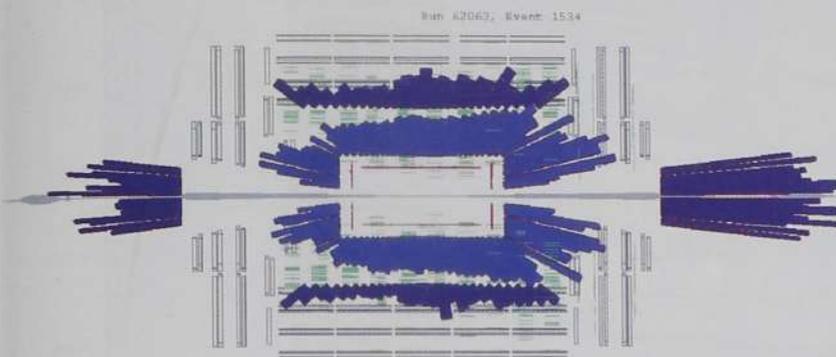


Figura 3. Uno de los primeros eventos observados por el detector CMS durante el encendido del LHC el 9 de septiembre de 2008.

información más refinada de las constantes de calibración del experimento. Los “Tier 1” iniciarán la identificación de las partículas y los eventos en busca de patrones característicos; los datos más complejos serán enviados a los centros “Tier 2” para un análisis más detallado. Actualmente existen cuarenta centros “Tier 2” en el mundo. Así, la información se distribuye para que los físicos y estudiantes en México, Japón o de cualquier otro país puedan estudiar los datos de CMS en su propia computadora empleando herramientas del GRID del LHC.

La física

El CMS fue diseñado para estudiar una gran variedad de partículas y fenómenos producidos en colisiones de altas energías en el LHC. La información obtenida con CMS servirá para responder preguntas básicas como: ¿de qué está hecho el universo? y ¿qué fuerzas actúan en él?, pero también servirá para estudiar, con mucho mayor precisión y detalle, las propiedades de partículas que ya han sido descubiertas con anterioridad, así como para buscar u observar nuevos fenómenos no predichos u observados hasta ahora (figura 3).

El Universo

Para entender cómo CMS puede ayudar a responder de qué está hecho el Universo, primero debemos entender cómo visualizamos la región en que vivimos. El modelo que mejor describe su comportamiento parte del hecho de que todo se inició en una masiva explosión que creó una gran cantidad de calor y energía, que hasta hoy día observamos como el ruido cósmico en forma de microondas (el célebre *Big Bang*). Esta gigantesca explosión sucedió hace aproximadamente 13,7 mil millones de años. Extremadamente caliente y denso, tan sólo unos momentos después de la explosión el Universo empezó a enfriarse, condición para que se formaran los bloques fundamentales de la materia, es decir los quarks y electrones. Unas millonésimas de segundo después esos quarks se unieron para formar protones y neutrones, los cuales a su vez se unieron para formar núcleos tan sólo tres minutos más tarde. El Universo continuó su expansión y enfriamiento pero, a partir de entonces, la evolución fue más lenta. Tuvieron que pasar cerca de 380 mil años para que los primeros electrones fueran atrapados en órbitas alrededor de los núcleos y así se formaran los primeros átomos: helio e hidrógeno. Pasaron otros 1.6

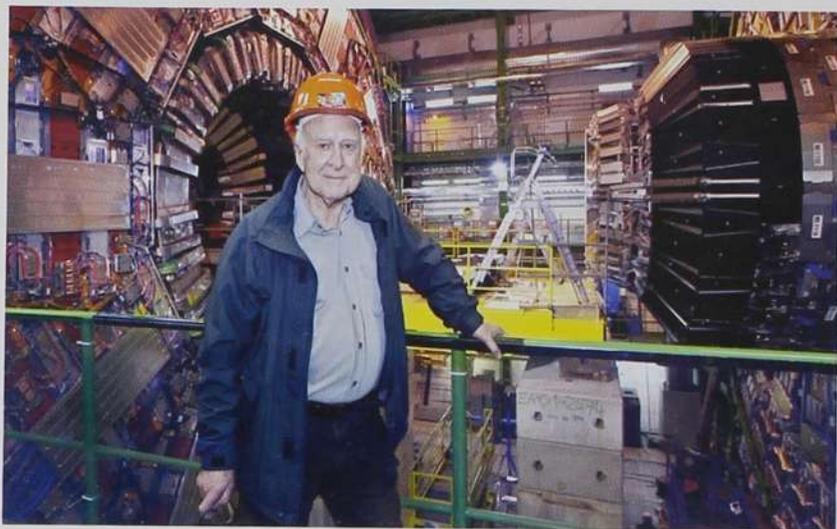


Figura 4. Peter Higgs en la visita al detector CMS durante la primavera de 2008.

mil millones de años antes de que la fuerza de gravedad empezara a tener control sobre las nubes de gases y se formarían las estrellas y galaxias. A partir de ese momento los átomos más pesados, como carbón, oxígeno y hierro, fueron creados de manera continua en el interior de las estrellas y luego dispersados en el Universo, como ocurre cuando una estrella llega a su fin en forma de supernova.

Este modelo parece estar completo, ya que explica lo que ha sucedido desde el origen mismo del Universo hasta nuestros días, excepto por un pequeño detalle: las observaciones cosmológicas y astrofísicas han mostrado que todo lo mencionado sólo constituye 4% del total del Universo, es decir, toda la materia visible de los planetas y galaxias que observamos constituye esta minúscula parte del todo. El Universo está hecho de materia invisible, conocida como “materia oscura” (26%), y de energía oscura (70%). Al no emitir radiación electromagnética alguna, nosotros sólo podemos detectarlas vía sus efectos gravitacionales. De qué están formadas y el papel que juegan en la evolución del Universo es un misterio, pero con certeza sabemos que proporcionan grandes oportunidades para descubrir nueva física más allá del modelo estándar.¹

El modelo estándar

Durante el último siglo hemos sido testigos del increíble avance en el entendimiento de la estructura de la materia, tanto a nivel teórico como experimental. El mayor entendimiento que tenemos de la estructura de la materia se reduce a plantear que todo lo que observamos en el Universo está constituido por 12 bloques o partículas fundamentales y que las interacciones entre ellas se generan vía tres fuerzas fundamentales; asimismo, éste es el modelo estándar,² desarrollado a principios de la década de los años 70, que explica con gran éxito todos los resultados experimentales, además de predecir una gran variedad de fenómenos. En los últimos años, muchos experimentos han permitido establecer, con gran precisión, la solidez teórica de este modelo. Sin embargo, la teoría no está completa: sólo incorpora tres de las cuatro fuerzas fundamentales conocidas y deja sin respuesta preguntas importantes, como: ¿qué es la materia oscura? o ¿por qué hay más materia que antimateria? El gran ingrediente faltante del modelo estándar es la partícula conocida como bosón de Higgs,³ la cual no ha sido observada experimentalmente y sin ella no es posible ex-

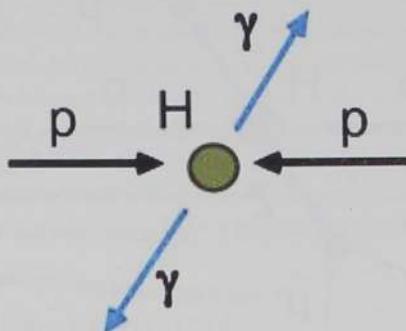
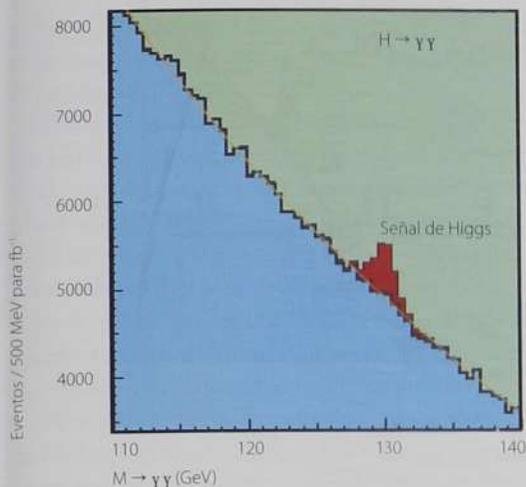


Figura 5. Proceso de producción del bosón de Higgs y su subsecuente decaimiento en dos fotones. En el gráfico de la izquierda se observa cómo se vería una distribución de masa invariante para dos fotones; la señal del bosón de Higgs es muy pequeña comparada con todo el ruido de fondo.

plicar el origen de la masa de las partículas. Pese a ello, el modelo estándar no es una teoría incompleta; tal vez sólo sea parte de otra teoría más grande, cuya física ha estado oculta en el mundo subatómico o en la obscuridad del Universo. El Gran Colisionador de Hadrones seguramente ayudará a encontrar las piezas faltantes de este enorme rompecabezas.

El bosón de Higgs

Como hemos mencionado, uno de los mayores logros en física de partículas elementales ocurrió cuando, a principios de los años 70, los físicos se dieron cuenta que existían muchas similitudes entre dos de las cuatro fuerzas fundamentales: la fuerza electromagnética y la fuerza débil. Estas dos fuerzas podrían describirse con una misma teoría, que junto con la cromodinámica cuántica (la teoría de la fuerza fuerte) constituyen la base del modelo estándar. Esta "unificación" implica que la electricidad, el magnetismo, la luz y algunos tipos de radiactividad son todas manifestaciones de una única fuerza, llamada fuerza electro-débil. Pero, para que esta "unificación" funcione mate-

máticamente, es necesario que las partículas portadoras de la fuerza no tengan masa. La experiencia nos indica que esto no es posible, puesto que esas partículas sí tienen masa. Para resolver el problema, el físico inglés Peter Higgs ideó una solución: el llamado mecanismo de Higgs (figura 4).

La idea básica consiste en suponer que todas las partículas carecían de masa hasta momentos después de la creación del Universo (el *Big-Bang*). Cuando el Universo se enfrió y la temperatura bajó de cierto valor crítico, un campo de fuerzas invisible, llamado campo de Higgs, se formó y con él, la partícula conocida como bosón de Higgs. Este campo llena todo el espacio por lo que cada partícula que interactúa con él adquiere masa vía el bosón de Higgs. Una partícula que tenga una interacción intensa será más pesada y las partículas que no interactúan con este campo no tendrán masa, como el fotón.

Esta idea proporcionó una solución satisfactoria que encaja bastante bien en las teorías y fenómenos ya establecidos; el problema es que el bosón de Higgs no ha sido aún observado experimentalmente y, por tanto, la teoría queda sin confirmar. De ahí que su observación resulte de suma importancia, aunque conlleva ciertos problemas técnicos: debido a que la masa

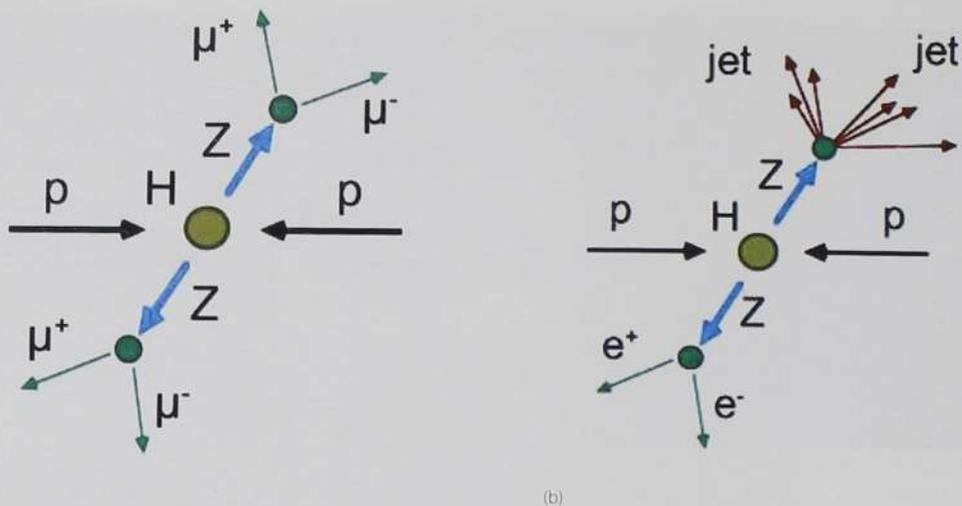


Figura 6. Procesos de producción del bosón de Higgs y su subsecuente decaimiento en un par de bosones Z. (a) Decaimiento totalmente leptónico de ambos bosones Z, (b) decaimiento semileptónico, es decir, un bosón decae en leptones y el otro en hadrones (jets).

del bosón no se conoce con precisión, es necesario realizar búsquedas sistemáticas en amplios intervalos de masa. El LHC servirá para explorar todas las regiones de masa todavía inaccesibles para los experimentos actuales y servirá para determinar la existencia de esta importante partícula. Si por acaso esta partícula no fuese encontrada, abriría las puertas a una gran variedad de nuevas teorías que pretendan explicar el origen de la masa de las partículas por otros mecanismos.

El detector CMS fue diseñado para explorar diferentes regiones de energías y así aumentar las posibilidades de encontrar el bosón de Higgs. Si éste fuese relativamente ligero, por abajo de 140 GeV, la señal más sencilla para rastrearlo sería a través de su decaimiento en dos fotones (figura 5), los cuales son detectables en el calorímetro electromagnético de CMS. Este calorímetro (ECAL) es capaz de medir la masa de las par-

tículas con una precisión superior a 1% en esta región de energías. Si el Higgs fuese ligeramente más pesado, entre 150 y 180 GeV, la forma más probable de identificarlo sería vía su decaimiento en dos bosones W, los cuales a su vez decaen en dos leptones y dos neutrinos. Para identificar esos leptones en CMS, no sólo se requiere de un muy buen calorímetro electromagnético, sino, además, de un excelente sistema de detección de muones y sus trayectorias, sistemas integrados al detector CMS. Para identificar los neutrinos, CMS infiere su existencia vía el balance de energía en el hermético calorímetro electromagnético y hadrónico. Otra posibilidad para identificar el bosón de Higgs en el intervalo de energías entre 140 y 600 GeV sería a través de su decaimiento en dos bosones Z, los cuales a su vez decaen en cuatro leptones, como los electrones y muones (figura 6a), y el CMS es capaz de detectar

estas partículas con gran precisión gracias a su calorímetro electromagnético, detector de muones y sistema de detección de trayectorias.

Finalmente, si el bosón de Higgs fuese bastante pesado, con una masa superior a 500 GeV, las formas de detectarlos serían variadas y, como ejemplo, podríamos usar su decaimiento en dos bosones Z, seguido del decaimiento de uno de los bosones Z en leptones y el otro en quarks (figura 6b). Este evento se vería en un detector con una huella clara de dos leptones de un lado del detector y un haz de partículas al lado opuesto en forma de “chorros” de partículas, los cuales son identificados vía el calorímetro hadrónico de CMS.

Pero el bosón de Higgs no es único; otros modelos de supersimetría sugieren la existencia de cinco o más bosones de Higgs, los cuales pudieran ser observados en el LHC. Esto proporcionará, sin duda, una gran variedad de señales del Higgs a ser usadas, siendo usnas más probables que otras pero para las cuales CMS ha sido diseñado.

¿Qué otra física puede hacerse con CMS?

El detector CMS es un experimento diseñado para muchos propósitos; aunque el objetivo principal es la búsqueda del bosón de Higgs, su diseño permite que sea utilizado en la bús-

queda y observación de muchos otros fenómenos, los cuales pueden ser producidos en el LHC con mucha o poca frecuencia. Para los fenómenos de alta frecuencia, CMS será capaz de realizar mediciones de altísima precisión; mientras que para los fenómenos relativamente raros, CMS está optimizado para poder observarlos. Dentro del espectro de nueva física al que se tendrá acceso con el detector de CMS están: física de quarks pesados (*bottom* y *charm*), física del quark top, supersimetría, búsqueda de materia oscura, teoría de cuerdas, dimensiones extras, física de iones pesados y búsqueda de antimateria.

Participación mexicana

En CMS participarán investigadores y estudiantes mexicanos de cuatro instituciones del país: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Cinvestav, Universidad Iberoamericana y Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Estas instituciones participaron en la caracterización y construcción del detector de trayectorias y vértices de CMS, de vital importancia para la reconstrucción del bosón de Higgs. Para el proceso de análisis de datos, Cinvestav participará como Tier 2, en el GRID del LHC, siendo el lugar de análisis principal donde convergerán las otras instituciones mexicanas participantes del experimento.

REFERENCIAS

1. Véase, por ejemplo, A. Zepeda, *Avance y Perspectiva* 23 (4), 41 (2004).
2. Véase, por ejemplo, J. Konigsberg, *Ciencia* 56 (1), 20 (2005).
3. Véase, por ejemplo, M. Á. Pérez Angón, *Ciencia* 56 (1), 13 (2005).

El legado de HERA

Jesús Guillermo Contreras

HERA constituye un ejemplo exitoso de cómo desarrollar colaboraciones internacionales en el área de la física experimental de altas energías.

Los orígenes

La década de los años 70 estaba empezando cuando surgieron las primeras ideas para construir un colisionador de electrones y protones en el laboratorio DESY (*Deutsches Elektronen Synchrotron*), situado en Hamburgo, Alemania. Unos años antes, en experimentos de blanco fijo realizados en el acelerador lineal de Stanford (SLAC) en California, se había descubierto que el protón estaba compuesto por partículas que, hasta donde alcanzaba la resolución del experimento, se podían considerar puntuales. Estos trabajos fueron honrados con el premio Nobel de Física de 1990 para Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall y Richard E. Taylor.¹ La máquina usada en estos experimentos, al igual que la de Hamburgo, es realmente un microscopio en su concepción, como se muestra en la figura 1. La fuente de luz es un electrón acelerado que radia un fotón, el cual es utilizado para ver dentro del protón. La resolución máxima de este microscopio está dada por la longitud de onda más pequeña que pueda tener el fotón. A su vez, esta longitud de onda está limitada por la cantidad de energía disponible.

Si uno desea observar con mayor detalle el interior del protón,² entonces conviene aumentar la energía disponible para la interacción. En los experimentos de SLAC, el electrón está en movimiento y el protón está en reposo. En consecuencia, hay dos métodos intuitivos para incrementar la energía disponible: (i) que el electrón viaje más rápido o (ii) que el protón viaje más rápido. La idea propuesta en DESY consiste

El Dr. Jesús Guillermo Contreras es investigador titular del Departamento de Física Aplicada de la Unidad Mérida del Cinvestav.
Correo electrónico: jgcn@mda.cinvestav.mx

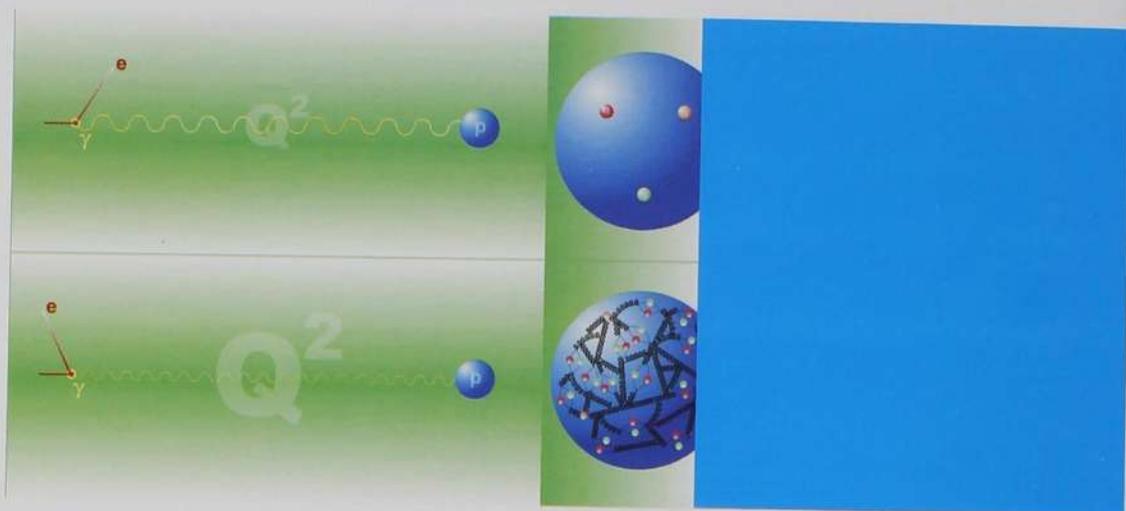


Figura 1: HERA, el súper microscopio. El electrón acelerado emite un fotón con resolución Q^2 , el cual ve el interior del protón. A mayor resolución, más detalles pueden ser observados.

en usar ambos métodos: construir dos aceleradores, uno para los electrones y otro para los protones. Además se propuso que los aceleradores fueran circulares para poder reusar los haces una y otra vez.³ Gracias al empuje del noruego Bjørn Wiik, un genial constructor de aceleradores, y en parte a la decisión del CERN⁴ de construir LEP (*Large Electron Positron Collider*), la propuesta de construir lo que sería HERA (*Hadron Elektron Ring Anlage*) tomó fuerza.

La gestión de HERA

En junio de 1977 apareció el reporte *Física con grandes anillos colisionadores de electrones y protones*,⁵ en el cual por primera vez se publicaron las ideas básicas y las ventajas de un acelerador de este tipo. Para 1980 se había hecho ya un estudio más amplio y, con base en él, se presentó en 1981 una propuesta en detalle, la cual fue aprobada. En 1983 el Ministerio Alemán para la Investigación y Tecnología (BMFT) aportó fondos, de tal manera que en 1984 se pudo firmar el convenio de construcción de HERA.

Apenas tres años después se había terminado el túnel de 6.3 km de circunferencia, construido entre 10 y 25 metros bajo la ciudad de Hamburgo. Para hacerlo, se usó una máquina especial que arrancó en un punto y meses después completó el círculo al regresar al inicio, teniendo una desviación de tan sólo dos centímetros en su recorrido. Ahora había que terminar de construir los aceleradores e instalarlos en el túnel. El primer haz de electrones circuló en 1988 y dos años después se terminó el anillo de protones. La primera colisión ocurrió el 19 de octubre de 1991, mientras que el inicio formal de HERA fue el 1 de octubre de 1992. Algunos parámetros del acelerador se presentan en la tabla 1. Con los datos mostrados en esta tabla se encuentra que la resolución máxima de HERA es de 0.000 000 000 000 000 000 000 5 metros. ¡En verdad un súper microscopio!

A caballo dado sí se le ve el colmillo

En su momento HERA fue el proyecto científico más costoso en la historia de Alemania. Su financiamiento creó los esquemas de cooperación internacional que hoy en día se utilizan

comúnmente en las colaboraciones que participan en megaproyectos internacionales. La comunidad científica internacional sabía que sin el apoyo de todos no se construiría nada. Se buscaron y consiguieron muchas contribuciones de materiales y servicios; varias de ellas sin firmar ningún contrato por gobiernos o agencias. Once países, además de Alemania, contribuyeron a la construcción de este acelerador. Hubo momentos en que hasta la mitad del personal de HERA provenía del extranjero. En total 45 institutos y más de 320 compañías participaron en la construcción del acelerador, el cual fue financiado en más de 20% por fondos foráneos.

Una de las facetas más sorprendentes de la historia de HERA, y que debería ser un ejemplo a seguir para aquellos países que sueñan con mejorar su nivel científico y tecnológico, es la siguiente: Italia, a través del INFN (Instituto Nacional de Física Nuclear), ofreció, como su contribución al proyecto, construir los 422 dipolos superconductores para el anillo de protones. Esto hubiera sido un ahorro muy importante de dinero; sin embargo, sólo se aceptó la mitad de la oferta italiana. Era una prioridad que las compañías alemanas interesadas en el proyecto adquirieran el conocimiento y la experiencia para construir magnetos superconductores. En lugar de ahorrar dinero, se decidió invertir en desarrollar la industria alemana para que aprendiera nuevas técnicas, desarrollara tecnología y participara en proyectos de esta envergadura.

Los detectores

Pero el acelerador es sólo una parte del microscopio. La acción de ver profundamente en el interior del protón lo rompe y su estructura sólo se puede inferir a partir de las partículas creadas en la colisión, lo cual implica que tenemos que medir las propiedades de estas partículas. Para lograrlo, se construyeron cuatro grandes detectores alrededor de la circunferencia del acelerador: H1, HERA-B, HERMES y ZEUS. Otra vez el modelo internacional fue éso, modelo: cada uno de estos detectores fue construido por colaboraciones internacionales. Más de mil 200 científicos de 25 países participaron en la construcción de los detectores; sus instituciones de procedencia, no sólo pusieron personal altamente calificado, sino

que aportaron más de la mitad del costo de los proyectos. Al igual que la construcción de HERA, el diseño, construcción y mantenimiento de los detectores fueron un motor tecnológico que desarrolló, entre otras cosas, electrónica ultra rápida, sistemas de cómputo para procesar terabytes de información, sistemas de control y seguridad. Además, han sido un semillero muy exitoso de futuros científicos. Tan sólo en la Colaboración H1 han obtenido su grado de doctor en Ciencias más de 300 estudiantes.⁶

La física de HERA

Está fuera del alcance de este texto resumir las contribuciones que estas colaboraciones han hecho a la física a través de sus varios cientos de publicaciones,⁷ así que me limitaré a mencionar brevemente sólo tres resultados.

1. Medición del corrimiento de la constante de acoplamiento fuerte. Actualmente se cuenta con el modelo estándar, que describe exitosamente las mediciones experimentales de procesos que ocurren a través de las fuerzas fuerte, débil y electromagnética. Ésta es una teoría cuántica de campos relativistas basada en el principio de norma. La fuerza fuerte es más intensa mientras más lejanas están las cargas de prueba, como se muestra en la figura 2. Este comportamiento es el opuesto al de las fuerzas electromagnética y gravitacional. La búsqueda de una teoría con este comportamiento fue ardua y los científicos que lograron proponer una con estas características —Gross, Politzer y Wilczek— recibieron el Premio Nobel de Física en 2004.^{8,9} Un punto interesante es que una gráfica similar a la mostrada en la figura 2, hecha con datos de la Colaboración H1, aparece en el material que la Fundación Nobel puso a disposición de los medios al anunciar el premio.

2. Medición de la unificación electrodébil. Otro de los aspectos del modelo estándar, que ha sido comprobado espectacularmente con las mediciones realizadas en HERA, es la unificación de las fuerzas electromagnéticas y débiles. Según el modelo, ambas fuerzas son realmente una a altas energías, pero a las energías normales de nuestro mundo se ven diferentes. En la figura 3

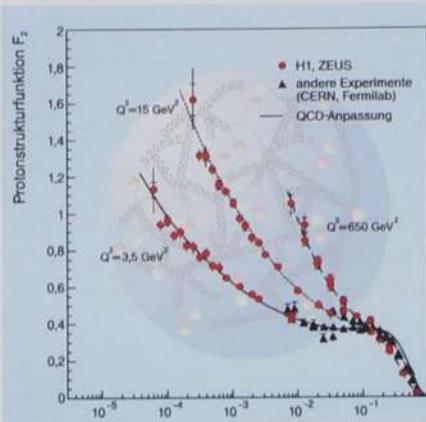


Figura 2: La intensidad de la interacción fuerte depende de la distancia entre la carga de prueba y la que está siendo probada. En la gráfica se presenta la fuerza de la interacción fuerte como función de la distancia entre la carga de prueba y el sistema estudiado. Mientras más cercanos están ambos, más grande es la fuerza.

se muestran resultados de HERA donde se logró medir la diferencia en ambas fuerzas conforme crece la energía, o de manera equivalente, se reduce la distancia entre la carga de prueba y el sistema bajo estudio. Al aumentar la energía (reducir la distancia), las fuerzas que aparentemente eran órdenes de magnitud diferentes, se van acercando poco a poco hasta que se unifican a altas energías.

3. Medición de la estructura del protón. Nuestro cuerpo está formado por átomos. Casi toda la masa de estos átomos reside en sus núcleos, los cuales están formados por protones y neutrones. Estos, a su vez, están formados por quarks y gluones cuya masa es despreciable (los quarks) o no tienen masa (los gluones). La masa de los protones está generada por la energía de amarre generada por la fuerza fuerte que da forma al protón. Sin embargo, a pesar de que los protones son un componente vital y literalmente ubicuo de nuestro mundo y de nuestros cuerpos, todavía no sabemos exactamente cómo los quarks y gluones que lo forman dan origen a sus propiedades.

Las mediciones realizadas en HERA han propiciado un gran avance en nuestro entendimiento del interior del protón.³ Un ejemplo de estas mediciones se muestra en la figura 4.

¿El fin de HERA? ¡De ninguna manera!

Después de quince años HERA suspendió de manera definitiva sus operaciones a fines del mes de junio del 2007. Sin embargo, esto no supone que la era de HERA ha terminado. La mayor parte de sus datos están por ser analizados. Se espera que al menos hasta el 2011, o aún más allá, aparezcan en las mejores revistas de la especialidad, y con la regularidad acostumbrada, resultados de HERA. Estos resultados son vitales para entender las colisiones que tendrán lugar próximamente en el LHC.¹⁰ Con un poco de suerte se encontrará el bosón de Higgs, la supersimetría y tal vez dimensiones extras o algo completamente inesperado. El legado de HERA va más allá de sus resultados en física: incluye el ejemplo de cómo construir

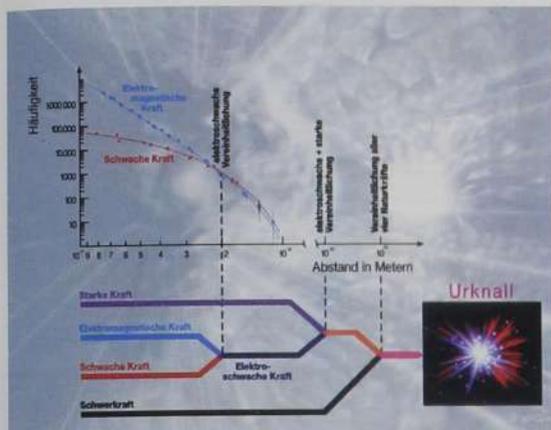


Figura 3: La intensidad de las fuerzas débil (línea roja) y electromagnética (línea azul) son muy diferentes cuando se observan a distancias relativamente grandes (extremo izquierdo de la gráfica). Pero mientras más pequeñas son las distancias (lado derecho de la gráfica) la intensidad de las fuerzas se acercan una a otra hasta que se unifican.

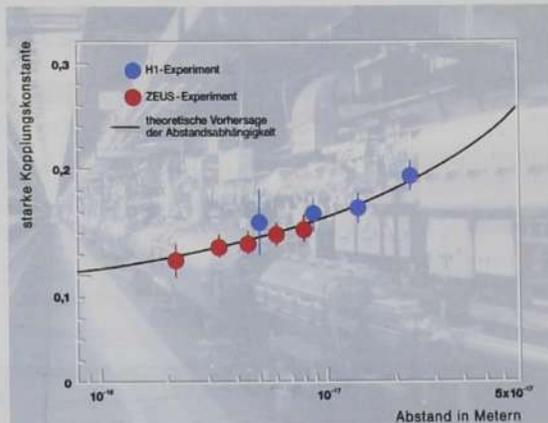


Figura 4: La estructura del protón depende de la resolución con que es observado. La gráfica muestra una cantidad relacionada con el número de quarks y gluones en el protón como función de la fracción de la energía del protón que porta cada uno de ellos. Los tres conjuntos de puntos representan diferentes resoluciones. La mayor parte de los constituyentes del protón portan poca energía.

una colaboración internacional exitosa sin ahogarla en la burocracia; incluye múltiples contribuciones a la tecnología actual y del futuro; incluye cientos de estudiantes extraordinariamente preparados que no sólo laboran en las mejores universidades e institutos de investigación del mundo, sino que también, y son la mayoría, se desempeñan en la industria pri-

vada en una gran variedad de puestos; algunos incluso han creado nuevas compañías y con ellas nuevos mercados; incluye, además, el sentimiento de una aventura compartida por gente de todos los colores y sabores que nos adentramos a mundos desconocidos, llenos de tesoros por descubrir. Éste es para mí el legado más importante de HERA.

REFERENCIAS

1. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1990/index.html
Las figuras 1-4 provienen del Departamento de Relaciones Públicas de DESY. Pueden verse en <http://zms.desy.de/images/content/e8/e76>.
2. Véase, por ejemplo, J. G. Contreras, *Ciencia* 56, 6 (2005).
3. En el acelerador hay paquetes que contienen varios miles de millones de electrones (protones) cada que estos paquetes se encuentran, sólo uno (o unos pocos para el LHC); de estos electrones choca con un protón del paquete opuesto. Las demás partículas siguen su camino sin notar que una del grupo ha colisionado.
4. El CERN es un laboratorio multinacional europeo. La decisión de construir LEP, un colisionador de electrones y positrones, detuvo

- las iniciativas existentes en DESY para la construcción de un acelerador similar, abriendo la puerta a nuevas propuestas.
5. C. H. Llewellyn-Smith y B. H. Wilk, *Physics with large electron-proton collider rings*, DESY 77-38 (1977).
6. http://www-hl.desy.de/publications/theses_list.html
7. Tan sólo la Colaboración H1 tiene alrededor de 170 publicaciones que han sido citadas más de 10 mil veces.
8. Véase, por ejemplo, J. G. Contreras, *Ciencia* 56, 84 (2005).
9. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/index.html
10. <http://www.desy.de/~heralhc/>



Pioneros en la construcción de la teoría moderna de las partículas elementales

Augusto García

El Premio Nobel de Física 2008 fue compartido por tres físicos japoneses: Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi y Tohishide Maskawa.

Simetrías externas e internas

El Premio Nobel de Física 2008 fue otorgado a tres físicos japoneses, pioneros en la formulación de las ideas básicas que permitieron construir la teoría más exitosa de la física moderna: el modelo estándar de las interacciones que describen la dinámica de las partículas elementales.¹ Yoichiro Nambu, profesor emérito del Instituto Fermi de la Universidad de Chicago, recibió la mitad del monto total que cubre dicho premio por el “descubrimiento del mecanismo que describe el rompimiento espontáneo de las simetrías en la física subatómica”.² La otra mitad del premio lo recibieron Makoto Kobayashi, director del Laboratorio de Investigaciones en Aceleradores de Altas Energías (KEK, por sus siglas en japonés), ubicado en Tsukuba, Japón, y Tohishide Maskawa, profesor titular de la Universidad de Kyoto, por su “descubrimiento del origen de la rotura de la simetría CP que predice la existencia de por lo menos tres familias de quarks en la naturaleza”.³

Mientras que la aportación acreditada a Nambu es de naturaleza más profunda, la contribución de Kobayashi y Maskawa (KM) se ubica en la estructura matemática del modelo estándar y está asociada a dos simetrías conocidas como conjugación de la carga eléctrica (C) y de paridad (P), esto es, de la inversión a través del origen de las coordenadas del vector de posición que describe el movimiento de las partículas. En tanto que la simetría P es de carácter externo, en el sentido que involucra cambios en los grados de libertad asociados a la posición de las partículas, la simetría C se define a través de transformaciones

El Dr. Augusto García es investigador emérito del Departamento de Física del Cinvestav. Correo electrónico: augarcia@fis.cinvestav.mx

matemáticas que sólo actúan sobre los grados de libertad internos, como lo es la carga eléctrica asociada a cada partícula, que no dependen de las coordenadas de posición y del tiempo que describen su movimiento pero están asociadas a las propiedades cuánticas, "internas", de las partículas elementales.

Cuando κM propusieron su formulación matemática para incluir posibles efectos asociados con la violación de estas dos simetrías de manera simultánea en las interacciones de las partículas elementales, se dieron cuenta que para ello era necesario ampliar la formulación del modelo estándar a por lo menos tres familias de quarks, que a su vez siempre aparecen en la naturaleza asociados en parejas (familias o dobles): los quarks más livianos, de tipo *u* (*up*) y *d* (*down*), constituyen los neutrones y protones que a su vez forman estados ligados en los núcleos de los átomos. Esta es la primera familia de quarks. La segunda está formada por los quarks de tipo *s* (*strange*) y *c* (*charm*). En ese entonces (1973) todavía no se había descubierto el quark *c* y los más pesados que integran la tercera familia: el quark *b* (*bottom*) y *t* (*top*). El modelo estándar predice que cada familia está integrada también por una pareja de leptones, las partículas más elementales que conocemos y que están emparentadas con el electrón. Los otros leptones son el muón y el tau, que en cada familia están acompañados por un neutrino: las partículas más ligeras que conocemos en la naturaleza y que son producidas en los decaimientos radiactivos de los núcleos atómicos y en las reacciones nucleares que ocurren en el interior del Sol.

La formulación de κM considera la existencia de una matriz de dimensión tres por tres, que sería la mínima que puede incluir en el modelo estándar la violación de la simetría CP a través de la presencia de una fase compleja en dicha matriz. En consecuencia, la formulación de κM requiere la existencia de una tercera familia, de manera que el modelo estándar sea consistente con los procesos ya observados que violan la simetría CP .

Simetrías y teoría de grupos

El concepto de simetría se utiliza en la física para especificar que la dinámica, esto es, las ecuaciones que describen el mo-

vimiento de un sistema, es invariante ante ciertas transformaciones que involucran a las variables dinámicas (coordenadas). Por ejemplo, desde el siglo XIX ya se sabía que la mecánica newtoniana (no relativista) es invariante ante rotaciones y traslaciones. En cambio, las ecuaciones de Maxwell, que describen los procesos electromagnéticos, son invariantes ante un conjunto de transformaciones que también se pueden entender como rotaciones pero en cuatro dimensiones, siendo la cuarta el tiempo. Estas transformaciones son precisamente las que postuló Einstein, siguiendo a Lorentz, en su teoría de la relatividad especial. Henri Poincaré demostró que estas transformaciones forman un grupo que ahora conocemos como el grupo de (Hendrik) Lorentz. Si a estas transformaciones les agregamos las traslaciones en espacio y tiempo, entonces tenemos el grupo de Poincaré. Los matemáticos han desarrollado una maquinaria muy poderosa alrededor de los grupos y esto ha permitido explotar el concepto de simetría en la física con mayor profundidad. En particular, nos interesa saber si una simetría es exacta o está rota en alguna medida. Decimos que una simetría está rota de manera espontánea cuando las soluciones de las ecuaciones de movimiento no son invariantes ante el conjunto de transformaciones que si dejan invariantes las ecuaciones de movimiento mismas⁴. Esto sucede en el fenómeno de magnetización de ciertos materiales conductores: mientras que las ecuaciones de Maxwell son invariantes ante rotaciones, la magnetización, que es una solución a dichas ecuaciones, no lo es debido a que la dirección de la magnetización en el laboratorio apunta a una dirección bien definida (rompe la simetría asociada a las rotaciones).

Un modelo muy premiado

El modelo estándar fue formulado en 1969 por Sheldon Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg. En 1979 recibieron el Premio Nobel y, a raíz de la confirmación experimental de algunas de las predicciones incluidas en este modelo, varios premios Nobel en Física han sido concedidos posteriormente:⁵ existencia de la segunda familia de quarks (*s,c*) en 1974; descubrimiento de los bosones de norma *W* y *Z* en 1983; la existencia de una segunda familia de neutrinos en 1988 y de la

tercera familia de leptones (tau) en 1991; la identificación de los quarks (partones) como constituyentes de los neutrones y protones en 1995; la formulación matemática del modelo estándar que es consistente con la teoría de perturbaciones, también llamada proceso de renormalización, y con los resultados experimentales de alta precisión en 2001; formulación, en 2005, de la teoría conocida como cromodinámica cuántica, que describe las interacciones fuertes entre los quarks y que les permite formar sólo estados ligados entre tres quarks o un par quark-antiquark. De esta manera, se puede apreciar que la construcción del modelo estándar ha sido una labor colectiva en la que han participado varias generaciones de físicos.

En este contexto, se justifica completamente la distinción que recibieron el presente año Nambu, Kobayashi y Maskawa como pioneros en la formulación de las ideas básicas que condujeron a la teoría más exitosa de la física moderna y que ahora denominamos como modelo estándar.

Bosones de Higgs y simetrías ocultas

La partícula más ligera que está constituida por un par quark-antiquark es el pión con una masa de 140 mega electrón voltios (MeV). El protón y el neutrón, formados a su vez por tríadas de quarks (*uud* y *ddu*, respectivamente) tienen una masa de magnitud mayor, del orden de mil MeV. ¿Por qué el pión es mucho más ligero que el protón o el neutrón? Esta es la pregunta básica que se formuló Nambu y que lo condujo a proponer que algunas simetrías internas de las partículas elementales no son exactas, sino que están rotas de manera espontánea. Este postulado conduce a la existencia de campos cuánticos (partículas) que no tienen masa: los célebres bosones de Nambu-Goldstone. Sin embargo, a través de correcciones radiactivas, en el siguiente orden de teoría de perturbaciones, adquieren una masa relativamente pequeña,

como fue el caso con el pión. Esta idea fue aplicada primeramente por Nambu para explicar de manera consistente (e invariante ante transformaciones de norma electromagnéticas) el fenómeno de superconductividad a bajas temperaturas, conocido como efecto Meissner.²

En el caso del modelo estándar de las interacciones electro-débiles, este rompimiento espontáneo de la simetría se concreta a través del mecanismo de Higgs, que permite generar de manera no perturbativa las masas de todas las partículas: quarks, leptones y los bosones de norma *w* y *z* que median las interacciones débiles. En cambio, los grupos que describen las interacciones fuertes y electromagnéticas permanecen exactos, y en consecuencia los fotones y los gluones, que son los bosones de norma que sirven de intermediarios de estas dos interacciones, permanecen sin masa. En el lenguaje de teoría de grupos, el grupo de simetría original del modelo estándar descrito por el producto tensorial de los grupos especiales unitarios $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ se reduce al producto $SU(3) \times U(1)$.

En mi opinión, el mecanismo asociado al rompimiento espontáneo de las simetrías es una de las tres ideas básicas que han tenido aplicaciones más exitosas en la física del siglo xx. Las otras dos son el principio de incertidumbre de Heisenberg y el principio de relatividad de Einstein. La combinación de estas dos últimas ideas conduce a la formulación consistente de una teoría cuántica relativista: la teoría cuántica de campos. Si a ella agregamos el mecanismo de Higgs o de rompimiento espontáneo de la simetría para generar las masas de las partículas de manera matemáticamente consistente, entonces obtenemos el modelo estándar de las interacciones electrodébiles entre leptones y quarks. Esta teoría es actualmente la de mayor poder de predicción y más precisa en cualquier rama de la física moderna. En este contexto, considero que era de elemental justicia reconocer con el Premio Nobel las ideas pioneras formuladas por Nambu, Kobayashi y Maskawa.

REFERENCIAS

1. Véase, por ejemplo, A. Zepeda, *Avance y Perspectiva* 23(4), 41 (2004).
2. Y. Nambu, conferencia presentada en 1960 en la Universidad de Purdue e incluida en *Broken Symmetry, selected papers by Y. Nambu* (World Scientific, Singapore, 1995); Y. Nambu y G. Jona-Lasinio, *Phys. Rev.* 122, 345 (1961).
3. M. Kobayashi y T. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.* 5, 652 (1973).
4. Véase, por ejemplo, M. Á. Pérez Angón, *Avance y Perspectiva* 19, 123 (2000); *Ciencia* 56(1), 13 (2005).
5. <http://www.kva.se>

Descubridor del origen infeccioso del carcinoma de cérvix

Nicolás Villegas Sepúlveda

El Premio Nobel en Fisiología y Medicina 2008 fue otorgado de manera compartida a un ciudadano alemán, el Dr. Harald zur Hausen, por descubrir que el *Papillomavirus* humano (HPV, por sus siglas en inglés) es el agente causante del cáncer cérvico-uterino; y a dos ciudadanos franceses, el Dr. Luc Montanier y la Dra. Françoise Barre Sinoussi, por el descubrimiento del HIV, agente etiológico del Síndrome de Inmunodeficiencia Adquirida (SIDA). Los 10 millones de coronas suecas que se otorgan a cada premio Nobel en el 2008 equivalen a un millón 400 mil USD y es el monto que otorga la fundación Nobel a sus laureados desde 2001. El premio será compartido: la mitad para el Dr. Zur Hausen y la otra mitad se dividirá entre los dos investigadores franceses.

Harald zur Hausen nació en 1936 en la ciudad alemana de Gelsenkirchen, estudió medicina en las universidades de Bonn, Hamburgo, y finalmente fue en la de Düsseldorf donde recibió su grado de doctor en 1960. Actualmente es profesor emérito en el Departamento de Virología del *German Cancer Research Centre* (*Deutsches Krebsforschungszentrum*), mejor conocido como DKFZ, en Heilderberg, del cual fue jefe y director científico. Es autor de más de 327 artículos de investigación científica.

Con más de siete décadas de vida, Harald zur Hausen es un hombre esbelto que irradia seguridad en sí mismo, de apariencia pulcra y elegante, siempre impecablemente vestido, la mayoría de las veces con un traje formal; es de estatura mediana, que podría considerarse baja; su mirada es inteligente y locuaz, y casi siempre puede vérselo esbozando una

sonrisa amable. En los diversos eventos científicos a los que selectivamente acude, se sabe observado por los concurrentes al evento y parece disfrutarlo. Sin embargo, le gusta convivir con estudiantes y personajes del medio científico poco conocidos, en lugar de ocupar un espacio de honor entre los grandes investigadores del medio. Gusta de asistir a los congresos de investigación básica, mejor que a otros de corte clínico, como el que es organizado anualmente por el grupo de investigación *DN Tumor Virus*, que se lleva al cabo un año en Madison (Universidad de Wisconsin, EUA) y el siguiente en alguna ciudad europea. Cuando asiste a este congreso es usual verlo acompañado de su inseparable colega y esposa, la Dra. Ethel-Michele de Villiers, fiel compañera también en el estudio de los *Papillomavirus*, ya que ella es experta en tipos, variantes y la clasificación de HPV. Además, ella participó en la clonación y secuenciación de los primeros especímenes, aislando HPV6 y HPV11; posteriormente, usando estos virus como sonda molecular, se aislaron los tipos 16 y 18, y sus genomas fueron publicados por dos de sus estudiantes: Mattias Dürst y Michael Boshart en 1983 y en 1984, respectivamente.

En contra de dogmas científicos

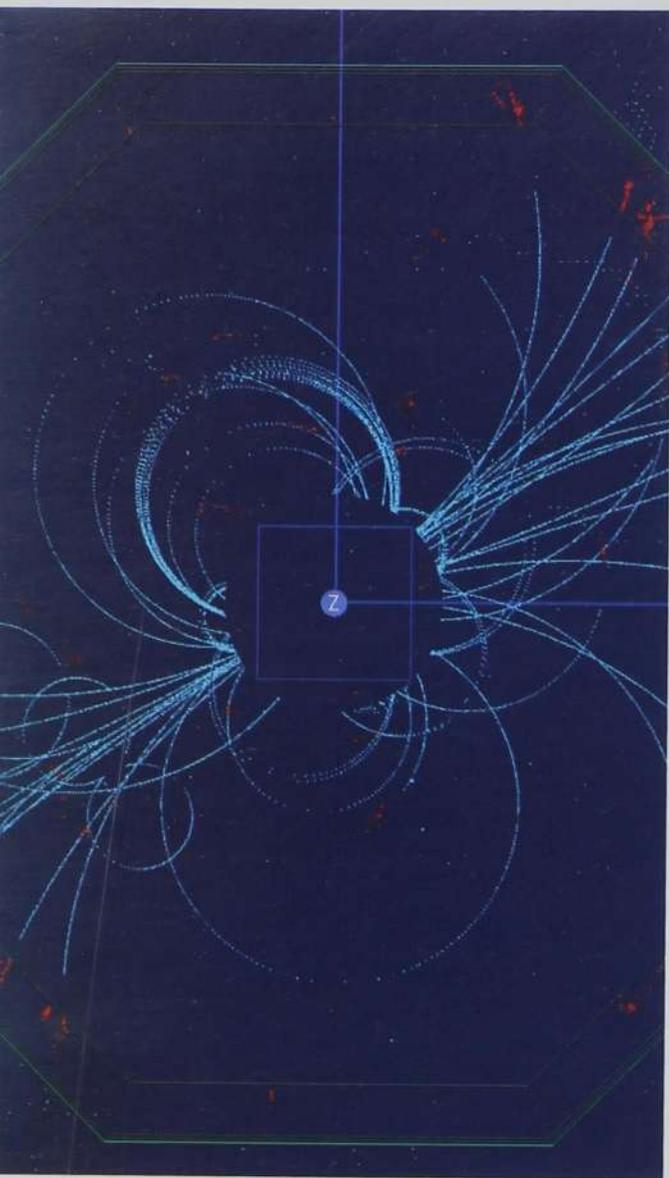
El Premio Nobel fue otorgado al Dr. Harald zur Hausen por haber postulado, a principio de los años 70, que el *Papillomavirus* humano podría ser el agente etiológico del cáncer de cérvix. Originalmente postuló sus ideas en una reunión cien-

tífica que tuvo lugar en 1974 en Key Biscayne, en la Florida. La reunión en cuestión era acerca del papel del *Herpes simplex* tipo 2 en cáncer cérvico-uterino pero, en su participación, Zur Hausen mencionó que su grupo no detectaba el virus *Herpes* en este tipo de cáncer y señaló que mejor se deberían buscar *Papillomavirus* humanos. Comentó, además, sobre la existencia de reportes múltiples en la literatura acerca de la presencia de HPV en verrugas genitales, que hasta entonces eran considerados como información anecdótica, aunque existían publicaciones que señalaban que las personas con cáncer de cérvix frecuentemente tuvieron lesiones verrugosas. Por supuesto, sus ideas no fueron bien recibidas por la comunidad científica. En esa época, aunque se sospechaba de un origen infeccioso para este tipo de cáncer, se pensaba que el agente responsable tendría que ser, necesariamente, un agente infeccioso transmitido por la vía sexual. Algunos investigadores pensaban que el agente infeccioso responsable podría ser un virus y la mayoría de los grupos de investigación se inclinaban por el virus *Herpes*, ya que se trataba de la enfermedad viral de transmisión sexual mejor conocida en esa época. Zur Hausen se planteó, desde ese tiempo, que si el agente responsable del cáncer de cérvix fuese un virus oncogénico, entonces los tumores deberían de contener ADN viral. Desde 1983, el grupo de Zur Hausen demostró y publicó en revistas de prestigio, como *EMBO*, *PNAS* y *J. Virology*, artículos en los que registra la detección de fragmentos de secuencia del genoma de HPV en muestras de tejidos aislados de tumores de mujeres con cáncer cérvico-uterino; estos datos sugieren al HPV como el agente respon-

sable de este tipo de cáncer. Dichos resultados iban en contra del dogma científico vigente en ese tiempo al postular que un virus, que entonces se sabía que producía verrugas en humanos, era un virus oncogénico y podría ser causante del cáncer de la cérvix. Harald zur Hausen y su grupo de investigación estaban solos en esa época y caminaban contra la corriente. Aunque sus ideas no fueron bien aceptadas entonces, Zur Hausen continuó apostando por el HPV como el agente responsable del cáncer cervical y, en 1985, logró aislar secuencias de los tipos 16 y 18 de muestras de tumores de la cérvix, resultados que se publicaron en la revista *Nature*. Además, él y su grupo de investigadores demostraron que los genes tempranos de HPV 16 y 18 se transcribían en los tumores y, en los años subsecuentes describieron los transcritos de los oncogenes E6 y E7 producidos por las células tumorales; concluyeron que eran procesados por *splicing*. Años más tarde, y con el trabajo de un gran número de grupos de investigación, se consolida el hecho de que ambos genes tempranos son oncogenes y actúan principalmente sobre dos proteínas claves en la regulación de la proliferación celular y la muerte celular programada: las proteínas Rb y p53, respectivamente.

Opciones de vacunas

Actualmente se conocen cerca de doscientos tipos de *Papillomavirus* y se han secuenciado los genomas completos de 150 tipos. Estos virus infectan epitelios y mucosas, a los que ingresan por lesiones mecánicas microscópicas; su blanco



son las células basales, que dan origen a los queratinocitos (éstos se diferencian para dar origen a las células de la piel), y su ciclo viral está ligado a la diferenciación de los queratinocitos, ya que sólo se producen partículas virales en los queratinocitos terminalmente diferenciados. Únicamente cerca de cuarenta tipos virales producen riesgo oncogénico y se clasifican como virus del alto o bajo riesgo oncogénico; el resto producen las verrugas comunes. Aunque se puede detectar al HPV en 99% de los tumores cervicales, sólo los tipos de HPV 16 y 18, originalmente descubiertos en los tumores de cérvix por Zur Hausen y su grupo, son los responsables de 80% del riesgo oncogénico, y el HPV-16 es detectado en más de 50% de los tumores de la cérvix. Cada año se diagnostica 500 mil mujeres con cáncer cervical en el mundo, la mayoría en los países subdesarrollados. Las investigaciones subsiguientes a los descubrimientos de Zur Hausen han permitido establecer claramente el origen infeccioso del cáncer del cérvix; también se reconoce el papel oncogénico de los genes tempranos E6, E7 y, probablemente, E4. Los oncogenes son expresados de manera preferencial en las células tumorales, ya que frecuentemente el virus se integra durante el proceso oncogénico, por lo que el resto de sus genes no son expresados y no se forman las partículas virales en los tumores. Aunque se conoce a profundidad el efecto que los oncogenes E6 y E7 ejercen sobre las proteínas p53 y pRb encargadas del control de la integridad del genoma y la división celular respectivamente, ambos actúan alterando los mecanismos normales de degradación de estas proteínas claves para el control de la integridad celular, y el resultado es que sus niveles disminuyen considerablemente en la célula tumoral. Sin embargo, se está lejos de conocer a fondo cómo actúan estas dos proteínas oncogénicas, ya que ambas afectan el funcionamiento de otra veintena o más de proteínas celulares: ciclinas, ubiquitilinas, fosfatasa PP2A, caspasa 8, receptor de TNF, TRAIL, proteínas de la unión estrecha, sólo por mencionar algunas. En conjunto, las proteínas afectadas alteran los mecanismos

de control de la apoptosis, el crecimiento celular y de la inhibición por contacto, todos indispensables para mantener la homeostasis celular, por lo que las células infectadas con HPV se transforman y, posteriormente, se malignizan dando origen al cáncer.

Los descubrimientos obtenidos desde las primeras aportaciones de Zur Hausen han permitido que actualmente se cuente con varias opciones de vacuna contra los tipos virales más frecuentes de HPV; en ellas se fincan amplias esperanzas sobre su funcionamiento, que se concretará probablemente en una generación. Esto aumenta su relevancia, debido a que hoy día se reconoce al HPV como responsable de todos los cánceres anogenitales, cérvix, pene, próstata y ano, además de cáncer oral, posiblemente algunos tipos de cáncer de mama y otros.

Descubridores de virus HIV

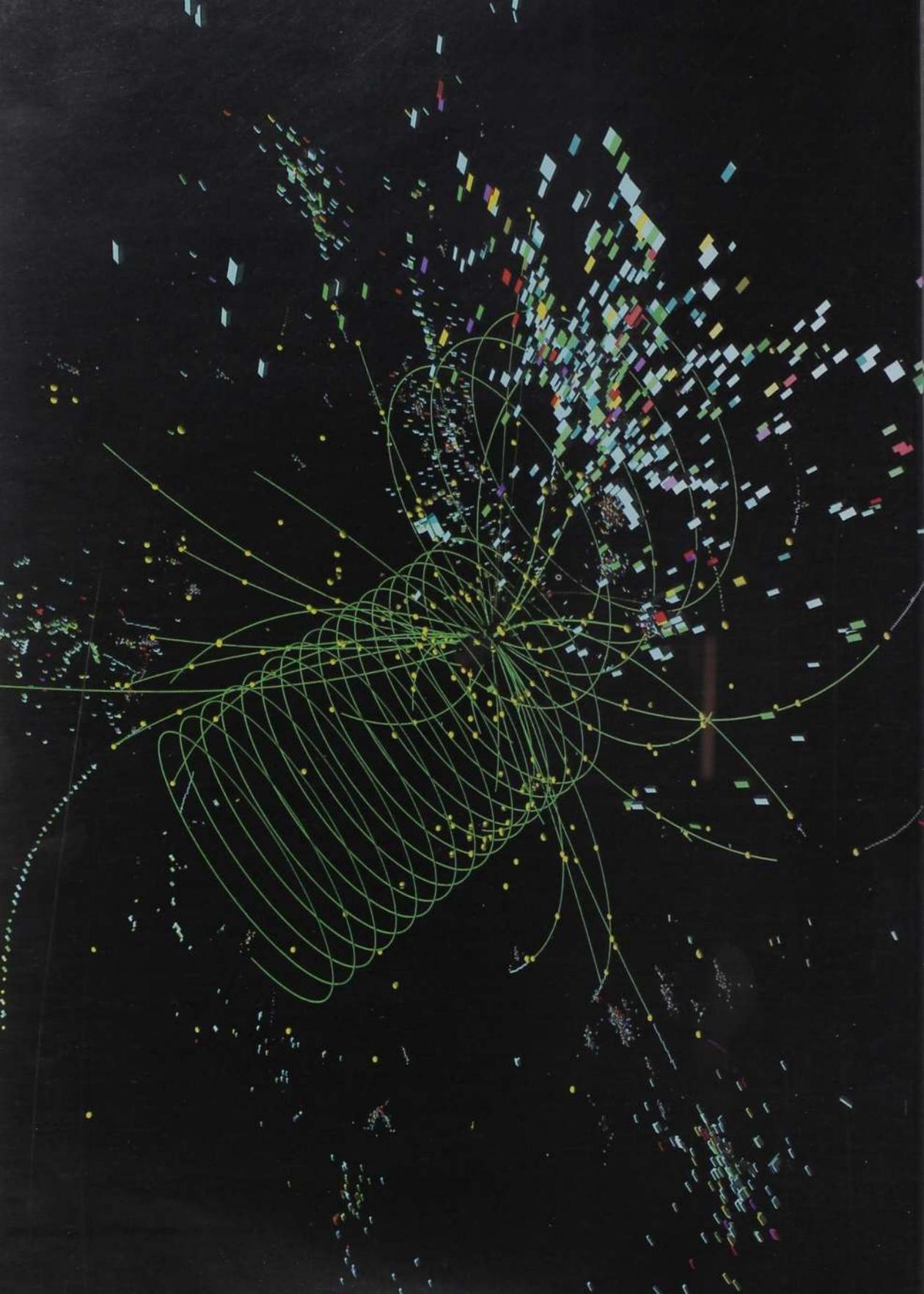
El Premio Nobel se otorga a investigadores que hacen un descubrimiento importante y no por una trayectoria o por las investigaciones subsecuentes. Sin duda, en el caso de la investigación sobre el papel oncogénico del HPV, un gran número de investigadores hicieron contribuciones científicas muy importantes; tal vez incluso de mayor relevancia que el descubrimiento del virus en un número específico de tumores. Sin embargo, como ya se mencionó, el premio se otorga al investigador que hizo el descubrimiento inicial y no a los que desarrollaron una idea. El mismo caso se aplica a los descubridores del virus HIV como el agente responsable de Síndrome de Inmunodeficiencia Adquirida (SIDA). Indiscutiblemente, cada año que se nombra a uno o varios ganadores de esta distinción; algunos investigadores consideran que otro colega era merecedor del galardón. A lo largo de los años hemos conocido los diferentes casos de investigadores que se sienten relegados, e incluso dan lugar a notas en revistas importantes

como *Nature* y *Science*, donde fijan su posición o manifiestan las injusticias cometidas por el comité de selección de la Fundación Nobel. Sin embargo, este tipo de manifestaciones públicas sólo muestra que se desconoce por qué se otorga una distinción como ésta. Otro punto que es importante mencionar es que existe un límite de galardonados y sólo se puede premiar a tres investigadores simultáneamente. Todo ello hace más difícil que los involucrados en un descubrimiento puedan ser galardonados. Seguramente, esta regla ayuda a aumentar los sentimientos de injusticia, sobre todo cuando un premio es compartido por varios grupos con descubrimientos diferentes.

Aunque Harald zur Hausen nos puede parecer un personaje muy ajeno a Cinvestav, debo mencionar que egresados del Departamento de Genética y Biología Molecular, como Adriana Aguilar Lemarroy, quién hizo una estancia en su laboratorio y probablemente continuó como estudiante posdoctoral; Alejandro García Carranca, quien trabajó con un investigador de su grupo en una estancia posdoctoral (Dr. Gissmann), sin mencionar otros estudiantes que han trabajado en su grupo recientemente en el laboratorio de la Dra. de Villiers. En la actualidad, por lo menos un par de profesores del área biológica continúa colaborando con el Dr. Zur Hausen o con algún otro integrante de su grupo.

REFERENCIAS

1. L. Gissmann, H. Pfister, H. zur Hausen, *Virology* 76, 569 (1977).
2. M. Dürst, L. Gissmann, H. Ikenberg, H. Zur Hausen, *Proc. Natl. Acad. Sci. EUA.* 80, 3812 (1983).
3. E. Schwarz, U. K. Freese, L. Gissmann, W. Mayer, B. Roggenbuck, A. Stremlau, H. Zur Hausen, *Nature* 314, 111 (1985).
4. Entrevista con Harald zur Hausen por Adam Smith, editor responsable de *Nobelprize.org*, publicada por la Organización Nobel en Internet: http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2008/hausen-telephone.html



La linterna verde de las ciencias biológicas y de la salud

Agustín Guerrero Hernández y Gabriel Cota Peñuelas

El Premio Nobel de Química 2008 fue otorgado a Osamu Shimomura, Martin Chalfie y Roger Y. Tsien en reconocimiento a la relevancia del descubrimiento y desarrollo de la proteína verde fluorescente (GFP, por sus siglas en inglés).

La luminiscencia de las medusas

Osamu Shimomura es un químico y biólogo marino japonés que trabajó inicialmente en la Universidad de Nagoya, Japón, y luego en el Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, en Massachusetts, EUA, antes de retirarse en 2001. Durante el largo tiempo que se desempeñó como investigador activo, su interés se centró en el fenómeno de bioluminiscencia (esto es, la generación de luz por organismos vivos), particularmente en animales marinos. El mayor fruto de sus estudios fue el descubrimiento, en la década de 1960, de dos proteínas intracelulares que explican la luminiscencia de la medusa *Aequorea victoria*. A la primera de ese par de proteínas la llamó acuorina (*aequorin*), en clara referencia a su fuente, en tanto que la segunda quedó bautizada como GFP.¹ Ambas proteínas permiten a las medusas producir luz mediante un mecanismo similar, pero no idéntico, al que opera en las luciérnagas, el cual depende del funcionamiento de la luciferina y una luciferasa. En el caso de las medusas, las investigaciones de Shimomura revelaron que cada destello luminoso es comandado por un aumento de la concentración intracelular del ion calcio (Ca^{2+}). El incremento del Ca^{2+} es detectado por la acuorina, misma que, en presencia adicional de oxígeno, responde emitiendo luz de color azul (469 nm de longitud de onda). A su vez, la luz azul excita a la GFP, que, por fluorescencia, emite subsecuentemente luz de color verde (510 nm; figura 1).

El Dr. Agustín Guerrero Hernández es investigador titular del Departamento de Bioquímica del Cinvestav.
Correo electrónico: aguerrero@cinvestav.mx

El Dr. Gabriel Cota Peñuelas es investigador titular del Departamento de Fisiología, Biofísica y Neurociencias del Cinvestav.
Correo electrónico: gcota@fsio.cinvestav.mx

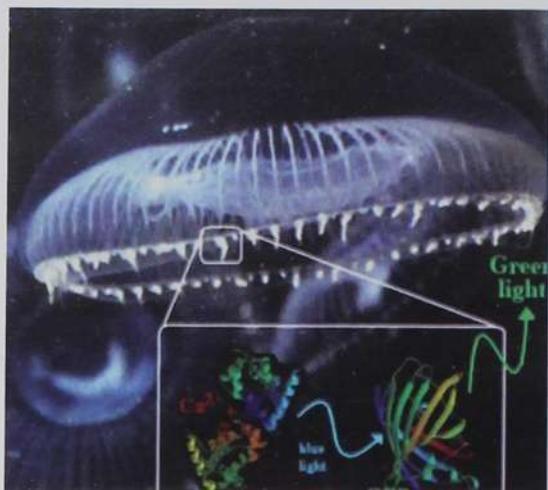


Figura 1. Imagen compuesta que muestra los órganos luminiscentes de una medusa y el respectivo mecanismo molecular responsable de la emisión de luz. Imagen tomada de la página web del Dr. Osamu Shimomura.



Figura 2. Estructura cristalina de la GFP. Imagen tomada de la página web del Dr. Roger Y. Tsien.

Visualizando la expresión de genes con la GFP

Martin Chalfie es neurobiólogo estadounidense. Se doctoró en la Universidad de Harvard y realizó estudios posdoctorales en el Instituto de Biología Molecular de Cambridge, Inglaterra. De 1982 a la fecha labora en la Universidad de Columbia, Nueva York, donde conduce investigaciones relacionadas con la biología molecular de los circuitos neuronales del nemátodo *Caenorhabditis elegans*. Años después del descubrimiento de la GFP por Shimomura, a Chalfie se le ocurrió utilizarla como un marcador de expresión génica. En concreto, Chalfie logró visualizar los genes que se activan durante el desarrollo del sistema nervioso de *C. elegans*.² Esta idea se pudo llevar a cabo gracias a que otro biólogo molecular estadounidense, Douglas Prasher, había clonado previamente el gen que codifica para la GFP,³ y Prasher fue lo suficientemente generoso para compartirlo con Chalfie. ¿Qué hace que la GFP sea un buen marcador de expresión génica? Hay cuatro razones al respecto. La primera es que una molécula relativamente pequeña (su secuencia incluye unos 220 aminoácidos), de tal suerte que es factible

hacerla colgar de otras proteínas celulares sin que afecte mayormente los niveles o funcionamiento de las mismas. La segunda razón, y probablemente la más importante, es que la GFP tiene la habilidad de catalizar la formación de su propio fluoróforo en presencia de oxígeno (como su nombre lo indica, el fluoróforo es la parte de la molécula que está directamente involucrada en la emisión de fluorescencia). En tercer lugar, la estructura tridimensional de la GFP se asemeja a un barril, en cuyo centro quedan acomodados y protegidos los aminoácidos que conforman el fluoróforo (figura 2). El fluoróforo de la GFP, por lo tanto, se caracteriza por su estabilidad e independencia del medio en que se encuentre la proteína. La cuarta y última razón es que los investigadores han sido capaces de introducir diferentes mutaciones en la GFP, algunas de las cuales incrementan la fluorescencia de la proteína, en tanto que otras modifican su espectro de emisión, lo que resulta en nuevas proteínas fluorescentes de diferentes colores, desde el azul hasta el amarillo. Un bonito ejemplo de la enorme utilidad de esto último es el arco iris cerebral (*brainbow*), que fue puesto de manifiesto recientemente por Livet y colaborado-

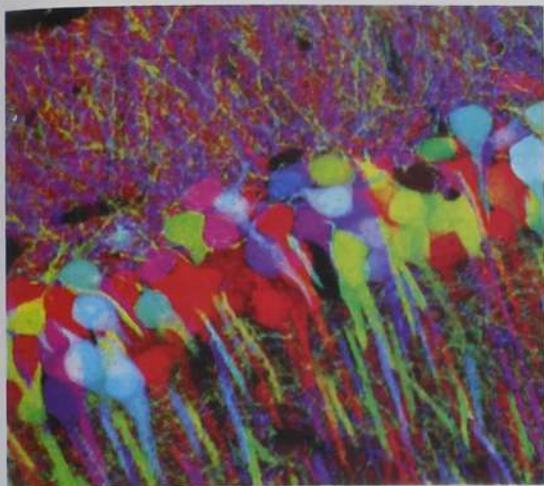


Figura 3. Arco iris cerebral. Ejemplo de la utilización de diferentes variantes sintéticas de la proteína verde fluorescente para teñir neuronas con distintos colores y definir, así, tanto la ubicación y morfología de las mismas como los contactos que se establecen entre una neurona y otra.

res.⁴ En ese trabajo se consiguió que las neuronas del encéfalo de ratones transgénicos expresaran, de forma aleatoria, diversos niveles de tres diferentes proteínas de la familia GFP. Como consecuencia de la distinta abundancia relativa de estas proteínas fluorescentes, las neuronas no se tiñeron de manera uniforme sino que adquirieron tonalidades particulares, dentro de una gama posible de alrededor de noventa colores diferentes, lo que brinda la posibilidad de estudiar con detalle la forma de las neuronas individuales, así como definir los contactos que cada neurona establece con sus vecinas (figura 3).

Los hermanos Tsien

Lo que sabemos acerca de cómo funcionan la GFP y sus variantes mutadas se debe en gran medida a los esfuerzos de Roger Y. Tsien,⁵ quien trabaja, desde 1989, en la Universidad de California en San Diego, EUA. Tsien es estadounidense de ascendencia china y, aunque su formación es la de bioquímico, prefiere llamarse a sí mismo ingeniero molecular. Brillante e inquieto

desde pequeño, estudió química y física en la Universidad de Harvard y recibió un doctorado en fisiología por la Universidad de Cambridge, Inglaterra, después de lo cual se incorporó como investigador en la Universidad de California. Roger, por cierto, tiene un hermano mayor, Richard, que es también investigador y con el que comparte un muy merecido prestigio en el campo de la fisiología celular del Ca^{2+} . La especialidad de Richard W. Tsien son los canales de calcio dependientes de voltaje, localizados en la membrana plasmática de las células excitables. Estos canales son proteínas con un túnel acuoso en su interior y hacen posible que los iones de Ca^{2+} puedan fluir desde el medio extracelular hacia el citoplasma durante la actividad eléctrica de las células neuronales, de los músculos o de glándulas endocrinas, lo que induce rápidamente la liberación de neurotransmisores, la contracción muscular y la secreción de hormonas, respectivamente. Además, a largo plazo, la entrada de Ca^{2+} resulta de importancia para el mantenimiento y remodelación del fenotipo celular, ya que su influencia regulatoria llega hasta el núcleo, en donde es capaz de estimular o inhibir la expresión de genes específicos.⁶

Roger decidió recorrer un camino diferente al de su hermano, así que en lugar de investigar los canales de calcio con métodos electrofisiológicos, se abocó al diseño de compuestos orgánicos que pudieran ser utilizados como indicadores ópticos de la concentración intracelular de Ca^{2+} . Su primer paso en esa dirección fue la síntesis, en la década de 1980, de un quelante de calcio de alta afinidad, selectivo y rápido al que denominó Bapta. Posteriormente, modificó la molécula del Bapta, uniéndole diferentes fluoróforos, y obtuvo así excelentes indicadores fluorescentes del Ca^{2+} intracelular como el Fura-2 y el Fluo-3, por citar los más conocidos. Estos compuestos pronto estuvieron disponibles comercialmente y resultaron muy fáciles de emplear, lo que propició una explosión en el número de trabajos de investigación dedicados a la participación del Ca^{2+} en la vida y muerte de las células. Como muestra de ello, se puede mencionar que el artículo en que se describen la síntesis y propiedades del Fura-2,⁷ ha recibido más de 17 mil citas en la literatura científica, según la base de datos *Web of Science*.

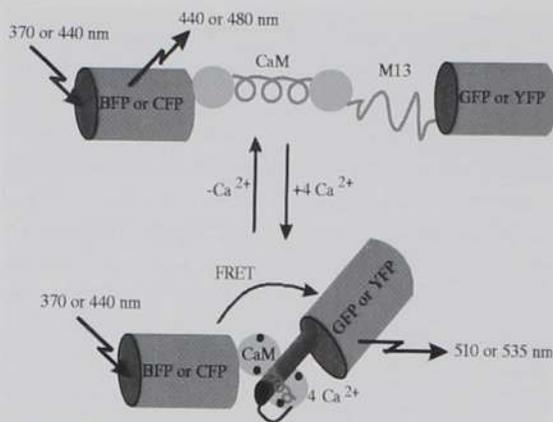


Figura 4. Principio del mecanismo utilizado por los *cameleons* para reportar cambios en la concentración intracelular de Ca^{2+} . La proteína calmodulina (CaM) tiene la propiedad de unir iones de Ca^{2+} (cuatro iones por molécula de CaM), y el complejo resultante Ca^{2+} -CaM interacciona con el péptido M13, lo cual induce un cambio conformacional que acerca a las dos proteínas fluorescentes (cilindros en ambos extremos del complejo). Imagen tomada del artículo de Miyawaki y colaboradores.⁷

La GFP entra al quite para medir el calcio intracelular

Los compuestos sensibles al Ca^{2+} del tipo Fura-2 tienen, generalmente, la inconveniente tendencia a distribuirse de manera homogénea dentro de la célula bajo estudio, lo que dificulta analizar por separado los cambios locales de la concentración de Ca^{2+} en organelos y otros compartimentos intracelulares. Por tal motivo, a partir de la década de 1990, Roger Tsien comenzó a explorar la posibilidad de utilizar la GFP para desarrollar una segunda generación de indicadores de Ca^{2+} sintéticos, cuyo destino final en la célula fuera susceptible de ser controlado por el investigador, labor que culminó en el diseño de los llamados *cameleons* (figura 4). Estos nuevos compuestos son el resultado de construcciones plasmídicas de genes que codifican para dos proteínas de la familia GFP de diferente color (generalmente azul y amarillo), la calmodulina (una ubicua proteína intracelular que sirve de sensor natural de Ca^{2+}) y el péptido M13, derivado de la cinasa de la subunidad pequeña de la miosina. Se genera así una proteína quimérica compleja,

la GFPazul-calmodulina-M13-GFPamarilla,⁸ que funciona como sigue: al subir la concentración de Ca^{2+} , este ion se pega a la calmodulina, y la calmodulina con calcio unido es reconocida por el péptido M13; esto ocasiona que las dos GFPs se acerquen entre sí, lo que permite que se presente el fenómeno conocido como FRET (siglas en inglés del término *Förster resonance energy transfer*). De esta manera, los incrementos del Ca^{2+} intracelular pueden ser detectados finalmente como cambios en la eficiencia del FRET entre ambas GFPs. Actualmente ya existe una gran variedad de *cameleons* para medir la concentración de Ca^{2+} selectivamente, ya sea en la mitocondria, el retículo endoplásmico o el aparato de Golgi, por ejemplo. Esto ha sido posible gracias a que se conoce con precisión la "etiqueta" o secuencia del péptido señal que debe tener una proteína para que ésta sea dirigida por la célula que la expresa hacia un cierto organelo y no a otro. Por otro lado, es relativamente sencillo añadir la secuencia del péptido señal de interés a los *cameleons*.

Nuevas aplicaciones de la GFP

A pesar de su versatilidad, los *cameleons* no están exentos de fallas, y la más notoria radica en el hecho de que su sensor de Ca^{2+} , es decir, la molécula de calmodulina, está presente de manera natural en prácticamente todas las células. Por lo mismo, la calmodulina endógena compite con la del *cameleon* por la unión con el péptido M13 y esto reduce la amplitud de la señal del *cameleon*. Para tratar de solucionar este problema, recientemente Tsien modificó el sitio de contacto entre la calmodulina y el péptido M13 mediante ingeniería genética. Su objetivo fue obtener un indicador de Ca^{2+} que no fuera perturbado por las proteínas endógenas de la célula, pero el éxito fue parcial porque no pudo reconstruir la unión de alta afinidad entre la calmodulina y el péptido M13 utilizando aminoácidos diferentes a los que han sido seleccionados por millones de años de evolución.⁹ No obstante, la ingeniería genética de las GFPs ha sido tan extensa que se han logrado obtener otras modificaciones útiles muy peculiares. Se ha encontrado, por ejemplo, que si bien la escisión en dos de una GFP y su expresión subsecuente de forma invertida

apaga su fluorescencia, ésta reaparece si la GFP invertida se encuentra formando parte del complejo Ca^{2+} -calmodulina-M13. Tales construcciones son conocidas como GFPs permutadas de forma circular (cpGFP) y se utilizan para diseñar indicadores de Ca^{2+} de un tamaño menor a los *cameleons*. Esto ha abierto la puerta a nuevas aplicaciones, incluyendo la detección de los cambios en la concentración de Ca^{2+} intracelular durante el latido del corazón en ratones transgénicos que expresan dichos indicadores¹⁰ de Ca^{2+} .

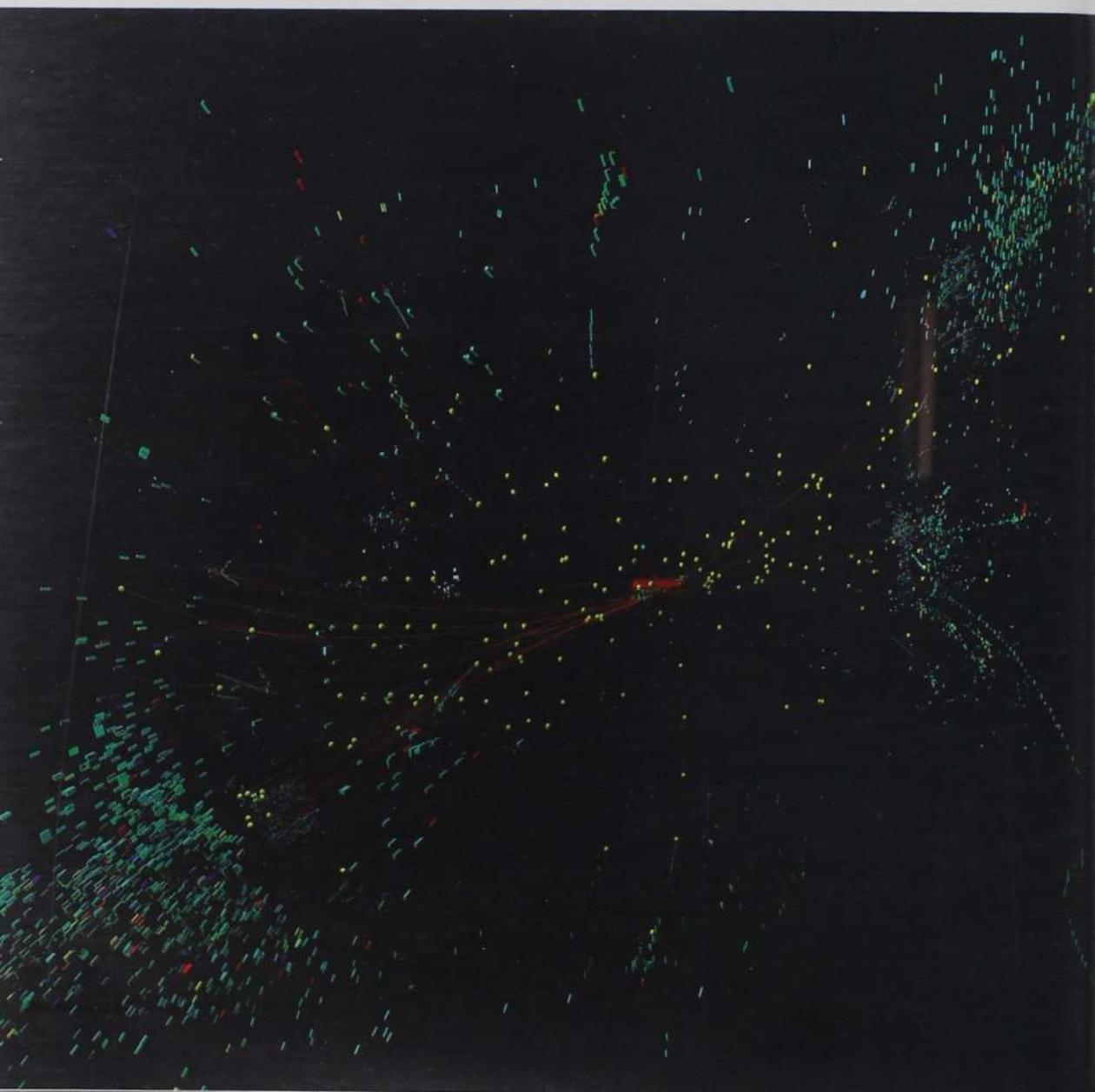
Aunado a lo anterior, la GFP y sus variantes sintéticas han resultado de extrema utilidad para estudiar la localización, función e interacción de diferentes proteínas de interés biológico.¹¹ La interacción entre proteínas, por ejemplo, se puede estudiar mediante un enfoque experimental que se conoce como complementación bimolecular de la fluorescencia. Digamos que queremos saber si la proteína A interacciona con la proteína B, entonces, con técnicas de ingeniería genética, se pega una mitad de la GFP amarilla a la proteína A y la otra mitad a la proteína B; cuando las proteínas A y B se unen de forma estable, las dos mitades de la GFP amarilla entran en contacto, lo que regenera la fluorescencia de esta última. Así, la señal de fluorescencia nos indica que la proteína A ha interaccionado con la B. Con este mismo enfoque se pueden definir, además, las condiciones que inducen o bloquean la asociación entre las proteínas A y B, y todo ello en células vi-

vas y en tiempo real. Por último, debemos mencionar que en la actualidad se cuenta con un buen repertorio de sondas fluorescentes que se pueden prender o apagar al gusto del investigador y que sirven de marca para rastrear el tráfico y movilidad de una proteína en diferentes compartimentos celulares, así como para seguir las migraciones celulares durante la formación de tejidos.¹¹

En las últimas dos décadas, la GFP se ha convertido en una maravillosa herramienta que permite visualizar y analizar diversos aspectos del funcionamiento celular, incluyendo la expresión de genes, la dinámica del calcio citoplásmico, el tráfico y distribución intracelular de proteínas y la actividad de cinasas y proteasas, entre muchos más. Probablemente Shimomura nunca se imaginó que sus estudios acerca de la luminiscencia de las medusas tendrían un impacto tan profundo y amplio en el avance de la biología celular y molecular. Hay que subrayar, sin embargo, que esta situación sigue siendo una constante en el trabajo científico puesto que, a pesar de encontrarnos ya en pleno siglo XXI y en la era postgenómica, no podemos anticipar con certeza la trascendencia práctica de los nuevos conocimientos básicos que están siendo generados en este preciso momento.

REFERENCIAS

1. O. Shimomura, *J. of Microscopy* 217, 3 (2005).
2. M. Chalfie y cols., *Science* 263, 802 (1994).
3. D. C. Prasher y cols., *Gene* 111, 229 (1992).
4. J. Livet y cols., *Nature* 450, 56 (2007).
5. R. Y. Tsien, *Ann. Rev. of Biochem.* 67, 509 (1998).
6. K. Deisseroth y cols., *Curr. Opin. Neurobiol.* 13, 354 (2003).
7. G. Grynkiewicz, *J. Biol. Chem.* 260, 3440 (1985).
8. A. Miyawaki y cols., *Nature* 388, 882 (1997).
9. A. E. Palmer y cols., *Chemistry and Biology* 13, 521 (2006).
10. Y. N. Tallini y cols., *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103, 4753 (2006).
11. B. N. Giepmans y cols., *Science* 312, 217 (2006).



Sin Dios

Steven Weinberg

Hechos y valores morales

En su muy comentado discurso presentado en la liga Phi Beta Kappa de la Universidad de Harvard en 1837, titulado “El estudioso norteamericano”, Ralph Waldo Emerson predijo que llegaría el día en que terminaría “nuestro largo aprendizaje del conocimiento generado en otras naciones”. Pero esta predicción no se materializó sino hasta el siglo xx y en especial en la actividad científica. Sin duda, esto habría complacido a Emerson: su lista de héroes incluía a Copérnico, Galileo y Newton al lado de Sócrates, Jesucristo y Swedenberg. No obstante, creo que Emerson habría tenido sentimientos encontrados sobre un tema asociado de manera directa con el avance de la ciencia, aquí y en otras partes: su pretendida influencia en la disminución de las creencias religiosas.¹

Emerson difícilmente podría ser considerado como un ortodoxo —en opinión de Hermann Melville, “si él hubiera vivido en los días en que fue creado el Universo, sin lugar a dudas habría hecho algunas propuestas más sensatas”—, pero por algún tiempo fue un predicador unitario que hablaba de manera convincente sobre la existencia del Ser Todopoderoso. Emerson se lamentaba cuando veía en sus mismos días un agotamiento de las creencias religiosas, no sólo de los sentimientos piadosos y la participación en los rituales religiosos en EUA y aún más en Inglaterra. Pero no puedo asegurar que lo atribuyera al avance de la ciencia.

La idea de que existe un conflicto entre ciencia y religión tiene una abundante genealogía. Según Edward Gibbon,

El Dr. Steven Weinberg, investigador titular del Departamento de Física de la Universidad de Texas, en Austin, EUA recibió el Premio Nobel en Física 1979 por sus aportaciones en la construcción del exitoso modelo estándar de las

interacciones entre las partículas elementales. La versión original de este artículo se publicó en *The New York Reviews of Books* (19/09/08). Traducción de M. Á. Pérez Angón.

empezó con la visión de la iglesia bizantina de que “el estudio de la naturaleza revela una señal inconfundible de una mentalidad no creyente”. Quizás la visión más conocida de este conflicto se formuló en el libro publicado en 1896 por el primer rector de la Universidad de Cornell, Andrew Dickson White, bajo el título *Una historia de la batalla entre la ciencia y la teología en el cristianismo*.

En los últimos años hemos tenido una escalada, para no decir guerra, entre ciencia y religión. En particular, Bruce Lindenberg y Roland Numbers, ambos conocidos historiadores de la ciencia, publicaron en 1986 un artículo donde describen una serie de lagunas en el estudio de White. La Fundación Templeton ofrece una alta recompensa a quien demuestre que no existe un conflicto entre ciencia y religión. De hecho, algunos científicos asumen esta línea de pensamiento con el fin de proteger la enseñanza de las ciencias de los activistas fundamentalistas. Stephen Jay Gould enfatizaba que no puede existir tal conflicto ya que para la ciencia sólo son importantes los hechos, mientras que para la religión son los valores morales. Por supuesto, esta visión no es compartida por muchos simpatizantes de la religión, pero es una evidencia del debilitamiento de las creencias en lo sobrenatural del gran número de los que se consideran religiosos y que coinciden con el punto de vista de Gould.

Estado de tensión

Supongamos por un momento que ciencia y religión no son incompatibles: después de todo existen (aunque no son muchos) científicos excelentes que tienen creencias religiosas sólidas, como Charles Townes y Francis Collins. Aun así, si no son incompatibles, es evidente que existe entre ellas cierto estado de tensión, como lo ha indicado Susan Haacks, y que ha minado las creencias religiosas serias, en especial en Occidente, donde la ciencia ha tenido avances más notables. En el presente artículo me gustaría delinear algunas de las fuentes de dicha tensión y formular opiniones sobre uno de los puntos más difíciles asociados con la declinación de las creencias religiosas: la cuestión de cómo será factible convivir sin Dios.

Fuentes de tensión

No creo que la tensión entre ciencia y religión sea una consecuencia directa de las contradicciones generadas por los descubrimientos científicos en algunas de las creencias religiosas específicas. Esto fue lo que preocupó principalmente a White, pero creo que estaba buscando en la dirección equivocada. Galileo insistió, en su famosa carta a la Gran Duquesa Cristina, que “la intención del Espíritu Santo es mostrarnos el camino al cielo, y no cómo el cielo realmente se mueve”. Además, ésta no era una opinión aislada: Galileo estaba citando, de hecho, al príncipe de la Iglesia y bibliotecario del Vaticano, el cardenal Barionus. Las contradicciones entre las sagradas escrituras y el conocimiento científico han surgido con mucha frecuencia y han sido suavizadas por algunos de los pensadores más brillantes de la Iglesia. Por ejemplo, hay algunos versos en el Antiguo y en el Nuevo Testamento que sugieren que la Tierra es plana. Copérnico había comentado (y así lo citó Galileo en la misma carta a Cristina) que esta interpretación había forzado a algunos líderes religiosos, como Lactanius, a rechazar las teorías griegas de que la Tierra era esférica. Ello a pesar de que algunos intelectuales cristianos ya habían aceptado, aun antes de los viajes de Colón y Magallanes, la forma esférica de la Tierra. De hecho, Dante había sugerido que el interior de la esfera terrestre podría ser un sitio adecuado para concentrar a los pecadores.

Lo que fue un asunto muy serio en los primeros días de la Iglesia, en nuestros días se ha convertido en una parodia. El astrofísico Adrián Melott de la Universidad de Kansas, en su lucha contra los fanáticos que pedían equidad en tiempo de exposición para las versiones creacionistas en las escuelas públicas, fundó una organización denominada FLAT (por sus siglas en inglés, *Familie for Learning Accurate Theories*). Esta sociedad parodió a los creacionistas al demandar que en las clases de geografía también debería tener un tiempo de exposición en condiciones de equidad la versión de que la superficie terrestre es plana.

No obstante, a pesar de que no ha sido tan importante este conflicto, considero que todavía existen cuatro fuentes de tensión entre la ciencia y la religión. La primera de estas fuentes concierne al éxito inicial de la religión para asociar ciertos

fenómenos misteriosos (terremotos, epidemias, relámpagos) con la intervención divina. Esta versión apuntaba hacia la existencia de una deidad en cada río o una driada en cada árbol. Sin embargo, al irse explicando cada fenómeno en términos de causas completamente naturales, y a pesar de que este proceso no eliminó las supersticiones religiosas del todo, es obvio que las creencias religiosas se fueron debilitando de manera paulatina. Y en consecuencia, no fue accidental que el surgimiento de las tendencias agnósticas y ateas entre los sectores educados del siglo XVIII se haya acelerado a partir del nacimiento de la ciencia moderna en el siglo previo. Desde tiempos remotos, el poder de la ciencia para explicar ciertos fenómenos preocupó a aquellos que tenían mucho aprecio por la religión. Platón estuvo tan escandalizado por los intentos formulados por Demócrito y Leucipo para explicar el mundo a partir de la existencia de átomos, sin requerir la intervención de los dioses, que en su libro décimo de *Leyes* sugirió castigar con cinco años de confinamiento solitario a aquellos que negaran la intervención divina en los asuntos humanos, a lo que seguiría la pena de muerte si el prisionero no llegaba a reformarse. Isaac Newton, ofendido por las actitudes naturalistas de Descartes, también rechazó la idea de que el Universo podría ser explicado sin Dios. Él propuso, en una carta dirigida a Richard Bentley, que no podría existir una explicación diferente a la intervención divina para entender la diferencia observada entre la materia brillante, como el Sol y las estrellas, y la materia oscura, como la Tierra y los otros planetas. De hecho, resulta irónico que haya sido Newton y no Descartes el que formuló de manera correcta las leyes que rigen el movimiento de los planetas alrededor del Sol. Aún más, nadie contribuyó más que Newton para proporcionar explicaciones no teístas de los fenómenos que observamos en el Universo, y a pesar de ello Newton mismo no se concibió como un newtoniano.

Por supuesto, no todas las cosas han sido explicadas por la ciencia, y quizás no lo serán. Lo que resulta importante resaltar es que no hemos observado ningún fenómeno que requiera de una intervención supernatural para ser explicado. Hay algunas personas que todavía se aferran a las pocas lagunas que todavía tenemos en ciertas áreas del conocimiento (como es el caso en el origen de la vida) para proclamar la

existencia de Dios. Pero conforme pasa el tiempo y vamos llenando esas lagunas, su postura las califica como personas que se apegan de manera desesperada a sus creencias.

Conciencia y comportamiento

El problema para las creencias religiosas no se limita a las explicaciones que ha dado la ciencia sobre los fenómenos que ocurren en el Universo. Existe una segunda fuente de tensión: el hecho de que estas explicaciones hayan incrementado las dudas sobre el supuesto lugar privilegiado que ocupa el hombre en el Universo, como un actor creado por Dios para desempeñar un papel estelar en el drama cósmico entre pecado y salvación.

Hemos tenido que aceptar que nuestra casa, la Tierra, es sólo uno más de los planetas que giran alrededor del Sol, que el Sol es uno más de los cientos de billones de estrellas en nuestra galaxia, la que a su vez es una de los billones de galaxias visibles; y podría ser que el cúmulo completo de galaxias en expansión sea tan sólo una pequeña porción de un multiverso mucho mayor, en el que la mayoría de sus partes es desconsoladamente inhóspita para la vida como la conocemos en la Tierra. Como una vez lo dijo Richard Feynman: "Resulta muy extraña una teoría en la que todo esté dispuesto como un escenario para que Dios observe la lucha cotidiana del hombre entre el bien y el mal". Sin embargo, es todavía más importante el descubrimiento hecho por Charles Darwin y Alfred Russel Wallace de que los humanos descienden de animales más primitivos a través de la selección natural, que actúa a partir de variaciones al azar de las leyes de la herencia y sin necesidad de recurrir a un plan divino para explicar la aparición de la especie humana. Este descubrimiento condujo a algunos, incluido Darwin, a perder su fe religiosa. No resulta sorprendente entonces constatar que de entre todas las aportaciones científicas, ésta sea la que continúa perturbando a los religiosos conservadores. Me imagino, además, lo alterados que se pondrán cuando en el futuro cercano los científicos logren explicar el comportamiento humano a partir de la física y la química del cerebro, de manera que no quede nada por ser explicado sobre nuestra alma inmaterial.

Nótese que no me refiero a la conciencia, sino al comportamiento. Esto es, a algo tan subjetivo como lo que sentimos cuando percibimos objetos de color rojo o cuando descubrimos una nueva teoría física. Parece ser tan diferente de la realidad objetiva descrita por la ciencia, que es muy difícil entender cómo podrán coincidir en el mismo esquema. Como lo planteó Colín McGinn en estas mismas páginas: "El problema consiste en cómo integrar los procesos conscientes en el cerebro físico, o sea, cómo hacer patente la unidad que yace detrás de la evidente diversidad. Este problema es tan complicado que no creo que alguien tenga una idea clara de cómo resolverlo".

Por otra parte, la actividad cerebral y el comportamiento (incluyendo lo que decimos sobre nuestros propios sentimientos) se ubican en el mismo conjunto de fenómenos objetivos, y aunque no tengo conocimiento de algún obstáculo que permita integrarlos en una misma teoría científica, con seguridad no será una tarea fácil. Por supuesto, esto no quiere decir que podamos o debamos olvidarnos de la conciencia y que debamos concentrarnos, como B. F. Skinner con sus palomas, únicamente en el comportamiento. Ya sabemos que el comportamiento está asociado de manera parcial con la conciencia, de modo que para entender el comportamiento se requerirá necesariamente del desarrollo de una correspondencia entre lo objetivo y lo subjetivo. Es posible que esto no nos enseñará cómo surge uno del otro, pero al menos confirmará que no existe nada sobrenatural asociado con la mente.

Algunas personas sin preparación científica exageran los desarrollos recientes en la física moderna que indican la impredecibilidad de algunos fenómenos naturales, dentro de la mecánica cuántica o de la teoría del caos, como una señal de que debemos considerar un determinismo que incluya la posibilidad de una intervención divina o de una mente incorpórea. Estas especulaciones nos han presionado para afinar nuestra concepción sobre el determinismo, pero no creo que tengan implicaciones en el estudio de los procesos asociados con la vida humana.

Ciencia e islam

La tercera fuente de fricción entre ciencia y religión ha sido de mayor importancia para el islam que para el cristianismo. Alrededor de 1100, el filósofo sufi Abu Hamid al-Ghazzali se declaró en contra de las leyes que gobiernan la materia ya que la existencia de este tipo de leyes ataría de manos al Creador. Según Al-Ghazzali, un pedazo de algodón no se ennegrece, consume, al ponerlo sobre la flama de una vela debido al calor de la flama, sino debido a que Dios quiere que se ennegrezca y consume. La existencia de las leyes de la naturaleza podría haberse reconciliado con el islam, como una síntesis de lo que Dios desea en términos generales, pero a este filósofo no le interesó esta solución.

A menudo Al-Ghazzali es considerado como el filósofo islámico más influyente. Me hubiera gustado conocer lo suficiente como para poder opinar qué tan importante fue el impacto en el islam de este rechazo a las actitudes científicas. Pero, sin lugar a dudas, dos siglos después de Al-Ghazzali, el desarrollo de la ciencia declinó de manera evidente en los países islámicos, después de haber sido los líderes mundiales en ciencias en los siglos IX y X. Como un presagio de esta declinación, en 1194 el Ulama de Córdoba ordenó quemar todos los textos científicos y médicos.

Por desgracia, la ciencia no se ha recuperado en el mundo islámico. Existen científicos notables que se han ubicado en países occidentales y han realizado extraordinarias aportaciones a la ciencia. Entre ellos sobresale el físico musulmán paquistaní Abdus Mohammed Salam, que en 1979 recibió el premio Nobel de Física por sus aportaciones, desarrolladas en Inglaterra e Italia, sobre el exitoso modelo estándar de las interacciones entre las partículas elementales. Sin embargo, en los últimos cuarenta años no he visto ningún artículo en las áreas de la física y de la astronomía que me interesan, que haya sido generado en un país islámico y que haya causado un impacto visible en estas disciplinas. La revista *Nature* realizó en 2002 una encuesta sobre la ciencia desarrollada en es-

tos países y encontró que sólo en tres áreas producen excelentes resultados científicos, pero que están dirigidas más a las aplicaciones de la ciencia que a la ciencia básica: desalación, halconería y crianza de camellos. Algo parecido a la preocupación de Al-Ghazzali sobre la libertad de Dios también tuvo lugar en una época en los países europeos cristianos, pero con resultados muy diferentes. Durante el siglo XIII, en París y en Canterbury se estableció una condena de las enseñanzas aristotélicas que, en apariencia, sugerían la acotación de la libertad divina, como en el caso de la generación del vacío o de crear diferentes universos y permitir que los planetas se muevan en líneas rectas. La intervención de Tomás de Aquino y Alberto Magno mantuvo la vigencia de la filosofía aristotélica en Europa y, con ello, el interés sobre las leyes de la naturaleza. Sin embargo, aun cuando esta filosofía nunca fue proscrita, su vigencia fue puesta en duda y esto fue providencial puesto que ningún progreso podría haber surgido a partir de sus leyes físicas. Es posible que esta actitud hacia la filosofía aristotélica haya facilitado el surgimiento de los primeros intentos por determinar las verdaderas leyes de la naturaleza en París, Lisieux y Oxford en el siglo XIV.

Héroes y profetas

La cuarta fuente de tensión entre ciencia y religión es quizás la más importante. Las religiones tradicionales por lo general están basadas en el principio de autoridad, ya sea mediante un líder infalible, como sería el caso de los papas, profetas o imanes, o por medio de un conjunto de escrituras sagradas, como la Biblia y el Corán. En particular, es posible que Galileo no se habría metido en problemas con la jerarquía católica si hubiera sido un teólogo que actuaba dentro de la estructura religiosa de su tiempo. Por supuesto, los científicos también trabajan bajo el principio de autoridad, pero de un tipo muy diferente. Si yo estuviera interesado en entender algún detalle fino sobre la relatividad, lo más probable es que leería un artí-

culo reciente de uno de los expertos en el campo y no los artículos originales de Einstein. La manera en que Einstein describió su teoría es considerada ahora como una teoría efectiva, esto es, como una aproximación válida para escalas grandes de distancias, pero no para las condiciones tan severas que se dieron en los instantes cercanos al *Big Bang*.

Tenemos héroes en la ciencia, como Einstein, quien fue sin duda el físico más destacado del siglo pasado, pero para nosotros no son profetas infalibles. Ésta es una gran diferencia con respecto a la deferencia que se le da a las autoridades religiosas tradicionales. Siempre podemos convivir con algunos héroes, pero es seguro que lo haríamos con un número menor de profetas. Es muy fácil percibir el agotamiento de las creencias religiosas en la Europa occidental, pero resulta complicado hablar de ello en EUA. Ningún candidato a la presidencia de EUA puede jactarse en público de dudar sobre la existencia de Dios. En mi opinión, mientras que muchos estadounidenses creen que la religión es una práctica sana, y aun se enojan cuando se habla mal de ella, la mayoría de ellos no tiene una idea clara sobre sus propias creencias religiosas. En muchos casos defienden cierta espiritualidad sobre la que escribió Emerson, y que yo mismo no entiendo, descrita a menudo como un sentido de solidaridad con el resto de la humanidad o de unión con la naturaleza que no dependen de la existencia de lo sobrenatural. En el budismo, la espiritualidad es un concepto central pero no requiere de una creencia en la existencia de Dios. Sin embargo, el budismo también apela a la existencia de lo sobrenatural, como es el caso con la reencarnación. El deseo de escapar de los ciclos de la reencarnación es lo que genera la búsqueda por la iluminación. Sus héroes son los *bodhisattvas*, quienes, a pesar de haber conseguido el estado de iluminación, regresan a este mundo para enseñarnos el camino correcto. Y quizás también en el budismo se está dando cierta declinación de las creencias: un libro reciente del Dalai Lama menciona sólo de manera muy tangencial la reencarnación, y es en Japón donde ha tenido su mayor declinación, precisamente en el país asiático que ha logrado el mayor progreso científico.

Cómo vivir sin Dios

No es mi propósito en este artículo argumentar que es positivo el actual agotamiento de las creencias religiosas (aun cuando así lo creo), o tratar de convencer a alguien de que descrea de sus sentimientos religiosos, como ya lo han hecho los libros recientes de Richards Dawkins, Sam Harris y Christopher Hitchens. En lo personal, tengo un récord perfecto de no haber convencido a nadie para que cambie de opinión cuando me propuse hacer campaña para incrementar el gasto público en ciencia y tecnología, o de disminuir el presupuesto para la defensa antimisiles o para enviar humanos a Marte. Todo lo contrario, sólo me interesa dar algunas opiniones de cómo es posible vivir sin Dios para aquellos que han perdido o están perdiendo sus creencias religiosas. Pero primero quiero hacer una advertencia: hay que tener precaución al seleccionar sus posibles sustitutos. Es bien conocido que los horrores más graves del siglo xx fueron perpetrados por regímenes (Hitler en Alemania, Stalin en Rusia, Mao en China) que, a pesar de que rechazaban algunas o todas las enseñanzas religiosas, copiaron las peores características de la religión: líderes infalibles, sagradas escrituras, rituales masivos, ejecución de apóstatas y un sentido comunitario que justificaba el exterminio de los no creyentes.

Cuando era estudiante conocí a un rabino, Will Herberg, que se preocupó por mi falta de fe religiosa. Me advirtió que si no adorábamos a un ser superior, terminaríamos adorándo-

nos unos a otros. Creo que él tenía razón sobre este peligro, pero creo que deberíamos dejar de adorar cualquier cosa. No voy a argumentar que es fácil vivir sin Dios y que la ciencia es todo lo que necesitamos. Para un físico es un gran placer aprender cómo podemos usar maravillosas técnicas matemáticas para entender el mundo real. Siempre hemos estado luchando por entender la naturaleza, construyendo una impresionante cadena de institutos de investigación, de la Biblioteca de Alejandría y el Palacio de la Sabiduría de Bagdad a los actuales laboratorios de aceleradores en Fermilab y el CERN. Pero sabemos que nunca llegaremos al fondo de las cosas, ya que, por más que encontremos la teoría que unifique todas las partículas y sus interacciones, nunca podremos saber por qué es esa teoría la que describe el mundo real y no otra.

Lo que es todavía más trágico: las perspectivas de la ciencia son escalofriantes. No hemos encontrado un fin para nuestra propia existencia, ni una base objetiva para nuestros principios morales, ni una correspondencia entre lo que creemos son las leyes morales y las leyes de la naturaleza como lo imaginaron los filósofos desde Anaximandro y Platón hasta Emerson. Hemos aprendido que las emociones que más atoramos, como nuestro amor hacia nuestras parejas o hijos, están generadas por reacciones químicas en nuestros cerebros, que son el resultado de la selección natural actuando sobre mutaciones al azar en un proceso que ha llevado millones de años. Y aun así, no debemos caer en actitudes nihilistas o en retraer nuestras emociones. En el mejor de los casos,

debemos vivir en la frontera definida por la situación más deseable y la más desesperada.

¿Qué podemos hacer entonces? Una cosa que ayuda es el humor, una cualidad que no abunda en Emerson. Por ejemplo, en algunas de las tragedias de Shakespeare, justo cuando la acción está por alcanzar un clímax insoportable, los héroes trágicos son confrontados con algún giro cómico: la intervención de un sepulturero, un par de jardineros, el ama de llaves. La tragedia es inevitable, pero el humor la pone en perspectiva.

Por otro lado, están los placeres mundanos de la vida, que han sido estigmatizados por los fanáticos religiosos, desde los ascetas cristianos hasta los talibanes modernos. Al visitar Nueva Inglaterra en junio, cuando las azáleas están en flor, es posible recordar lo bella que puede ser la primavera. Y no rechazamos los placeres de la carne; los que no somos fanáticos podemos alegrarnos de que cuando el pan y el vino no son sacramentos, aun así serán pan y vino.

Existen también los placeres asociados con las bellas artes. Por supuesto, hay muchas obras musicales y de poesía que están inspiradas en sentimientos religiosos. Pero es todavía más abundante la buena poesía y música que no tienen conexión religiosa alguna. Pienso, además, que no debemos preocuparnos de que, al abandonar la religión, se genere una declinación moral. Existe mucha gente que sin ninguna fe religiosa tiene una vida ejemplar (como yo mismo). Y al contrario, en algunos casos los más puros sentimientos religiosos

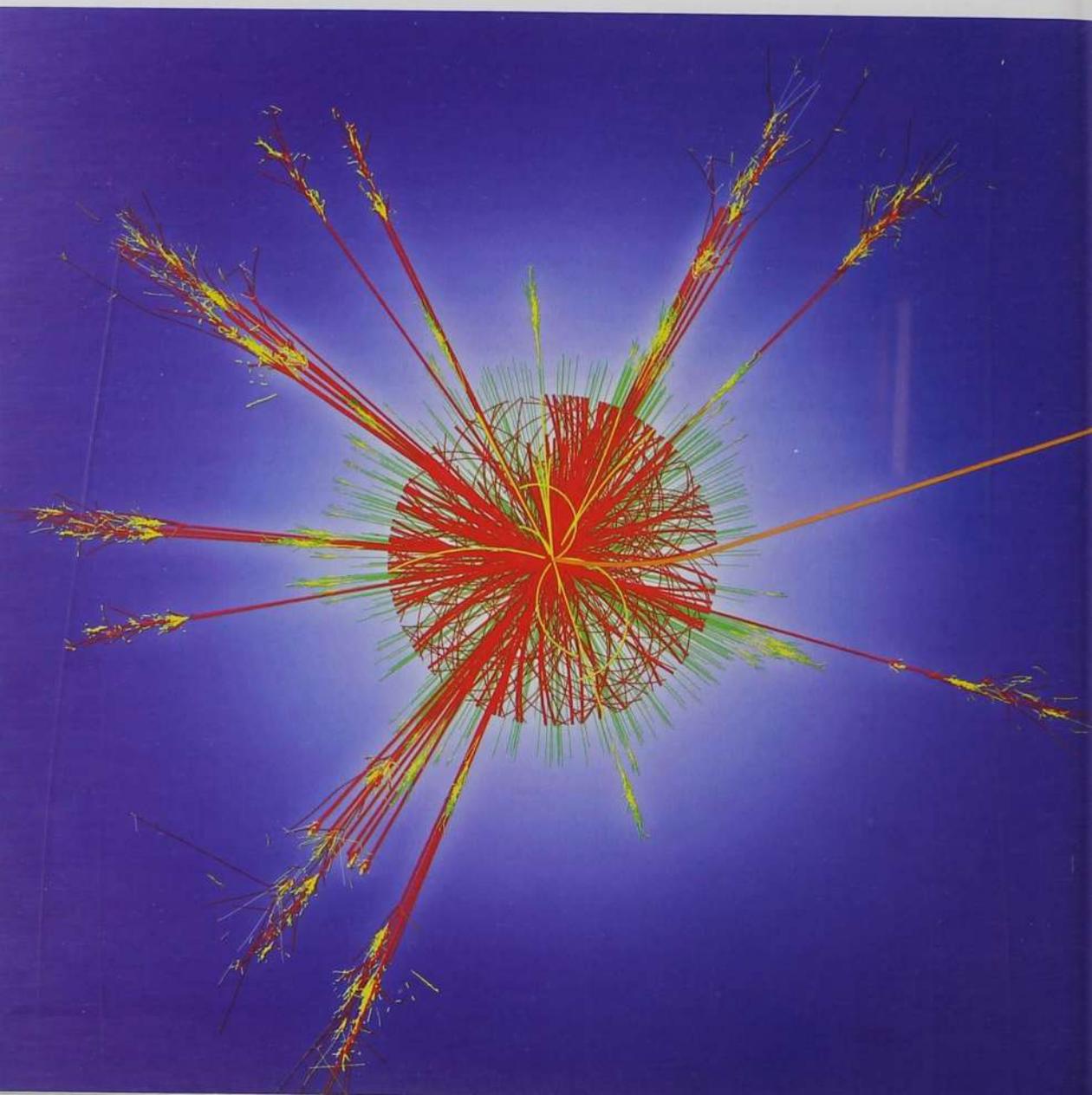
han inspirado los crímenes más horrendos, como fue el caso con los jóvenes que estrellaron aviones sobre edificios en los EUA, o que explotaron bombas entre multitudes de Londres, Madrid o Tel-Aviv.

He estado insistiendo aquí sobre las creencias religiosas, en la existencia de Dios o sobre lo sobrenatural, aun cuando estoy consciente de que esto es sólo un aspecto de la vida religiosa. Quizás he enfatizado demasiado las creencias debido a que, como físico, estoy profesionalmente involucrado en averiguar la verdad, y no en lo que nos hace felices. Para mucha gente, lo más importante de la religión no es el conjunto de creencias sino muchos otros aspectos: reglas sobre el comportamiento sexual, la dieta, el observar los días santos, los rituales asociados al matrimonio y el duelo, así como el beneplácito de comulgar con los mismos sentimientos con otros fieles, que a veces conducen al extremo de disfrutar el asesinato de aquellos que tienen una afiliación religiosa diferente a la nuestra.

Cuanto más apreciamos los placeres de la vida, nos resulta más ajeno el sentimiento de consolación que proveían las creencias religiosas: la promesa de que nuestra existencia continuará después de la muerte y de que en el más allá nos reuniremos con nuestros seres queridos. Esto es lo que nos hace más cobardes a todos nosotros. Vivir sin Dios no es fácil, pero esta misma dificultad nos ofrece otro tipo de consolación: que existe cierto orgullo, o quizás una siniestra satisfacción, en enfrentar nuestra propia condición sin desesperación y sin pensamientos ingenuos, con buen humor, pero sin Dios.

REFERENCIAS

1. Este ensayo está basado en la *Oración Phi Beta Kappa* presentada en la Universidad de Harvard el 3 de junio de 2008. Incluye algunos puntos tratados en otras conferencias y ensayos.
2. C. McGinn, ¿Podremos entender alguna vez la conciencia?, *The New York Review of Books* (10 de junio de 1999).



Universidades mexicanas en las clasificaciones internacionales

Francisco Collazo Reyes y Jonathan Collazo Rodríguez

Existen criterios excluyentes e incluyentes sobre las instituciones mexicanas de educación superior e investigación en las clasificaciones (*rankings*) internacionales.

Clasificaciones universitarias internacionales

Las clasificaciones universitarias surgieron a finales del siglo xx como fuentes de información novedosas, pero con escasa credibilidad y falta de autoridad, para llenar un vacío debido a la falta de transparencia e información sobre las instituciones de educación superior.¹ Después de dos décadas, estas clasificaciones se han enriquecido al diversificar las metodologías y objetivos, pero sin llegar a cubrir los aspectos tradicionalmente demandantes de información. Tampoco han disminuido las críticas; al contrario, se han incrementado con el surgimiento de la modalidad de las clasificaciones internacionales.² Persisten dudas sobre la falta de claridad en la generación de indicadores y los criterios de ponderación;^{3,4} la desconfianza provocada ante la dependencia de los criterios de clasificación de una fuente principal de datos; y también a la pobreza resultante del pánal de los indicadores utilizados frente a la complejidad de dimensiones que involucran los objetivos y misión de las universidades e instituciones de investigación, así como las circunstancias de sus contextos de actuación.⁴ Como principal resultado se obtienen tablas de posiciones entre ganadores y perdedores, donde pocos son los primeros y muchos los segundos. Los criterios utilizados terminan favoreciendo la posición de las grandes universidades en estas clasificaciones⁵ y excluyen a la mayoría de las instituciones de los países en vías de desarrollo, como es el caso de los países de América Latina, que sólo son representados por 17 universidades de Brasil(6), Argentina(4), México(2),

El Lic. Francisco Collazo Reyes es responsable del área de bibliometría de la Biblioteca Jerzy Plebansky del Cinvestav.
Correo electrónico: fcollazo@fis.cinvestav.mx

Jonathan Collazo Rodríguez es pasante de la carrera de periodismo en la Escuela Carlos Septién García.
Correo electrónico: j4ona@hotmail.com

Chile(2), Colombia(1), Perú(1) y Uruguay(1), clasificadas entre las 500 universidades consideradas como de clase mundial.

Sin embargo, los *rankings* parecen inevitables⁶ y se han vuelto poderosos;⁷ proliferan a todos los niveles: nacional, regional e internacional, y aun con las limitaciones señaladas han ganado popularidad e influencia.⁸ La continuidad de los proyectos, la puntualidad en la actualización periódica de las tablas de posiciones, así como el surgimiento de nuevas iniciativas, con coberturas ampliadas o regionales que incluyen instituciones de países de regiones tradicionalmente marginadas como América Latina, Asia, Medio Oriente y África, les ha permitido, por un lado, ganar presencia y cobertura en los medios de difusión: diarios, revistas y otras fuentes especializadas en el área de educación superior y, por otro lado, atraer la atención de especialistas que han desarrollado distintas iniciativas orientadas a mejorar estos sistemas de clasificación: Grupo Internacional de Expertos en Rankings, declaración de los principios de Berlín sobre clasificaciones de instituciones de educación superior y el Observatorio Internacional sobre Rankings Universitarios y la Excelencia.⁹

La idea es crear viabilidad y consenso a una plataforma de diálogo en el sector de la educación superior, que haga posible el desarrollo de instrumentos creíbles de medición sobre el rendimiento de las instituciones, a través del cumplimiento de los siguientes principios: (a) reconocer la diversidad de instituciones y tomar en cuenta las diferentes misiones y objetivos de las mismas; (b) utilizar metodologías transparentes, replicables, en la creación de clasificaciones; (c) medir resultados sobre producción; (d) usar datos audita- bles y verificables, y (e) proveer información clara y suficiente sobre todos los factores usados para desarrollar las clasificaciones. Por supuesto, las iniciativas de clasificaciones académicas existentes están muy lejos de cumplir con estos principios.

En el ámbito nacional existen fuentes como el Conacyt¹⁰ y el *Atlas de la Ciencia Mexicana*,¹¹ que muestran distintos indicadores sobre la producción e impacto científico, insumos y recursos, de las principales universidades e instituciones de investigación en el país, pero que no están desagregadas ni organizadas en forma de *ranking*. Existen otras iniciativas de clasificaciones universitarias realizadas por diarios y revistas,¹² limitadas a evaluar aspectos educativos sobre los programas

universitarios de licenciatura, apoyadas en información obtenida en las propias instituciones, en el anuario estadístico publicado por la ANUIES,¹³ y en estudios de opinión, mediante encuestas hechas a académicos y empleadores; las tablas resultantes funcionan como guías de información sobre la oferta educativa en el ámbito nacional. Otra recomendación reciente sugiere considerar la variable *per capita* como criterio de ponderación, considerando la proporción del tamaño de la matrícula atendida en cada institución con respecto a la matrícula total inscrita en la educación y el tamaño de la población del país.¹⁴

En este artículo revisamos el panel de indicadores utilizados, los criterios de ponderación, las fuentes de información y las posiciones de las instituciones mexicanas de educación superior e investigación científica en diferentes clasificaciones. En el plano internacional incluimos las tres principales iniciativas vigentes: (i) *Academic Ranking of World Universities*¹⁵ de la Universidad Jiao Tong de Shanghai en China (ARWU-Shanghai), (ii) *World University Rankings*¹⁶ del *Times Higher Education Supplement* de Gran Bretaña (WUR-THES), (iii) *Ranking Mundial de Universidades en la Web*¹⁷ del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (RMUW-CSIC). En el ámbito regional incluimos dos proyectos generados en España: el RMUW-CSIC¹⁸ que desarrolla una tabla de posiciones para los países de América Latina y (iv) SCIMAGO-R13,¹⁹ que ofrecen información sobre los países de Iberoamérica. En el ámbito nacional incluimos los listados de (v) *El Universal* y (vi) *Reader's Digest*, mostradas en la tabla 1, que también incluye información sobre la fecha de inicio, la cobertura total, el número de instituciones seleccionadas, el panel de criterios numerados en forma consecutiva y los pesos asignados a cada uno de los indicadores.

Las distintas clasificaciones utilizan un panel de criterios de clasificación basada en cuatro tipos de indicadores: (i) bibliométricos, *webométricos* (ii) prestigio o reputación, (iii) rendimiento académico e (iv) internacionalización. Entre los primeros se encuentran, por un lado, los criterios que utilizan indicadores bibliométricos básicos, conocidos como producción e impacto científicos de corriente principal. Los señalados con los números 1.1, 1.2 y del 4.1 al 4.4 son desarrollados a partir de la información de tres índices de ISI-Thompson

Tabla 1. Criterios utilizados en la elaboración de las diferentes clasificaciones de universidades.

Núm.	Clasificaciones	Fecha de inicio	Cobertura	Criterios	Ponderación
I	ARWU-Shanghai	2003	500 de 3000	1. Publicaciones	
				1.1. SCI, SSCI y A&HCI	20%
				1.2. Nature y Science	20%
				1.3. Altamente citados.	20%
				Premios Internacionales	
				1.4. Profesores	20%
II	WUR-THES	2004	500	1.5. Alumnos	10%
				1.6. Profesores: tiempo completo	10%
				2. Prestigio o reputación	
				2.1. Calificación de pares	40%
				2.2. Calificación de empleadores	10%
				2.3. Relación: estudiantes / académicos	20%
III	RMUW-CSIC - Internacional - Regional	2004	5000 de 15000	2.4. Citas a trabajos (SCOPUS)	20%
				2.5. Estudiantes extranjeros	5%
				2.6. Profesores extranjeros	5%
				3.1. Visibilidad en la Web	50%
IV	SCImago-R13	2006	766	3.2. Volumen publicado en la Web	20%
				3.3. Riqueza de los ficheros	15%
				3.4. Citas a trabajos (Google scholar)	15%
				4.1. Producción total	
V	El Universal	2007	20 de 55	4.2. Producción citable	
				4.3. Producción ponderada	
				4.4. Factor de impacto medio	
				5.1. Información cuantitativa de la institución	60%
VI	Reader's Digest	2004	100	5.2. Encuesta a empleadores	20%
				5.3. Encuesta a profesores	20%
				Encuestas:	
				6.1. Opinión de empleadores	
				6.2. Opinión de profesores	
				6.3. Opinión de alumnos	

disponibles en *Web of Sciences*:²⁰ (a) *Science Citation Index* (SCI); (b) *Social Science Citation Index* (SSCI), y (c) *Arts & Humanities Citation Index* (A&HCI). Para el criterio 1.3 se utilizan los trabajos más citados en 22 categorías temáticas determinadas anualmente en *Essentials Science Indicators*.²¹ El indicador 2.4 resulta de las citas bibliográficas hechas a los trabajos generados en las instituciones, según los registros del sistema SCOPUS desarrollado por Elsevier.²²

Por otro lado, tenemos los criterios de clasificación *webométricos* utilizados en el esquema RMUW-CSIC, sobre en los recursos de información de Internet y sus motores de búsqueda. El 3.1 se refiere a la visibilidad de la instituciones, determinada

por el número total de enlaces externos únicos recibidos por un sitio, obtenidos de *Yahoo Search*, *Live Search* y *Exalead*, que incluye su valor y relevancia en el entorno académico y editorial. El 3.2 resulta del volumen o número total de páginas publicadas, recuperados en estos mismos buscadores. El 3.3 mide la riqueza de los archivos en función de su relevancia para actividades académicas, de publicación y su presentación según a los siguientes tipos de formato: *Adobe Acrobat* (.pdf), *Adobe PostScript* (.ps), *Microsoft Word* (.doc) y *Microsoft Powerpoint* (.ppt). El 3.4 es resultado de las citas hechas a los documentos, reportes y otros trabajos de tipo académico registradas en *Google Scholar*, para cada uno de los dominios institucionales.

Tabla 2. Posiciones de instituciones mexicanas en las clasificaciones: ARWU-Shanghai, WUR-THES y RMUW-CSIC.

Ranking	Institución	2003	2004	2005	2006	2007	2008
ARWU-Shanghai	UNAM	182	186	188	186	187	185
WUR-THES	UNAM		195	196	74	192	150
WUR-THES	ITESM					456	329
RMUW-CSIC	UNAM					59	51
RMUW-CSIC	ITESM						439

Los criterios de prestigio están determinados por dos aspectos: la opinión de terceros y los premios otorgados a miembros de las instituciones. En el primer caso, los criterios 2.1, 5.3 y 6.2 se definen a través de calificaciones obtenidas anualmente en encuestas entre la comunidad de académicos distinguidos. Para este caso el ranking WUR-THES se apoya en dos bases de datos: (a) de graduados universitarios y empleadores potenciales, administradas por Mardev,²³ que captura, organiza y comercializa direcciones de académicos de todo el mundo; y (b) *World Scientific*, que posee una base de datos de autores mayor a 180 mil registros. Los criterios 2.2, 5.2 y 6.1 surgen de encuestas entre los gerentes y directores de recursos humanos de empresas importantes, identificados como empleadores.

En ambos casos, los académicos o empleadores seleccionan las mejores universidades por regiones geográficas y áreas temáticas. De manera similar, para el caso 6.3, correspondiente a una clasificación nacional, se considera la opinión de los alumnos tratando de incluir el mayor número de disciplinas posibles. En el caso de las distinciones internacionales, para los criterios 1.4 y 1.5 se consideran el Premio Nobel y las medallas internacionales establecidas por disciplinas; por ejemplo, en matemáticas, otorgadas a estudiantes o profesores de las instituciones.

El rendimiento académico ponderado en los criterios 2.3 y 1.6 refleja la relación entre la matrícula de estudiantes y la plantilla de profesores de tiempo completo en las instituciones, que indica la proporción de estudiantes por profesor. Las plantillas con la proporción de profesores más alta reciben mayor calificación. El indicador de internacionalización al que hacen referencia los puntos 2.5 y 2.6 mide la proporción de estudiantes y profesores extranjeros con respecto a los totales de la matrícula y la plantilla académica de las instituciones.

Como se muestra en la tabla 1, los rankings ARWU-Shanghai y WUR-THES utilizan un panel que combina diferentes indicadores y ponderaciones: el primero otorga mayor peso a los aspectos de producción en revistas de corriente principal y las citas bibliográficas, y el segundo a la opinión de los pares académicos y empleadores. Las iniciativas restantes se apoyan principalmente en un solo tipo de indicador: el RMUW-CSIC en medidas webométricas, que ponderan el criterio de visibilidad de las instituciones en Internet; el SCImago-R13, en indicadores bibliométricos de producción e impacto científico con datos de los índices ISI-Thompson; en el ámbito nacional, *El Universal* pondera la información estadística básica sobre estudiantes y académicos obtenida de las propias instituciones y el anuario estadístico de ANUIES; el *Reader's Digest* se basa fundamentalmente en la opinión de empleadores, profesores y estudiantes.

Posiciones de las instituciones mexicanas

Como muestra la tabla 2, el ARWU-Shanghai sólo incluye la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), estacionada entre las posiciones 182 y 188, sin presentar mayores movimientos en el periodo de cobertura de seis años, 2003-2008, de esta clasificación. El WUR-THES incluye dos instituciones mexicanas: la UNAM y el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM); ambas instituciones muestran un importante escalamiento de posiciones entre las clasificaciones de los años 2007 y 2008: de 45 lugares la primera y de 127 la segunda. Otra institución mexicana cercana a las primeras 500 posiciones en el WUR-THES es la Universidad Iberoamericana, ubicada en el lugar 533 en el último año.

Tabla 3. Posiciones de las instituciones mexicanas en clasificaciones internacionales, regionales y nacionales.

Núm.	Institución	Clasificación internacional	Clasificación Iberoamérica		Clasificaciones nacionales	
		RMUW-CSIC	RMUW-CSIC latinoamericano	SCImago-R-1*	El Universal	Reader's Digest
1	UNAM	51	1	1	1	1
2	ITESM	439	9	26	5,6,11	2
3	U. de G.	619	16	13	8	14
4	UAM	791	18	3	3	15
5	U. Aut. del Estado de México	1007	31			25
6	IPN	1095	34	5	12	3
7	U. Michoacana de San Nicolás Hidalgo	1327	42	27		
8	U. Aut. de Nuevo León	1375	49	12	7	7
9	Cinvestav	1378	50	2	17	
10	UDLA	1413	52		4	17
11	U. de Colima	1442	54			
12	U. Iberoamericana	1531	58		11	4
13	U. Veracruzana	1543	59			16
14	U. Aut. de Chihuahua	1639	65			12
15	U. de Sonora	1680	68		3	
16	ITAM	1681	69		2	6
17	U. Aut. de Baja California	1729	73	30		11
18	Colmex	1737	75		14	
19	B. U. Aut. de Puebla	1756	76		16	
20	CIDE	1812	78		20	
21	U. Aut. de Ciudad Juárez	2036	88			27
22	U. Jesuita de Guadalajara	2189	98			
23	CICESE	2226		11		
24	U. Anáhuac	2429			6	10
25	U. Aut. de Yucatán	2462				23
26	U. de Guanajuato	2499		16		28
27	U. Aut. de San Luis Potosí	2552		15		
28	U. Aut. de Chapingo	2779				
29	U. Tecnológica de la Mixteca	2947				
30	U. Aut. de Querétaro	3003				
31	CIMAT	3116				
32	U. Aut. de Tamaulipas	3248				
33	U. Aut. de Guadalajara	3284				5
34	U. Aut. de Sinaloa	3370				30
35	U. Aut. del Estado de Morelos	3475		17		29
36	UPN	3513				
37	U. de Monterrey	3557			16	19
38	INAH	3694				
39	U. del Valle de México	3708			18	8
40	U. Pop. Aut. de Puebla	3799				
41	I. Tecnol. Sonora	3999		24		
42	U. Aut. de Aguascalientes	4030				
43	U. de Occidente	4105				
44	FLACSO	4235				
45	U. Aut. de Zacatecas	4406				
46	U. Juárez Aut. de Tabasco	4574				
47	U. Aut. de Chiapas	4595				

Tabla 3. Posiciones de las instituciones mexicanas en clasificaciones internacionales, regionales y nacionales (continuación).

Núm.	Institución	Clasificación internacional	Clasificación Iberoamérica		Clasificaciones nacionales	
		RMUW-CSIC	RMUW-CSIC latinoamericano	SCImago-R13	El Universal	Reader's Digest
48	U. Panamericana	4601			14	18
49	U. Cristóbal Colón	4637				
50	U. Aut. de Campeche	4676				
51	U. de Quintana Roo	4695				
52	U. Aut. Agraria Antonio Narro	4774				
53	CIESAS	4812				
54	U. Regiomontana	4976				
55	I. Tecnol. Celaya	4985				
	Cobertura	5000	200	86	20	100

El RMUW-CSIC incluye a la UNAM y al ITESM entre las primeras 500 posiciones. La primera se encuentra posicionada entre los primeros 50 y 60 lugares, y el segundo aparece en el lugar 439 en 2008.

Según Birnbaum,²⁴ la crisis principal de las clasificaciones internacionales no está en el hecho de que son herramientas excluyentes de la gran mayoría de las universidades existentes en el plano internacional, sino en la atribución de separar las universidades de clase mundial de las que no lo son, a partir cada uno de sus propios criterios.

Clasificaciones de instituciones mexicanas

La tabla 3 muestra 55 instituciones mexicanas organizadas según la posición que ocupan en la cobertura internacional de un total de cinco mil instituciones analizadas en el ranking RMUW-CSIC. Cuatro están ubicadas en el intervalo de 1 a 1000; 16 en el de 1000 a 2000; 9 en el de 2000 a 3000; 12 en el de 3000 a 4000 y 14 entre las posiciones 4000 y 5000. La tabla también incluye la posición asignada a las instituciones en los siguientes rankings: SCImago-R13 con cobertura a nivel de Iberoamérica; RMUW-CSIC en su cobertura a nivel de América Latina, y tres clasificaciones en el ámbito nacional: el mismo RMUW-CSIC con el listado desarrollado para México, *El*

Universal y el *Reader's Digest*. Cada iniciativa utiliza indicadores, criterios de ponderación y fuentes de información distintos, como se mostró anteriormente.

La lista incluye 55 instituciones del sector de educación superior: 32 universidades públicas, 16 privadas y siete centros de investigación. Entre las primeras se encuentran 24 universidades estatales, tres especializadas (dos en agricultura y una en pedagogía), cuatro tecnológicos (IPN, Celaya, Sonora y la Mixteca), una nacional (UNAM) y una metropolitana (UAM). Entre las privadas se encuentran 12 universidades, tres tecnológicos y una especializada en ciencias sociales. Las instituciones de investigación incluidas cubren, principalmente, las áreas de ciencias exactas, naturales, educación, economía, antropología y sociales.

De las 55 instituciones clasificadas por RMUW-CSIC, la UNAM es la única que ocupa la misma posición en todas las clasificaciones; seis son incluidas en todos los índices, 33 en más de uno y 22 sólo en uno; entre estas últimas destacan las universidades estatales.

Los criterios del SCImago-R13, que ponderan los indicadores de producción e impacto científico ubican mejor las instituciones de investigación. Por ejemplo, las posiciones 2, 3 y 5 corresponden al Cinvestav, la UAM y el IPN, y los lugares 4, 6, 8, 9 y 10 al IMSS, Instituto Nacional de la Nutrición, Centro Médico Nacional Siglo XXI, Instituto de Ecología e Instituto

Mexicano del Petróleo, respectivamente, que quedaron fuera de la lista del RMUW-CSIC.

En términos generales, las universidades privadas resultaron mejor ubicadas, según los indicadores utilizados por *El Universal* y *Reader's Digest*, algunas de las cuales (La Salle, Madero y del Mayab) quedaron excluidas de los criterios del

RMUW-CSIC. La falta de criterios para normalizar los nombres de las instituciones trae como resultado más de una variante en el nombre de algunas instituciones e inconsistencias para incluir las instituciones bajo un mismo nombre o divididas por sus campus o unidades, como ocurre con los casos de la Universidad Anáhuac, ITESM, IPN y UAM.

REFERENCIAS

1. A. Usher y M. Savino, *Calidad en la Educación*, núm. 25, 33 (2006).
2. A. F. Van Raan. *Scientometrics* 62, 133- (2005); D. Butler. *Nature*, 447, 514- (2007); W. Vrise. *Campus, Milenio*, núm. 297, 13 (12/11/08).
3. R. Rodríguez Gómez. *Campus, Milenio*, núm. 161, 19 (9/01/06); *Ibid* (16/10/08).
4. N. C. Liu, Y. Cheng, L. Liu. *Scientometrics* 64, 101 (2005); A. F. Van Raan, *Scientometrics*, 62, 133 (2005); D. Docampo, *Revista de Educación*, 149 (2008).
5. P. G. Altbach, *International Higher Education*, 42 (2006).
6. P. Altbach, *Campus, Milenio*, núm. 155, 24 (3/11/2005).
7. S. Marginson, *Higher Education*, 43, 311 (2002).
8. J. P. Ioannidis. *BMC Medicine*, 5 (2007); R. Grewal et al., *American Statistician*, 62, 232 (2008); O. Kivinen, y J. Hedman, *Scientometrics*, 74, 391 (2008).
9. International Rankings Experts Group, disponible en línea: http://www.ihep.org/Research/Internationalefforts_rankingsystems.cfm; S. Marginson. en: Asia-Pacific Association for the International Education. (Singapur, 7-9 de marzo, 2007)
10. Conacyt, disponible en línea: www.conacyt.mx (2007).
11. *Atlas de la Ciencia Mexicana*, disponible en línea: <http://www.amc.unam.mx/atlas.htm>
12. Ranking *El Universal*, disponible en línea: <http://www.eluniversal.com.mx/graficos/universidades/mejoresuniversidades/ranking.htm> (septiembre 2008). Guía Universitaria 2008 de *Reader's Digest*. Edición número 6 (México, abril 2008).
13. *Anuario estadístico 2004*, ANUIES, (México 2006), disponible en línea: http://www.anuies.mx/servicios/e_educacion/docs/anuario_estadistico_2004_licenciatura.pdf
14. W. de Vrise. *Campus, Milenio*, núm. 294, 23 (12/10/08).
15. Academic Ranking of World Universities, disponible en línea: <http://www.arwu.org/> (septiembre 2008)
16. World University Rankings, disponible en línea: <http://www.topuniversities.com/worlduniversityrankings/> (septiembre 2008).
17. Ranking Web de Universidades en el Mundo <http://www.webometrics.info/> (septiembre 2008).
18. Ranking Web de Universidades en el Mundo. Nivel regional, disponible en línea: http://www.webometrics.info/Webometrics%20library/iberoamerica_jul2008.pdf
19. Ranking Iberoamericano de Instituciones de Investigación R-13, disponible en línea: http://investigacion.universia.net/html_inv/ri3/ri3/jsp/params/pais/h.html
20. *Web of Science*, disponible en línea: <http://apps.isiknowledge.com/>
21. *Essential Science Indicators*, disponible en línea: <http://esi.isiknowledge.com/home.cgi>
22. SCOPUS, disponible en línea: <http://www.scopus.com/scopus/home.url>
23. MarDev, disponible en línea: <http://www.mardev.com>
24. R. Birnbaum. *International Higher Education*, núm. 47 (2007), disponible en línea: http://www.bc.edu/bc_org/avp/soe/cihe/newsletter/Number47/p7_Birnbaum.htm

Contribuciones

Las contribuciones para *Avance y Perspectiva* deberán enviarse a las oficinas del Cinvestav o a la dirección electrónica: revista@cinvestav.mx de la siguiente manera:

Textos:

- Los artículos deben de entregarse en Word.
- Si el texto incluye tablas y figuras, éstas se entregarán en archivo por separado; se debe indicar en el original la ubicación de las mismas.
- Las notas deberán incluirse al final del trabajo, incorporadas a la bibliografía o, en su caso, a las referencias debidamente numeradas.

- Las referencias deben apegarse a los modelos siguientes:

- Libro:

N. Wiener, *Cibernética: o el control y la comunicación en animales y máquinas* (Barcelona, Tusquets, 1985).

- Artículo de revista:

J. Ádem, *Avance y Perspectiva*, 10, 168 (1991).

- Todos los textos deben incluir el nombre del autor, grado académico, adscripción y cargo que desempeña, teléfono y correo electrónico.

Imágenes y gráficas:

- TIFF, 17 x 10 cm (mínimo), 300 dpi, en CD-ROM. No se aceptarán imágenes de Internet.



Cinvestav

revista@cinvestav.mx | www.cinvestav.mx/publicaciones

Av. IPN 2508, Zacatenco, C. P. 07360 | Teléfono y fax: 5747 7076



Cinvestav