

Innovación y Ciencia

Volumen XXII • Nº 4 • Colombia \$ 18.000

Teoría de la
Relatividad
General
100 años



ASOCIACIÓN COLOMBIANA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA

OFERTA ACADÉMICA DIPLOMADOS 2016

- **ACAC ofrece un diseño académico**, cuyo objetivo es brindar herramientas para fortalecer el desarrollo de proyectos de ciencia, tecnología e innovación en cualquier área del conocimiento, **a través de los siguientes diplomados:**



Formulación de proyectos de investigación



Escritura de artículos científicos y tecnológicos



Gestión de proyectos de investigación en CTel



Propiedad intelectual para investigadores



Legislación de ciencia y tecnología



Comunicación de las ciencias



Pruebas científicas en procesos judiciales



Gestión y ejecución de recursos de regalías para CTel



Formación e investigación



Georreferenciación aplicada a la investigación



Biotechnología para profesores de ciencias de educación básica y media



Agricultura limpia



Gestión de la innovación

INFORMES

Tel.: +57 (1) 432 0370 Cel.: +57 316 529 7881 - Correo electrónico: acup@acac.org.co
Página web: www.acac.org.co

REVISTA INNOVACIÓN Y CIENCIA

VOLUMEN XXII N° 4 - 2015

PUBLICACIÓN DE:

Asociación Colombiana para
el Avance de la Ciencia - ACAC

JUNTA DIRECTIVA ACAC

Eduardo Posada Flórez - Presidente
Marcelo Riveros Rojas
Helena Groot de Restrepo
Elena Evguenieva Stachenko
Rubén Ardila Ardila
Sonia Esperanza Monroy Varela
Horacio Torres Sánchez
Moisés Wasserman Lerner
María Mercedes Zambrano Eder
Academia Colombiana de Ciencias Exactas
Físicas y Naturales - ACCEFYN
Universidad El Bosque
Instituto Alexander von Humboldt
Centro Interactivo Maloka

PRESIDENTE

Eduardo Posada Flórez

DIRECTORA EJECUTIVA

María Piedad Villaveces Niño

SUBDIRECTOR INNOVACIÓN Y COMUNICACIONES

Francisco González Estay

EDITORIA

María Fernanda Gutiérrez

ASISTENTE EDITORIAL

Pablo Sánchez Novoa

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

Sergio Torres Arzayus

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

John Brian Cubaque

CORRECCIÓN DE ESTILO

Nelson David Mayorga Perdomo

IMPRESIÓN

Nomos Impresores

FOTOGRAFÍA

Autores y Bancos de Imágenes

INDEXADA

LATINDEX (Incluida en el Sistema Regional
de Información en línea para las Revistas
Científicas de América Latina, El Caribe,
España y Portugal)



CARÁTULA

CONMEMORANDO EL CENTENARIO
DE LA RELATIVIDAD GENERAL

INNOVACIÓN Y CIENCIA es la revista de divulgación científica y tecnológica
de la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia - ACAC.

Derechos reservados

Prohibida su reproducción parcial o total sin autorización expresa
de la Editora. La publicación no es responsable legal del contenido
de la publicidad de cada edición.

Los conceptos expresados en los artículos no reflejan necesariamente
la opinión de la Editora o la del Comité Editorial.

Resolución Ministerio de Gobierno N° 5447 del 9 de octubre de 1992
ISSN 0121-5140

ACAC - Carrera 16 N° 31 A-36
Bogotá D.C., Colombia
Teléfono: 432 0370
Email: innovacionyciencia@acac.org.co

LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN Y EL DIAGNÓSTICO CLÍNICO 8

JOSÉ ANTONIO SARTA FUENTES



AGUJEROS NEGROS: RETOS DE LA FÍSICA TEÓRICA 16

JAVIER ALEXÁNDER CANO ARANGO



PRUEBAS EXPERIMENTALES DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL 24

NELSON VELANDIA, S.J., MSC.



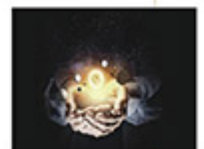
LA RELATIVIDAD: GEOMETRÍA Y ESPACIO-TIEMPO 30

ANDRÉS VARGAS DOMÍNGUEZ



GEOMETRÍA DEL ACOPLAMIENTO ENTRE LA GRAVEDAD Y LA MATERIA 40

JORGE PLAZAS (DR.RER.NAT)



Índice

Innovación y Ciencia Volumen XXII N° 4 - 2015

LA CUARTA OLA: EL TSUNAMI DE LA AUTOMATIZACIÓN

48

JORGE IVÁN BONILLA LEÓ



LIMITAR EL CALENTAMIENTO GLOBAL

56

GUNTER TRAPP, PH. D.



NOTICIAS DESDE LA ACAC

56

REPORTERÍA ACAC



REFLEXIONES SOBRE LA EVOLUCION Y RETOS DE LOS MUSEOS FRENTE A LA APROPIACION DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGIA

66

ANDRÉS FELIPE CEBALLOS M.

HERNÁN GIL P.

MARÍA DEL ROSARIO ATUESTA V.



OFERTA EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

- La Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia - ACAC, entidad sin ánimo de lucro que trabaja por el fomento y apropiación social de la ciencia en Colombia, ha desarrollado en los últimos años la línea de evaluación de proyectos de investigación.
- Con este proceso ACAC ofrece a entidades, públicas, privadas y universidades la revisión de los proyectos que se postulan a sus convocatorias internas, para que obtengan resultados confiables a partir del concepto de profesionales especializados en las áreas del conocimiento que la entidad requiere.

ESTA PROPUESTA DE TRABAJO INCLUYE:

1. Definición del cronograma de trabajo a partir de la cantidad y complejidad de los proyectos.
2. Recepción de documentos a evaluar, los cuales ingresan a la plataforma virtual diseñada por la Asociación, para garantizar la transparencia y agilidad del proceso.
3. Búsqueda de evaluadores expertos investigadores con altos estándares académicos y profesionales, en los temas solicitados por la entidad.
4. Desarrollo del proceso de evaluación a través de la plataforma virtual y verificación de requisitos en el diligenciamiento del formato por parte de los evaluadores.
5. Garantía sobre el cumplimiento de los cronogramas acordados.
6. Entrega de resultados consolidados a través de una matriz, así como un informe ejecutivo de análisis de toda la actividad, que incluye recomendaciones para la entidad.



Informes

Tel.: +57 (1) 432 0370 Cel.: +57 316 529 7881 - Correo electrónico: acup@acac.org.co

Página web: www.acac.org.co

Las ondas...gravitacionales para qué?

El once de febrero pasado, los investigadores del proyecto LIGO (Laser Interferometer Gravitational Waves Observatory) en Estados Unidos, anunciaron que el análisis de los datos obtenidos el 14 de septiembre de 2015 en los dos detectores del experimento, mostraron de manera directa la existencia de ondas gravitacionales producidas por el choque de dos agujeros negros a 1300 años luz de la tierra. Esas ondas son fluctuaciones del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Habían sido predichas por Albert Einstein en 1915 en el marco de su teoría de la relatividad general y hasta ahora sólo habían tenido demostraciones indirectas. Este descubrimiento es una confirmación adicional de una de las más importantes teorías del siglo XX que es la base de nuestra actual comprensión del origen del universo y su evolución.

Ese logro, perseguido por centenares de científicos del mundo entero, es un excelente ejemplo del proceso de la investigación científica básica, que en caso de la física, ha tenido magníficos resultados en los últimos años. Vale la pena recordar en ese sentido el descubrimiento en 2012 del bosón de Higgs, propuesto desde los años 60 del siglo pasado y cuya búsqueda motivó la construcción del LHC (Large Hadron Collider: el acelerador de partículas más grande del mundo) en el CERN (Organización europea para investigaciones nucleares) de Ginebra, la máquina más fabulosa construida por la humanidad hasta hoy.

Sobra decir que ambos ejemplos si bien han sido recibidos con entusiasmo por la comunidad científica mundial, también han sido blanco de críticas de quienes consideran que la investigación básica es demasiado costosa y que no aporta mayores innovaciones tecnológicas, según ellos, único motor del desarrollo económico.

Para responder a esa posición simplista pero desgraciadamente muy generalizada en países como el nuestro, vale recordar un caso muy similar que fue el descubrimiento de las ondas de radio, realizado por Heinrich Hertz en 1887. Este físico alemán inspiraba su trabajo en el deseo de confirmar las predicciones hechas por James Maxwell en su teoría del electromagnetismo en 1863. Si bien en ese entonces ese descubrimiento no parecía tener ninguna aplicación práctica, fue la base del invento de la radio por Guillermo Marconi en 1905, sin el cual hoy no tendríamos teléfonos celulares.

Volviendo a las ondas gravitacionales, vale la pena mencionar que en 1983 tuvo lugar en Bogotá un curso sobre la detección de Ondas Gravitacionales organizado por el CIF y el Instituto de Asuntos Nucleares, durante el cual se propuso que Colombia participara en una red internacional de detectores que, para lograr una mayor precisión, requería de laboratorios instalados en diferentes lugares del planeta. Desafortunadamente no fue posible conseguir la financiación requerida puesto que se consideraba que el tema era de muy baja prioridad para un país como el nuestro. Lástima haber perdido esa oportunidad de entrar a jugar en las grandes ligas de la ciencia mundial hace más de treinta años.

Tenemos clara la importancia de la investigación aplicada para contribuir desde la ciencia a la solución de problemas tan concretos como la mitigación del impacto del cambio climático en nuestro país o el incremento de la producción agrícola en las regiones más desfavorecidas, pero también consideramos que Colombia debe participar con un alto nivel en la construcción del conocimiento universal. Recordemos aquí las palabras de J.J. Thompson el descubridor del electrón, base de la electrónica moderna: "la ciencia aplicada conduce a mejorar las cosas. La ciencia básica es la que genera las revoluciones"

Eduardo Posada
Presidente ACAC

María Piedad Villaveces
Directora ACAC

► FORMATO DE PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS PARA LA REVISTA



► INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

La revista INNOVACIÓN Y CIENCIA es una revista de divulgación científica, que tiene como propósito contribuir con una mejor apropiación social de la ciencia, compartiendo con sus lectores temas de ciencia, tecnología e innovación. Este es el principal motivo por el cual la redacción de los artículos, así como el tipo de idioma usado en su escritura, debe ser sencillo, apto para todo tipo de público. En caso de estar interesado en publicar artículos con resultados de una investigación, lo podrá hacer teniendo en cuenta que no se exige el formato propio de las revistas de difusión de la ciencia.

► PASOS A SEGUIR SI DESEA ENVIAR UN ARTÍCULO:

1. Escriba el artículo en formato Word, letra Arial, tamaño de letra 12, separación entre renglones 1,5 y con una máxima extensión del documento de seis páginas.
2. Respecto al autor o los autores, debe colocar su título universitario, su actividad, el lugar donde trabaja y su correo electrónico.
3. El artículo debe incluir un resumen de máximo ocho renglones, separado del documento, donde se explique brevemente el contenido del mismo y se motive a su lectura. Al finalizar el documento, debe incluir unas conclusiones, las cuales no deben estar separadas del documento.
4. Todos los artículos deben contener la bibliografía respectiva, la cual debe estar al final del artículo, pero citada numéricamente en los párrafos que corresponda. Recuerde que no citar es considerado plagio.
5. El formato que se utiliza para el manejo de la bibliografía es Vancouver. Más adelante encontrará ejemplos de este formato.
6. Si el documento tiene una o dos frases que usted desee resaltar, por favor resáltelas en el texto. La revista se encargará de colocarlas en recuadros con color. Incluya en el documento gráficas, figuras, fotos o tablas, la cuales faciliten su lectura y lo hagan más ameno. Tenga en cuenta que las fotos y figuras deben tener el nombre completo del autor y, en caso de que el autor del artículo no sea el autor de las fotografías o figuras, se debe enviar una carta de autorización del dueño en la que permita su publicación. Las fotos, figuras o gráficas, deben venir con su leyenda explicativa y no forman parte de las seis páginas del escrito, aunque vengan incluidas en él.

► FIGURAS:

Las figuras que acompañan el texto deberán contener su explicación. Inicie con la palabra Figura y coloque el número que le corresponde. Este debe ser el mismo que se encuentre en el texto. Luego describa en una frase el contenido de la figura. Coloque al final el autor de la figura o la fuente de donde la obtuvo. No extraiga figuras de páginas de Internet que no cuentan con permisos de uso.

► FOTOS:

Las fotos que acompañan los documentos, al igual que las figuras, deberán estar citadas, nombradas e incluir a quien pertenecen. Las fotografías que se publiquen en la revista deben tener una resolución de 300 ppp, un tamaño mínimo de 1200X1200 píxeles y deben ser enviadas en formato jpg.



Innovación y Ciencia

► GRÁFICAS:

Las gráficas que acompañan los documentos deberán estar citadas e incluir, además, el programa con el cual fueron elaboradas.

► PUBLICACIÓN:

Envíe el artículo por internet al correo electrónico: innovacionyciencia@acac.org.co. Los artículos podrán ser enviados todo el año. Ellos serán revisados por el Editor, quien verificará la forma en la cual se encuentra escrito y si cumple con las normas para su publicación. Una vez realizada esta primera lectura será enviado al Comité Editorial, quien se encargará de dar su opinión respecto a la publicación. La revista tiene cuatro ediciones al año, de tal manera que su documento, en caso de ser publicado, irá en el número en que exista el espacio suficiente para su publicación.

► REFERENCIAS:

Las citas bibliográficas dependerán de la fuente de la cual usted haya tomado la información a citar. Estas deben ser colocadas en el texto con el número correspondiente entre paréntesis. Ej. (1)

- En caso de citar un artículo, utilice el formato Vancouver. A continuación un ejemplo:

Gutierrez M, Matiz A, Ulloa J, Alvarado M. Astrovirus (HAstV) como agente causal de diarrea en niños Colombianos: Siete años de estudio. Nova: publicación científica. 2005;3(3):1-20

- En caso de ser un documento de Internet

García L. La vida en Marte. Una visión simplista. Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Paso. Disponible en: <http://www.universidadelpaso.edu.fg>. Consultado Abril 2006

- En caso de ser un libro

Castano M., Cultivos Celulares. En: Urcuqui, S., Ossa, J. Principios de Virología. Fondo editorial Biogenesis, Cuarta edición, Cap. III 29-46 (2008)

- En caso de requerir mayor información, puede remitirse a:

Patiño G. Citas y referencias bibliográficas. Pontificia Universidad Javeriana. Segunda edición (2005)

LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN EN LA TERAPIA Y EL DIAGNÓSTICO CLÍNICO



JOSÉ ANTONIO SARTA FUENTES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

sartaj@javeriana.edu.co

RESUMEN

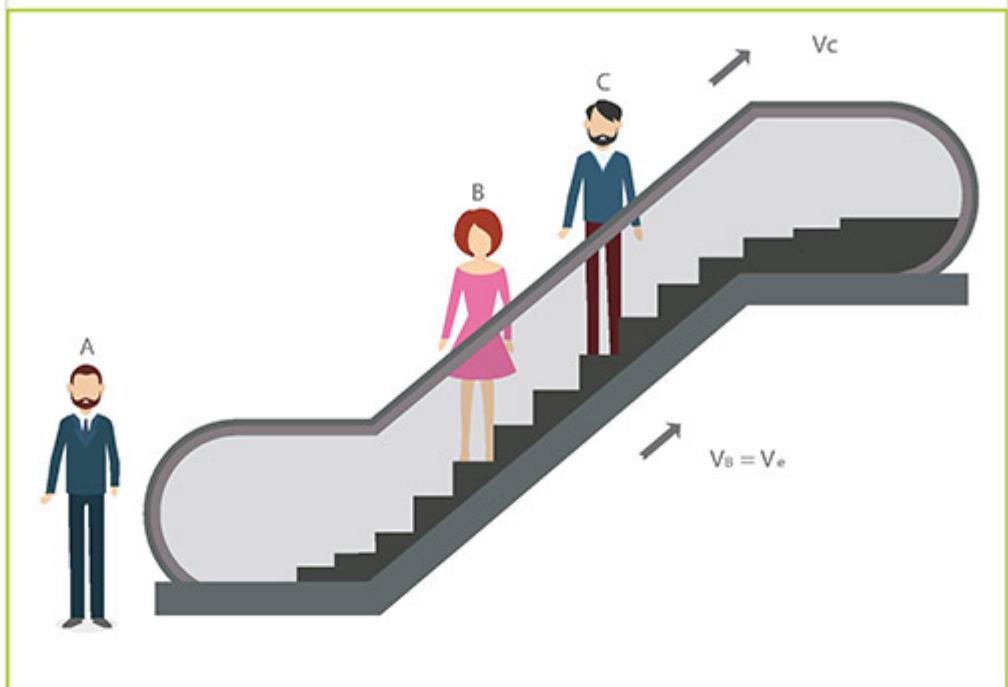
La relatividad de Einstein estudia el movimiento de los cuerpos en ausencia o presencia de aceleración y, en especial, cuando los cuerpos se desplazan a grandes velocidades (1, 2) o bajo la acción de fuerzas gravitacionales intensas (3). La relatividad restringida o especial, formulada por Albert Einstein en 1905, examina el comportamiento que presentan el espacio, el tiempo y la masa cuando los cuerpos se desplazan a velocidades próximas a la velocidad de la luz. La relatividad general enunciada por Einstein en 1916, identifica la acción que ejerce la masa sobre el espacio-tiempo y explica el movimiento que describen los cuerpos en el continuo espacio-tiempo. Las centrales nucleares que suministran energía eléctrica a las ciudades, la tecnología moderna de los sistemas de posicionamiento global GPS, la radioterapia y el diagnóstico clínico son algunos ejemplos que ilustran el amplio espectro de las aplicaciones que son el resultado de las ideas propuestas por Einstein en su teoría de la relatividad. En la actualidad, las aplicaciones médicas relacionadas con la relatividad de Einstein se nutren de los conceptos, consecuencias y resultados obtenidos de la teoría restringida o especial, formulada en 1905.

Relatividad especial o restringida

Para ilustrar los fundamentos de la relatividad especial o restringida se plantea la situación que se presenta en la Figura 1. Un observador A se encuentra en reposo en la parte inferior de una escalera eléctrica y mira a dos sujetos que ascienden por ella. El sujeto B se encuentra de pie sobre la escalera desplazándose a la velocidad constante de la escalera ($V_B = V_e$), mientras que el sujeto C camina sobre la escalera y se desplaza a una velocidad V_c respecto del observador B.

El sentido común indica que los tres individuos están de acuerdo en que la distancia recorrida por los dos sujetos B y C es la misma, al igual que concluyen que al observador C le toma menos tiempo que a B en subir la escalera. C llega más rápido que B toda vez que, a la velocidad de la escalera (V_e) le suma su propia velocidad (V_c). De lo anterior se deduce que, para A, el individuo C va más rápido que B; si antes de empezar el ascenso por la

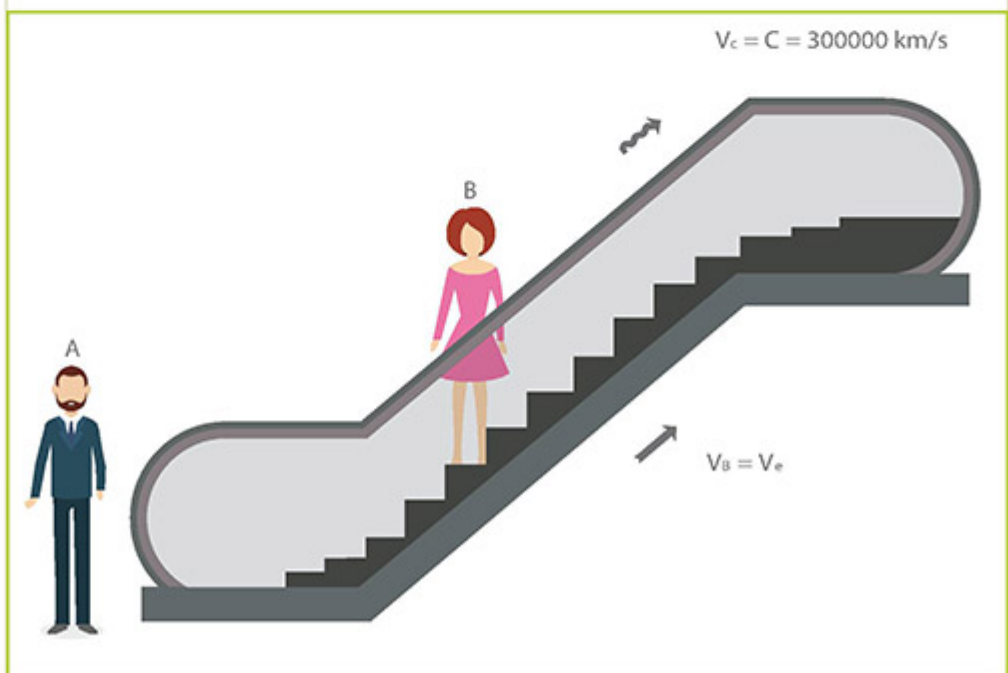
FIGURA 1.
CINEMÁTICA RELATIVISTA PARA
TRES OBSERVADORES, UNO
ESTACIONARIO (A) Y DOS
EN MOVIMIENTO (B Y C)
ASCENDIENDO POR UNA
ESCALERA ELÉCTRICA CON
VELOCIDAD CONSTANTE (V_e).



escalera los tres personajes sincronizan sus relojes y, después de terminado el ascenso de B y C, se reúnen nuevamente, concluyen que sus relojes señalan la misma hora, es decir, infieren que el tiempo es absoluto.

Las anteriores consideraciones pueden cambiar drásticamente si, de forma hipotética, el individuo C de la Figura 1 es remplazado por un haz de luz que viaja a la velocidad de 300.000 km/s y la escalera se desplaza a una velocidad V_e comparable a la velocidad de la luz (c). Sustentado en evidencias fácticas y con el propósito de extender el carácter absoluto de las leyes electromag-

FIGURA 2.
CINEMÁTICA RELATIVISTA
PARA DOS SUJETOS, UNO
ESTACIONARIO (A) Y OTRO
EN MOVIMIENTO (B) CON
VELOCIDAD CONSTANTE, V_e ,
QUE OBSERVAN LA PROPAGA-
CIÓN DE UN HAZ DE LUZ
A LA VELOCIDAD
 $V_C = c = 300.000 \text{ KM/S}$.



néticas para dos observadores A y B como los indicados en la Figura 2, Einstein estableció como principio la constancia de la velocidad de luz, trayendo consigo una serie de hechos inusitados.

Al imprimirle un carácter absoluto al valor de la velocidad de la luz, para los dos observadores A y B de la Figura 2, en primer lugar se tiene, sin interesar su estado de reposo o de movimiento, que la velocidad de la luz medida por ambos es exactamente la misma. Este hecho le condujo a Einstein a establecer inicialmente el carácter relativo del espacio y del tiempo (1) y, posteriormente, la equivalencia entre la masa y la energía (2).

En segundo lugar, una vez terminado el ascenso del individuo B y comparar su tiempo con el observador A, concluyen que, producto de la dilatación del tiempo, el reloj de A se encuentra adelantado respecto al de B; por último, cuando A contempla a B en su movimiento advierte que la masa de éste se ve aumentada por el carácter relativo de la masa en el movimiento.

Terapia

La terapia puede ser entendida como el tratamiento que se realiza para tratar una enfermedad determinada. Las terapias aplicadas pueden o no requerir de una infraestructura técnica que involucren los fundamentos de la teoría de la relatividad; la crioterapia, la electroterapia y la hidroterapia son ejemplos de aquellas que, en la práctica, no los requieren. Por excelencia, la radioterapia empleada en oncología como herramienta terapéutica para el tratamiento del cáncer es el área de la medicina en donde con mayor frecuencia se emplean los desarrollos técnicos de la teoría especial de la relatividad.

El objetivo principal de la radioterapia es destruir las células cancerosas aplicando radiaciones ionizantes al tumor, evitando así daños al tejido sano que lo rodea. La radiación puede ser suministrada externa o internamente y puede ser de naturaleza electromagnética de alta energía o de partículas con o sin carga eléctrica. Los rayos gamma, X de alta energía, al igual que los electrones, los protones y los neutrones, son las radiaciones más frecuentemente empleadas en la radio-oncología (4).

Los aceleradores lineales (LINAC) son equipos empleados en radioterapia de haz externo que suministran rayos X de alta energía o electrones. En el interior del acelerador se generan electrones que son acelerados por medio de una guía de ondas hasta alcanzar velocidades de 99,9% de la velocidad de la luz. De acuerdo a las leyes de la teoría especial de la relatividad, los electrones viajando al interior del acelerador satisfacen los conceptos de espacio, tiempo y masa relativos, motivos que llevan a considerar a los LINAC empleados en radioterapia como máquinas diseñadas a partir de las correcciones relativistas introducidas por Einstein en su teoría (5).



FIGURA 3.

ACELERADOR LINEAL (LINAC)
EMPLEADO EN RADIOTERAPIA
DE HAZ EXTERNO. TOMADA DE:
[HTTP://WWW.RADIOLOGYINFO.
ORG/SP/INFO.CFM?PG=LINAC](http://www.radiologyinfo.org/sp/info.cfm?pg=LINAC)

El material radioactivo producido en reactores nucleares que se ubica dentro de cavidades corporales, o en regiones próximas a la zona tumoral en contacto directo con el cuerpo del paciente, constituye el fundamento de la radioterapia interna, también conocida como braquiterapia. Los rayos gamma, X de alta energía o los electrones emitidos por las fuentes radioactivas de ^{192}Ir , ^{125}I , ^{137}Cs y ^{198}Au en forma de semillas, alambres, agujas o encapsuladas en cilindros, generalmente son empleados en radioterapia interna (Figura 4.). El material radioactivo generado en reactores nucleares es producto de la activación neutrónica de materiales que involucran reacciones nucleares en las cuales la equivalencia entre la masa y la energía de la relatividad especial de Einstein juegan un papel trascendental (6).

FIGURA 4.
BARRAS RADIOACTIVAS
DE ^{125}I EMPLEADAS EN LA
BRAQUITERAPIA. TOMADA DE:
[HTTPS://COMMONS.
WIKIMEDIA.ORG/WIKI/
FILE:BRACHYTHERAPY.
JPEG#FILE](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brachytherapy.jpeg#file)

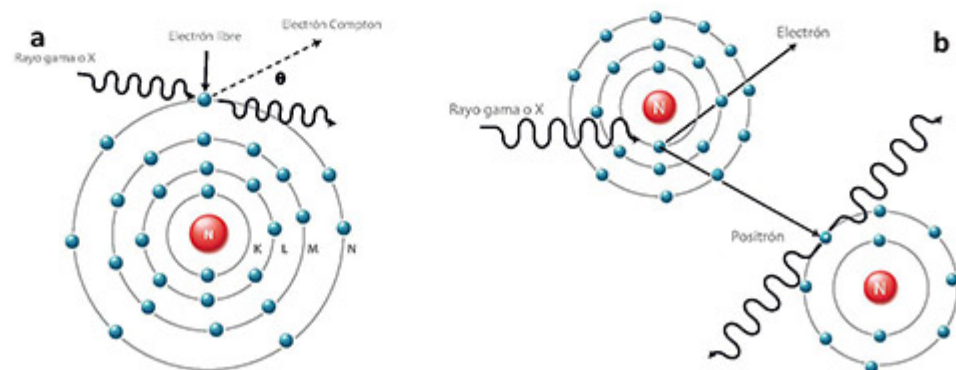


Si el diseño de los aceleradores lineales (LINAC) de uso médico y la producción de fuentes radioactivas empleadas en braquiterapia requieren de los conceptos previos establecidos por Einstein en 1905, los diferentes mecanismos mediante los cuales la radiación ionizante ataca a las células cancerosas también incorporan las ideas de Einstein.

La energía depositada en un tejido debida a rayos gamma o X de alta energía, con el propósito de eliminar y evitar la propagación de neoplasias malignas, involucran diferentes procesos que necesaria-

FIGURA 5.
PROCESOS RELATIVISTAS
MEDIANTE LOS CUALES LOS
RAYOS GAMA O X TRASFIEREN
SU ENERGÍA A LOS ÁTOMOS
PRESENTES EN EL INTERIOR DE
LAS CÉLULAS CANCEROSAS.
FIGURA 5A: EFECTO COMPTON.

FIGURA 5B:
CREACIÓN DE PARES.
FUENTE: RADIATION PHYSICS
FOR MEDICAL PHYSICIST, E.B.
PODGORSK, 2005.
SPRINGER, 2005.



mente requieren de los conceptos relativistas de Einstein relacionados con colisiones y la conversión de energía en materia (7). Entre los procesos más relevantes que ocurren en el interior del tejido se encuentran los llamados efecto Compton y la creación de pares, cuya finalidad básicamente consiste en transformar los rayos gama y los X en electrones que transfieren su energía al tejido.

En la Figura 5 a se ilustra el proceso mediante el cual la radiación, a través de una colisión elástica relativista, remueve un electrón libre de los átomos presentes en el tumor; en la figura 5 b se muestra la forma por la cual la radiación cerca del núcleo de los átomos existentes en el tumor se transforma en un electrón y un positrón, el cual, a su vez con los electrones de otros átomos, se transforma en radiación secundaria.

La energía depositada por la radiación en el tumor se expresa en unidades de Gray (Gy) o en centigrays (cGy) y puede ser calculada mediante expresiones relativistas, o medida al emplear diferentes métodos (8). Tejidos diferentes soportan cantidades variadas de radiación. Por ejemplo, el hígado puede tolerar dosis máximas de 3,000 cGy en tanto que, para los riñones, la dosis máxima es de 1,800 cGy.

Imágenes de Diagnóstico

No todas las técnicas de diagnóstico empleadas en medicina se encuentran apoyadas en los conceptos de la relatividad restringida de Einstein. Este es el caso de la Resonancia Magnética, la Tomografía Axial Computarizada (TAC), la ecografía y la radiología convencional. La rama de la medicina en la cual los conceptos de la relatividad de Einstein se hacen indispensables para la obtención de una imagen diagnóstica es la medicina nuclear.

En esta especialidad se utilizan isótopos radioactivos creados en reactores nucleares o ciclotrones, los cuales se mezclan con fármacos produciendo radiofármacos para ser aplicados vía intravenosa a los pacientes (9, 10). Al igual que ocurre con las fuentes radioactivas empleadas en la braquiterapia, la producción de los isótopos radioactivos involucra el concepto de la equivalencia masa energía de Einstein.

La técnica moderna, llamada Tomografía de Emisión de Positrones (PET, en inglés), emplea radiofármacos emisores de positrones que son aplicados a un paciente. El positrón no es materia ordinaria, es antimateria y constituye la antipartícula del electrón. Los positrones fueron predichos por el físico Paul Dirac en 1928 cuando aplicó al electrón los conceptos de la relatividad de Einstein y la física cuántica (11); es decir, los positrones no se hubiesen predicho sin el conocimiento previo de la mecánica cuántica relativista.

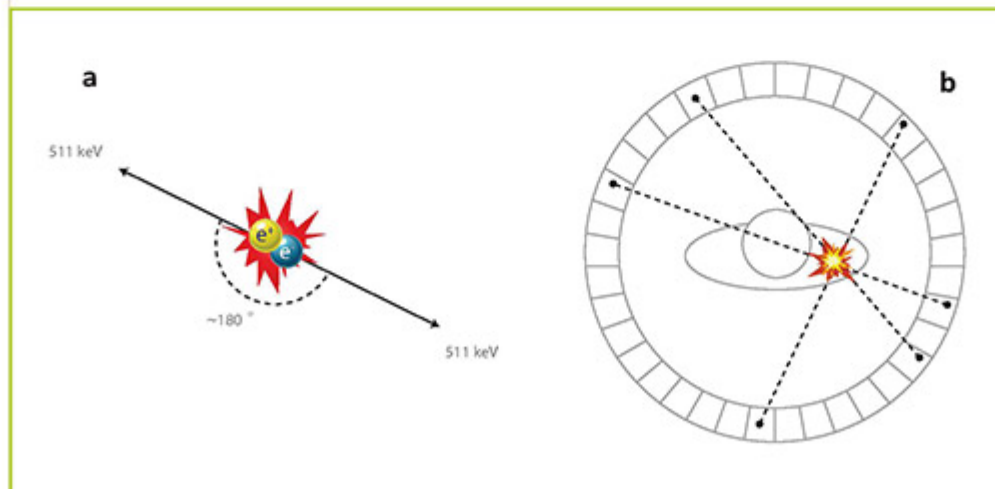


FIGURA 6 .

Como se indica en la Figura 6a, cuando un positrón se aniquila se emiten fotones en direcciones contrarias con valores de energía igual a 511 kiloelectronvoltios (keV). El proceso físico de aniquilación de un par electrón-positrón es descrito perfectamente por las expresiones relativistas de Einstein. Cuando este proceso ocurre en el interior de un paciente, los fotones de luz producto de la aniquilación son registrados por un anillo de sensores electrónicos, permitiendo construir una imagen tomográfica.

Como las células neoplásicas presentan un nivel más elevado de actividad metabólica que los tejidos normales consumiendo más glucosa, en la generación de una imagen PET al paciente se le suministra el radiofármaco fluorodesoxi-glucosa (FDG), que contiene flúor. La emisión de positrones del flúor se debe a la reacción nuclear que se efectúa en un ciclotrón, entre el isótopo del oxígeno O_{18} y protones de alta energía (12). El ciclotrón es una máquina empleada para acelerar los protones describiendo trayectorias circulares. Cada trayectoria circular es un ciclo, y en cada ciclo los protones adquieren energía. Entre más trayectorias circulares describan los protones, más ciclos y más energía tendrán los protones.

FIGURA 7.

Tomógrafo de Emisión de Positrones.

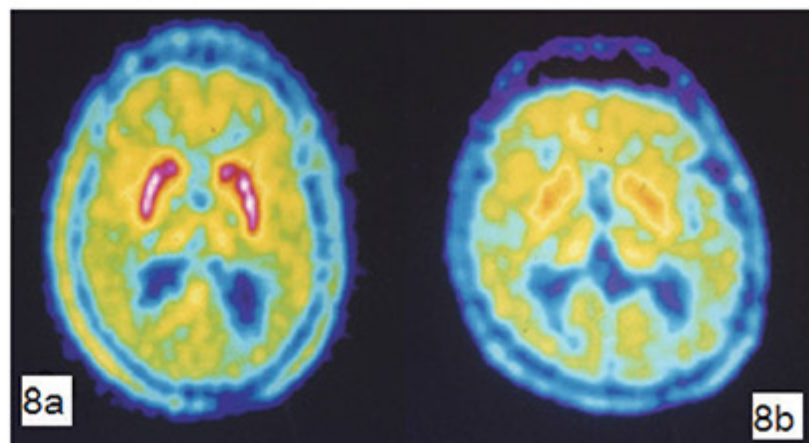
Fuente:

<http://everythinglists.com/top-10-most-used-medical-imaging-modalities/>



FIGURA 8.

IMÁGENES PET DE CEREBRO HUMANO NORMAL (8a) Y CON PARKINSON (8b). FUENTE: [HTTP://WWW.DRUGS.COM/HEALTH-GUIDE/POSITRON-EMISSION-TOMOGRAPHY-PET-SCAN.HTML](http://www.drugs.com/health-guide/positron-emission-tomography-pet-scan.html)



En la Figura 7 se muestra la disposición de un paciente en un tomógrafo de emisión de positrones PET. Una vez se ha inyectado el paciente con FDG, en su interior los positrones se desintegran en fotones de luz, los cuales son captados por los sensores instalados en el anillo del tomógrafo y, posteriormente, la información es procesada para obtener una imagen funcional tridimensional.

En la Figura 8 se ilustran dos imágenes PET del cerebro humano. La Figura 8a corresponde a una persona normal, en tanto que 8b pertenece a un paciente con Parkinson. Estas imágenes reflejan el potencial del PET en el diagnóstico clínico, en áreas de la medicina que no necesariamente corresponden con la oncología; además de ésta, la neurología y la cardiología son disciplinas de la medicina que emplean rutinariamente imágenes diagnósticas funcionales tridimensionales. El fundamento de una imagen PET encierra los conceptos básicos de la mecánica cuántica relativista que tienen en Einstein y Dirac sus principales representantes.

REFERENCIAS

1. Einstein A. (1905). Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento. *Annalen der Physik* 17: 891-921.
2. Einstein A. (1905). ¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?. *Annalen der Physik* 18: 639-641.
3. Einstein A. (1916). El fundamento de la Teoría General de la Relatividad. *Annalen der Physik* 49: 769-822.
4. Herranz, E., Herraiz, J.L., Vicente, E., España, S., Cal-González, J., Udías, J.M (2008). Grupo de Física Nuclear, Dpto. Física Atómica, Molecular y Nuclear, UCM.
5. Karzmark C.J. and Morton R.J. (1981). A primer on theory and operation of linear accelerators in radiation therapy. Bureau of Radiological Health, FDA 82-8181.
6. Cherry R., Sorenson J. A., Phelps M.E. (2012). *Physics in Nuclear Medicine*. Elsevier.
7. Podgorsak E.B. (2005). *Radiation Physics for Medical Physicists*. Springer.
8. Izewska J., Rajan G. (2006). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. IAEA.
9. Manual for reactor produced radioisotopes. IAEA-TECDOC-1340. 2003.
10. Qaim, S.M. (1982). Nuclear data relevant to cyclotron produced short-lived medical radioisotopes. IAEA .
11. Dirac P.A.M. (1928). The quantum theory of the electron. *Proc. R. Soc. A*.117 610.
12. GAO Xiao, et.al. (2011). Preparation and quality control of ¹⁸F-FDG as positron emission tomography imaging agent. *Journal of first military medical*

**AGUJEROS
NEGROS:
RETOS DE LA
FÍSICA
TEÓRICA**

JAVIER ALEXÁNDER CANO ARANGO

DOCENTE DE FÍSICA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

javier.cano@javeriana.edu.co

TODO LENGUAJE ES UN ALFABETO DE SÍMBOLOS CUYO EJERCICIO
PRESUPONE UN PASADO QUE LOS INTERLOCUTORES COMPARTEN;
¿CÓMO TRANSMITIR A LOS OTROS EL INFINITO ALEPH,
QUE MI TEMEROSA MEMORIA APENAS ABARCA?

El Aleph, Jorge Luis Borges

RESUMEN

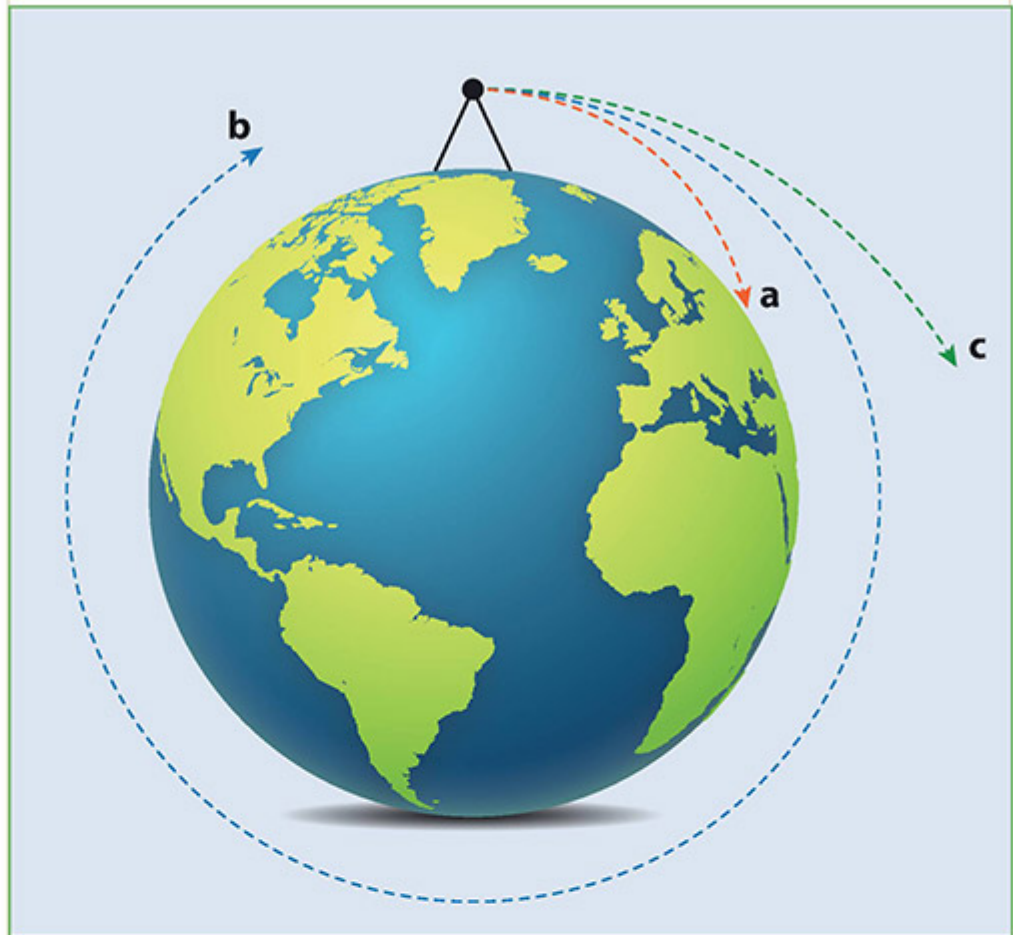
Los agujeros negros son los objetos más exóticos predichos a través de las ecuaciones de campo gravitacional y, aunque han aportado mucho a la hora de entender todo el marco físico y matemático de la relatividad general, también plantean problemas inquietantes para la ciencia. El problema básico es el observacional, ya que tan solo podemos realizar mediciones indirectas sobre los agujeros negros, es decir, la interacción gravitacional con los objetos que lo rodean; el segundo, y tal vez más grave, corresponde a la violación de propiedades básicas de la mecánica cuántica, conocido como la pérdida de la información.

Después del anuncio de las ecuaciones de campo gravitacional por parte de Albert Einstein, empezaron a surgir sus soluciones. Una de las más importantes fue la realizada por Karl Schwarzschild en 1916 (1). Esta resolución contiene la predicción de una situación física tan extrema y tan ajena a los fenómenos naturales mejor conocidos, que es incluso capaz de limitar nuestras posibilidades de estudiarla tanto teórica como experimentalmente. A ella se le ha denominado agujero negro, término acuñado por John Wheeler. De forma simple, es un objeto masivo tan compacto para el cual la aceleración gravitacional sobre su superficie hace que sea imposible que la luz pueda escapar de él.

Tomemos un momento para explicar este hecho. Cuando usted salta, la interacción gravitacional con el planeta Tierra hace que vuelva a caer. El qué tan alto llegue depende de la velocidad inicial de su salto; sin embargo, existe una velocidad tal que, si la logramos, podemos escapar al campo gravitacional de la Tierra. La denominamos velocidad de escape (ver Figura 1).

FIGURA 1:

EL OBJETO **A** ES LANZADO CON UNA VELOCIDAD INICIAL MENOR QUE LA DE ESCAPE Y VUELVE A LA TIERRA. EN **B**, LA VELOCIDAD INICIAL ES IGUAL A LA DE ESCAPE Y, AUNQUE NO VUELVE A LA SUPERFICIE, SE MANTIENE EN ÓRBITA. POR ÚLTIMO, EN **C**, LA VELOCIDAD INICIAL ES MAYOR QUE LA DE ESCAPE Y SE ALEJA DE LA TIERRA.



Este concepto fue usado por John Michell (2) en 1783 e, independientemente, por Pierre-Simon Laplace en 1796 para postular el concepto de estrellas negras, las cuales, debido a su intensa aceleración gravitacional, no permiten que la luz escape de ellas.

Problemas clásicos de los agujeros negros

Debido al comportamiento de un agujero negro surgen dos problemas en su estudio:

Imposibilidad de observarlos directamente: nada puede moverse con una velocidad mayor a la de la luz (resultado demostrado por Albert Einstein con su relatividad especial de 1905), lo que implica que, incluso si un agujero negro estuviese en nuestro vecindario, sería imposible observarlo directamente.

Sin embargo, debido a que es un objeto compacto masivo, deberíamos esperar que su influencia gravitacional en otros objetos sea identificable. A partir de este hecho el Grupo de Investigación del Centro Galáctico de UCLA ha venido obteniendo datos del centro de la Vía Láctea desde principios de los años 90 y ha identificado y medido las órbitas de las estrellas en esta zona (ver Figura 2).

Estos datos muestran que el conjunto de estrellas orbitan un objeto masivo invisible al telescopio, y los cálculos de su masa muestran que puede ser identificado con un agujero negro supermasivo. A este objeto se le ha denominado *Sagittarius A**.

Las evidencias encontradas son aceptadas por gran parte de la comunidad científica y son catalogadas como la primera evidencia firme de la existencia de los agujeros negros; además, en noviembre

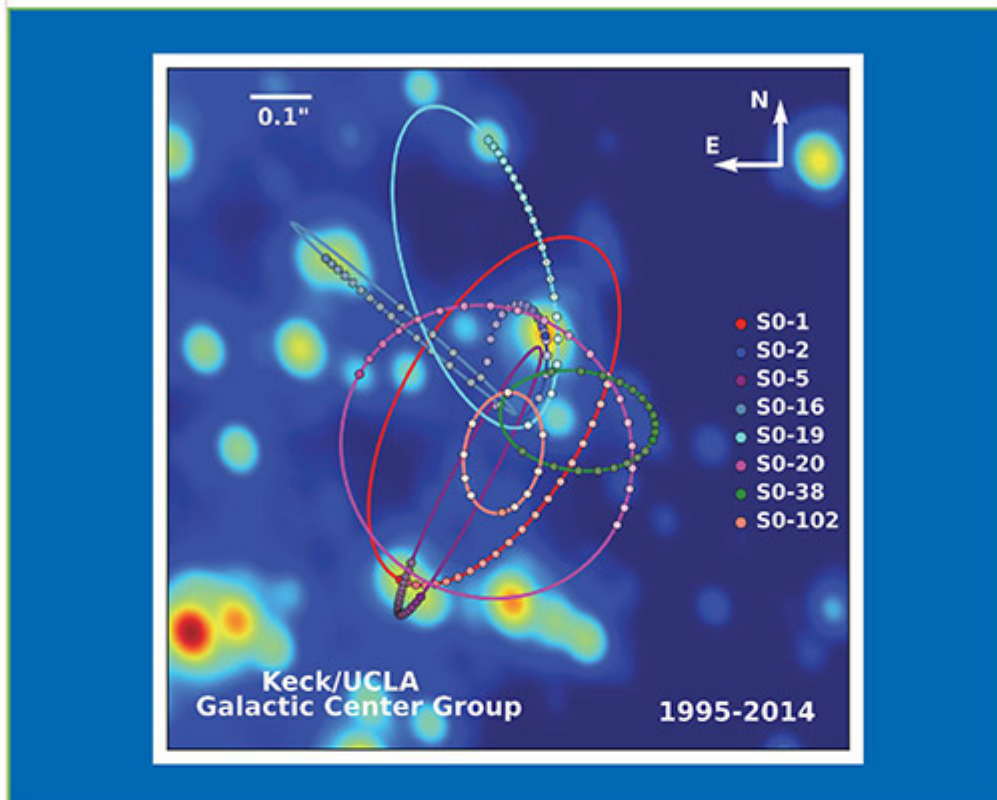


FIGURA 2
ÓRBITAS RECONSTRUIDAS
PARA LAS ESTRELLAS EN EL
CENTRO DE LA VÍA LÁCTEA
POR PARTE DEL GRUPO DE
INVESTIGACIÓN DEL CENTRO
GALÁCTICO DE UCLA.
TOMADA DE [HTTP://WWW.
GALACTICCENTER.ASTRO.UCLA.
EDU/IMAGES.HTML](http://www.galacticcenter.astro.ucla.edu/images.html)

de 2015, el equipo del Event Horizon Telescope (EHT) obtuvo las primeras mediciones de variaciones del campo magnético alrededor de Sagittarius A*, descritas por el modelo teórico de agujero negro (3).

Imposibilidad de saber que pasa en su interior: Debido a que el escape de señales de cualquier tipo es imposible, no podemos saber nada acerca del interior de un agujero negro. Esto ha hecho que se mantengan ingentes esfuerzos teóricos para describir qué pasa allí; sin embargo, las condiciones físicas son tan extremas (interacciones gravitacionales gigantescas) que las ecuaciones que gobiernan este tipo de fenómenos en condiciones normales empiezan a fallar y la predicción se hace básicamente imposible.

Aun así, a principios de los noventa surgió una idea de acuerdo a la cual para saber que pasa dentro de un agujero negro tan solo debemos estudiar su superficie, esta idea conocida como principio holográfico (4) ha permitido avanzar en la descripción de los agujeros negros pero ha planteado una nueva interrogante ¿se comporta el universo de forma holográfica?.

El estado cuántico consiste en la mínima cantidad de información con la que podemos identificar un sistema y saber cuál será su posible evolución.

Los agujeros negros y la mecánica cuántica

La mecánica cuántica representa el rompimiento total con la física newtoniana, una teoría que nace y crece a la par con la relatividad general y que, en tan solo 100 años, nos ha llevado al desarrollo tecnológico actual y ha cambiado nuestra visión del mundo físico de manera extrema.

FIGURA 3
DESCRIPCIÓN BREVE DEL
ESTUDIO DE SISTEMAS FÍSICOS
EN LA MECÁNICA CUÁNTICA.

DESCRIPCIÓN EN MECÁNICA CUÁNTICA

1. Cómo funciona?

Los sistemas físicos son estudiados por medio de sus estados

$$| \textit{gato} \rangle = | \textit{color}, \textit{edad}, \textit{raza} \rangle$$

Esto es lo que llamamos un estado puro

2. Evolución:

Los sistemas evolucionan en el tiempo, pero tan solo de estados puros en estados puros

$$| \textit{gato}, t = 0 \rangle \rightarrow | \textit{gato}, t > 0 \rangle$$

3. Estados mezclados

$$| \textit{gato} \rangle \sim \begin{cases} | \textit{color}, \textit{edad}, \textit{raza} \rangle \text{ con } p_1 \\ | \textit{color}, \textit{edad}, \textit{raza} \rangle \text{ con } p_2 \\ | \textit{color}, \textit{edad}, \textit{raza} \rangle \text{ con } p_3 \end{cases}$$

Ningún estado puro puede evolucionar en un estado mezclado

En la mecánica cuántica los fenómenos físicos son estudiados a través de lo que llamamos el estado cuántico, que consiste en la mínima cantidad de información con la que podemos identificar un sistema y saber cuál será su posible evolución. Por ejemplo, un gato puede ser identificado por su color, edad, raza o sexo y esperamos que, a medida que pase el tiempo, lo único que cambie sea su edad. Este tipo de estados donde tenemos el máximo de información posible para caracterizar se llaman estados puros y una regla básica de la mecánica cuántica es que tan solo pueden evolucionar en estados puros; es decir, conservamos el máximo de información posible para describirlos.

También tenemos otro tipo de situación donde un sistema físico debe ser descrito por lo que se conoce como un estado mezclado, donde no tenemos la máxima cantidad de información para identificarlo o, dicho en otras palabras, tenemos un conjunto de estados puros totalmente diferentes que hacen imposible la identificación de manera unívoca. Para la mecánica cuántica está totalmente prohibido que un estado puro evolucione en un estado mezclado debido a la pérdida de información; por ejemplo, en el caso de nuestro gato, es imposible que, de ser de raza siamés, evolucione con el correr del tiempo en dos gatos, uno de angora y otro persa (ver Figura 3).

¿Y esto que tiene que ver con los agujeros negros? Bueno, la respuesta es la radiación Hawking: las leyes que gobiernan a los agujeros negros vistas desde la relatividad general tienen una estructura similar a las de las leyes de la termodinámica, por lo cual en 1974 Jacob Bekenstein (5) lanzó una hipótesis arriesgada: "Los agujeros negros son objetos termodinámicos". Por lo tanto, podemos asociar a estos objetos una temperatura y, como sabemos desde el siglo XIX, todo objeto que la posea una diferente de 0K emite radiación electromagnética (6), esto significa que un agujero negro debe evaporarse.

Antes de esta hipótesis, los agujeros negros eran básicamente objetos que, después de formarse, nunca desaparecerían. Esta visión fue demostrada y pasó a ser parte de las características teóricas de los agujeros negros gracias al trabajo de Stephen Hawking en 1974 (7), quien avaló el comportamiento termodinámico de los agujeros negros. Es el motivo por el cual la radiación emitida por un agujero negro es lo que llamamos radiación Hawking.

Sin embargo, la temperatura de un agujero negro es inversamente proporcional a su masa, lo cual plantea un problema grave: un agujero negro como Sagittarius A* tiene una masa tan grande que su temperatura está por debajo de la del fondo cósmico de microondas, alrededor de 2K, lo que hace que la radiación emitida sea virtualmente imposible de medir debido a que se ve opacada por fuentes más intensas.

Decir que la pérdida de información en los agujeros negros es un problema no resuelto puede sonar decepcionante, pero debe tenerse en cuenta que, gracias a él, hemos desarrollado un arsenal de conceptos físicos y matemáticos que nos han permitido ir más allá de la frontera de la investigación experimental actual.

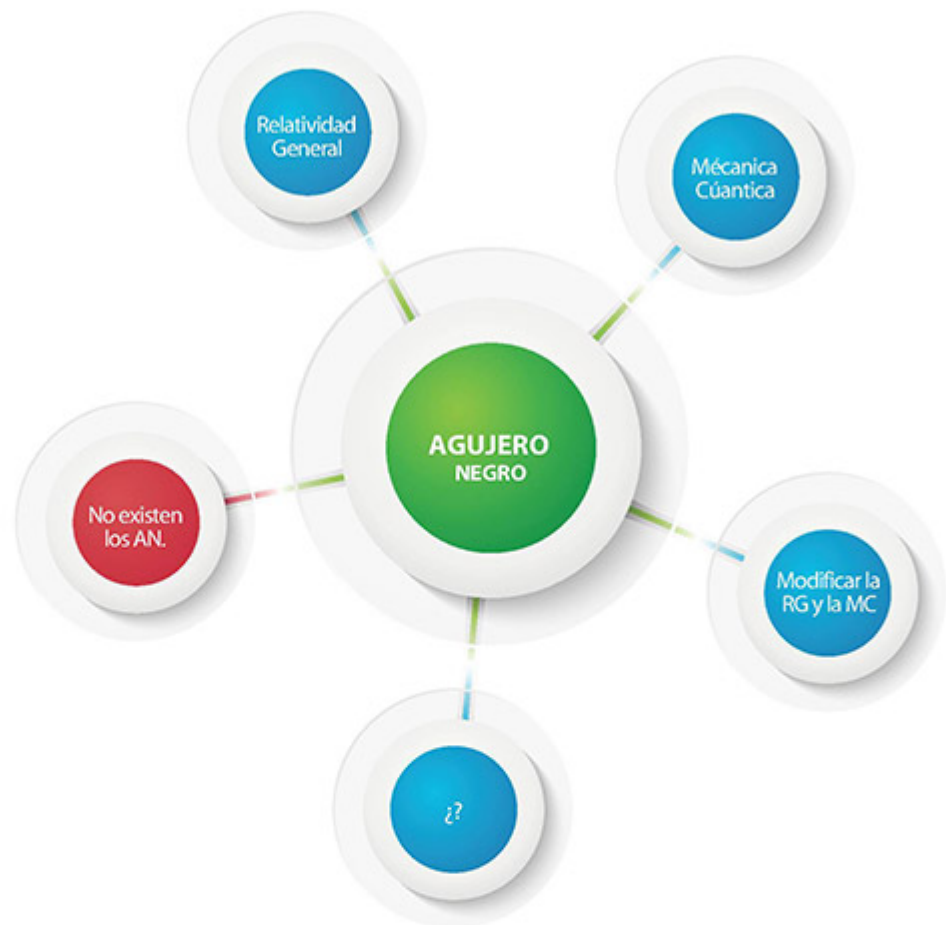
Empiezan los problemas...

El descubrimiento de Hawking inicia lo que podría decirse es el problema más grave para la física en los últimos 40 años: la información se pierde en un agujero negro. Supongamos que arrojamus un libro dentro de uno de ellos. Sabemos que es imposible recuperarlo pero, ¿es posible recuperar la información para reconstruirlo? La respuesta simple es no.

Un agujero negro actúa como un sistema termodinámico emitiendo radiación térmica, entonces, si esperamos el tiempo suficiente (¡para un agujero negro de la masa del Sol el tiempo de evaporación es de 2.1×10^{67} años!), podríamos recoger toda la radiación y examinarla; sin embargo, el problema es

FIGURA 4
POSIBILIDADES DE SOLUCIÓN
DEL PROBLEMA DE PÉRDIDA
DE INFORMACIÓN DEL
AGUJERO NEGRO.

POR UN LADO, PODEMOS MANTENER LA MECÁNICA CUÁNTICA Y LA RELATIVIDAD GENERAL DE MANERA INDEPENDIENTE. UNA SOLUCIÓN POSIBLE ES LA MODIFICACIÓN FUNDAMENTAL DE LAS DOS TEORÍAS DE MANERA QUE PUEDAN INTEGRARSE. EN EL CASO ???, NOS ENFRENTAREMOS A UNA TEORÍA TOTALMENTE NUEVA QUE RESUELVA EL PROBLEMA Y SE ENCUENTRE DE MANERA INDEPENDIENTE A LA RELATIVIDAD GENERAL Y LA MECÁNICA CUÁNTICA. POR ÚLTIMO, PODRÍA PASAR QUE LOS AGUJEROS NEGROS NO OCURRIEREN EN LA NATURALEZA, LO CUAL SERÍA UNA PÉRDIDA GIGANTESCA PARA LA FÍSICA POR EL RETO QUE REPRESENTA EXPLICARLOS.



que la radiación térmica es descrita por un estado mezclado. En últimas, partimos de un estado puro, el libro, y obtenemos un estado mezclado, la radiación Hawking. De manera simple, el agujero negro borra la información con la que sería posible reconstruir el libro y es imposible recuperarla. No importa qué lancemos al agujero negro, no importa cómo recojamos su radiación emitida, incluso si enviamos una sonda para que estudie qué pasa con la información en el interior del agujero negro, ésta nunca se comunicará con nosotros para informarnos lo sucedido. La situación generada por un agujero negro en la cual integramos la relatividad general y la mecánica cuántica genera una realidad que contradice las leyes físicas conocidas.

En la búsqueda de la solución de este problema se han encontrado evidencias convincentes de que es necesario desarrollar una teoría cuántica de la gravedad ⁽⁸⁾, lo cual quiere decir integrar totalmente la relatividad general y la mecánica cuántica sin inconsistencias internas. Esto nos llevaría a entender si la información se pierde o no, y en caso de que lo haga, cuál es el mecanismo físico que lo permite (Figura 4).

Aun así existen posiciones diferentes respecto a cómo desarrollar una teoría de este tipo, esto quiere decir, si es posible, qué teoría modificar y cuál mantener. Pueden encontrarse tres posiciones diferentes:

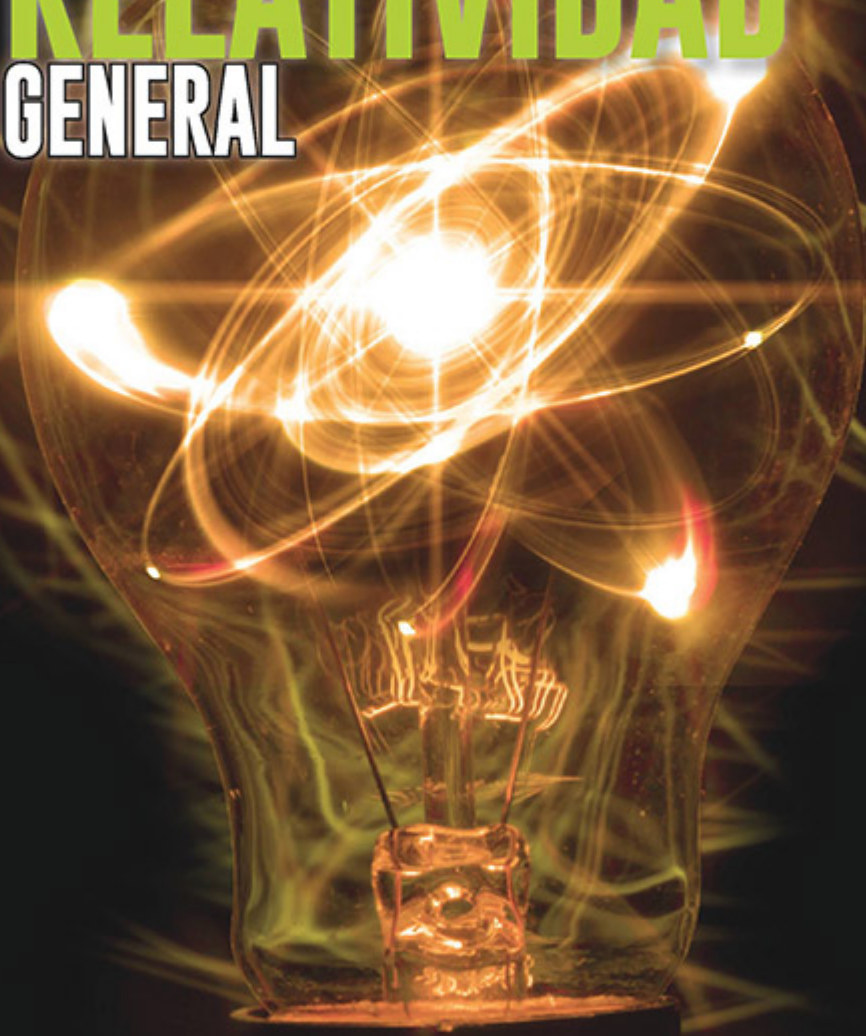
1. Mantener la mecánica cuántica: La relatividad general es tan solo otro fenómeno emergente y producto de las interacciones mecánico-cuánticas a nivel fundamental. En este contexto, la teoría de cuerdas es la línea de investigación más interesante hoy en día.
2. Mantener la relatividad general: Las ecuaciones de la mecánica cuántica deben ser modificadas en el contexto gravitacional. Sobre ésta existen investigaciones independientes que modifican la mecánica cuántica de manera que se acepte la evolución de estados puros a estados mezclados.
3. Modificar la mecánica cuántica y la relatividad general: Una línea promisorio pero extremadamente difícil debido a los problemas técnicos derivados de la descripción matemática de las dos teorías.
4. Los agujeros negros no existen: Es posible que las soluciones tipo agujero negro de las ecuaciones de Einstein sean espurias y físicamente imposibles.

Decir que la pérdida de información en los agujeros negros es un problema no resuelto puede sonar decepcionante, pero debe tenerse en cuenta que, gracias a él, hemos desarrollado un arsenal de conceptos físicos y matemáticos que nos han permitido ir más allá de la frontera de la investigación experimental actual; aún así no sabemos qué nos deparen futuros desarrollos en esta línea de investigación. La respuesta existe, tan solo no la hemos encontrado. Aún.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Schwarzschild K. (1916) *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften.; 7:189–196.
2. Fragmento de la comunicación de John Michell a Henry Cavendish.
3. Johnson MD et al. (2015) *Resolved magnetic-field structure and variability near the event horizon of Sagittarius A**. Science. 350: 1242–1245.
4. Bekenstein JD. (2003) *La información en el universo holográfico*. Investigación y Ciencia. 15: 38–45.
5. Bekenstein JD. (1973) *Black Holes and entropy*. Phys. Rev. D. 7:2333–2346.
6. Quantum History: History and Foundations of Quantum Physics. Disponible en: <http://quantum-history.mpiwg-berlin.mpg.de/main>
7. Hawking SW. (1974) *Black hole explosions?*. Nature. 248:30–31.
8. Einstein, A. (1916) *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*. Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin) Sitzungsberichte. 688.

PRUEBAS EXPERIMENTALES DE LA TEORÍA DE LA **RELATIVIDAD** GENERAL



NELSON VELANDIA, S.J., MSc.

CANDIDATO AL DOCTORADO DE FÍSICA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, BOGOTÁ

navelandia@javeriana.edu.co

RESUMEN

En este artículo se hace una síntesis de las pruebas experimentales más relevantes de la teoría de la relatividad general. Para tal fin, se ha dividido en dos grandes partes. La primera está relacionada con una simetría estática y simétrica; un espacio tiempo que caracteriza este tipo de geometría es la métrica de Schwarzschild. La segunda parte retoma un espacio tiempo estacionario y simétrico con respecto a su eje de rotación, llamado métrica de Kerr. Al final tomamos los resultados de un experimento de esta última década, llamado 'Gravity Probe B', que buscaba comprobar tanto el efecto geodésico, como el llamado "efecto de arrastre de Lense-Thirring". Dejamos planteado la comprobación de las ondas gravitacionales predichas por la Teoría de la relatividad general.

1. Introducción

El 25 de noviembre marca una fecha importante para la Teoría de la relatividad general. En este día Albert Einstein presentó su trabajo realizado entre 1905 y 1915. Desde los inicios, la Teoría de la relatividad general ha sido verificada con mucha precisión. El período más fructífero para estas pruebas se dio a inicios de los años 70 con estaciones espaciales de micro ondas, observaciones astronómicas de alta precisión y experimentos satelitales (1).

La mayoría de pruebas experimentales de la relatividad general están basadas en la métrica de Schwarzschild, es decir, en métricas estáticas y simétricas, en una región en la cual el radio es mayor a la relación entre la masa y la velocidad de la luz, llamada radio de Schwarzschild ($r > 2GM/c^2$). Estas pruebas tienen relación a trayectorias de partículas de prueba masivas y trayectorias de fotones. Las pruebas clásicas de la relatividad están el límite de campo débil, pero recientemente algunas observaciones han empezado a indagar en contextos de campo fuerte (2).

La presentación de algunas de las pruebas experimentales de la relatividad general está dividida en dos partes. La primera presenta tres pruebas con relación a la métrica de Schwarzschild, la cual es una solución de las ecuaciones de Einstein del campo gravitatorio generado por una estrella o una masa

esférica. Normalmente esta métrica sólo representa una parte del espacio-tiempo con simetría esférica, así las pruebas parten de una métrica estática.

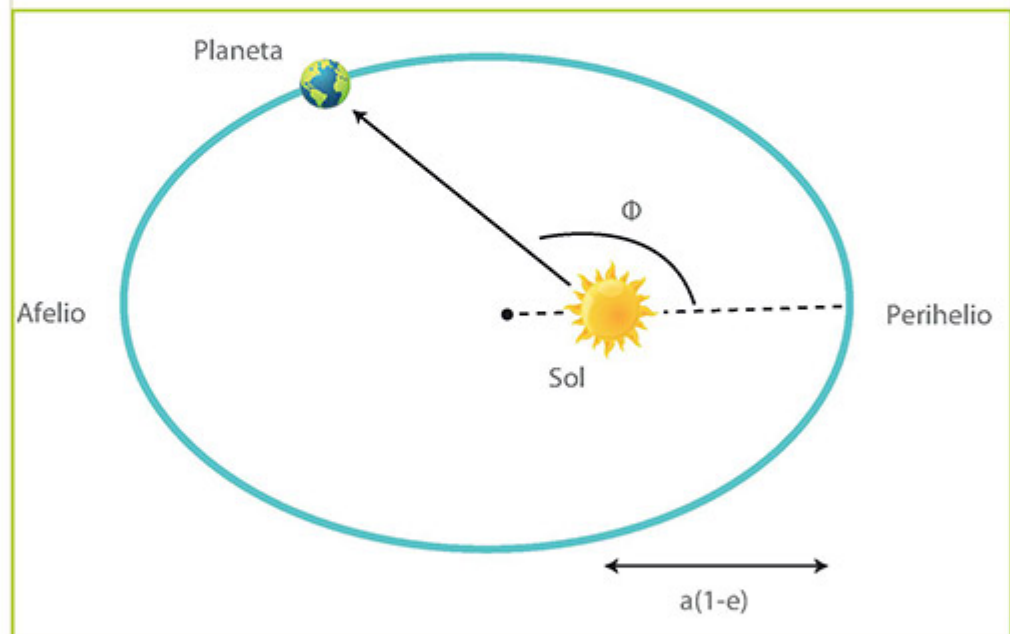
La segunda parte estudia dos pruebas experimentales con relación a una simetría tipo Kerr, es decir, una métrica estacionaria y simetría axial. Ésta describe la geometría del espacio tiempo alrededor de un cuerpo masivo en rotación. Este tipo de métricas se forman por el colapso gravitacional de una estrella masiva en rotación.

2. Primera parte: métrica estática y simetría esférica

PRECESIÓN DE LAS ÓRBITAS PLANETARIAS

En la mecánica newtoniana, la ecuación de movimiento para una órbita general no circular está dada por la ecuación de una geodésica (3). En el caso de una masa de prueba alrededor de una masa central, la solución a esta ecuación es una elipse, la cual incluye un parámetro (e) llamado excentricidad de la órbita. Nosotros podemos dibujar la órbita de un planeta alrededor del sol (Figura 1) y encontramos que la distancia más cercana entre el sol

FIGURA 1.
EL PLANETA SIGUE LA
TRAYECTORIA DE UNA ELIPSE,
DONDE EL SOL SE UBICA
EN EL FOCO Y EL PLANETA
BARRE UN ÁNGULO Φ ,
Y EL PLANETA ES LLAMADA
PERIHELIO, Y AFELIO LA MÁS
LEJANA (4).



Para la relatividad general, la ecuación de movimiento no solo incluye el aporte del momento angular sino características del campo gravitacional por donde orbita la masa de prueba. Al igual que en la mecánica newtoniana la solución a esta ecuación diferencial se trata de una elipse pero involucra una pequeña perturbación.

Al hallar la solución de la ecuación de movimiento que incluye la perturbación, se encuentra que la órbita es periódica pero cada ciclo es mayor que 2π . Este fenómeno hace que la órbita del planeta no sea cerrada sino que se dé un desfase y se hable entonces que la elipse tiene precesión (cambio de dirección en el espacio). Si en la ecuación se reemplaza por valores reales para el caso de la órbita de Mercurio, se encuentra que el corrimiento es de

$$\Delta\phi = 43'' \text{ por siglo (1)}$$

Para el caso de la Tierra, los resultados están muy acordes a lo predicho desde la relatividad general. Albert Einstein, en su artículo de 1915, resolvió uno de los mayores problemas de la mecánica celeste como es la pregunta por el corrimiento del perihelio para la órbita de Mercurio.

DESVIACIÓN DE LA LUZ

Un cuerpo masivo puede influir en la trayectoria de fotones cuando estos viajan cerca del cuerpo. Es sabido que en una métrica de Schwarzschild los fotones pueden recorrer una órbita circular de radio $r = 2GM/c^2$. Este fenómeno es difícil detectarlo directamente, pero

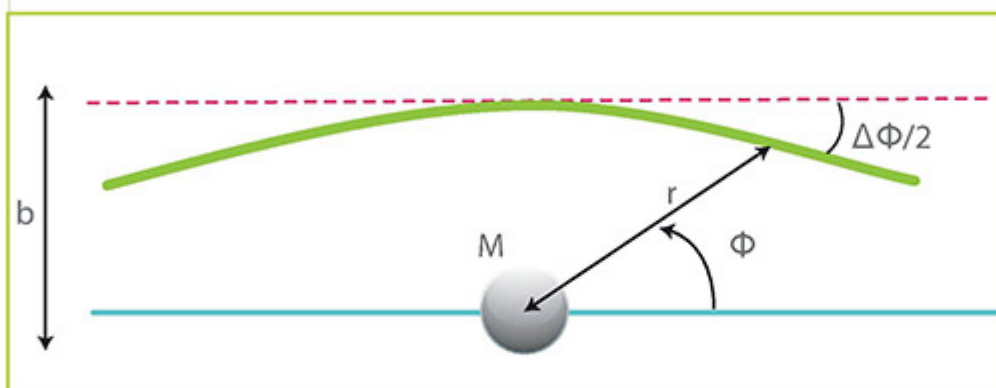


FIGURA 2.

cada vez se han ido afinando los experimentos para medir la desviación de la luz al paso de un campo gravitacional.

Al tener la ecuación para la trayectoria de un fotón en una geometría estática y simétrica, es decir, una geometría de Schwarzschild, y con ayuda de una pequeña perturbación, se puede calcular la pequeña deflexión cuando la partícula de prueba pasa cerca de un cuerpo masivo. Donde es el parámetro de impacto, dado por la distancia entre el centro del cuerpo masivo y el punto más cercano de la trayectoria del fotón (Figura 2).

Los valores encontrados en la expedición de 1919 liderada por Eddington para detectar la desviación de luz en un eclipse de sol fueron:

$$\Delta\phi = 1''.98 \pm 0''.16 \quad (2)$$

el cual está acorde con la teoría. Fue la primera verificación experimental de las predicciones hechas desde la teoría dada por Einstein. Esta misma experiencia se ha repetido con instrumentos más sofisticados y se han llegado a casi a resultados similares.

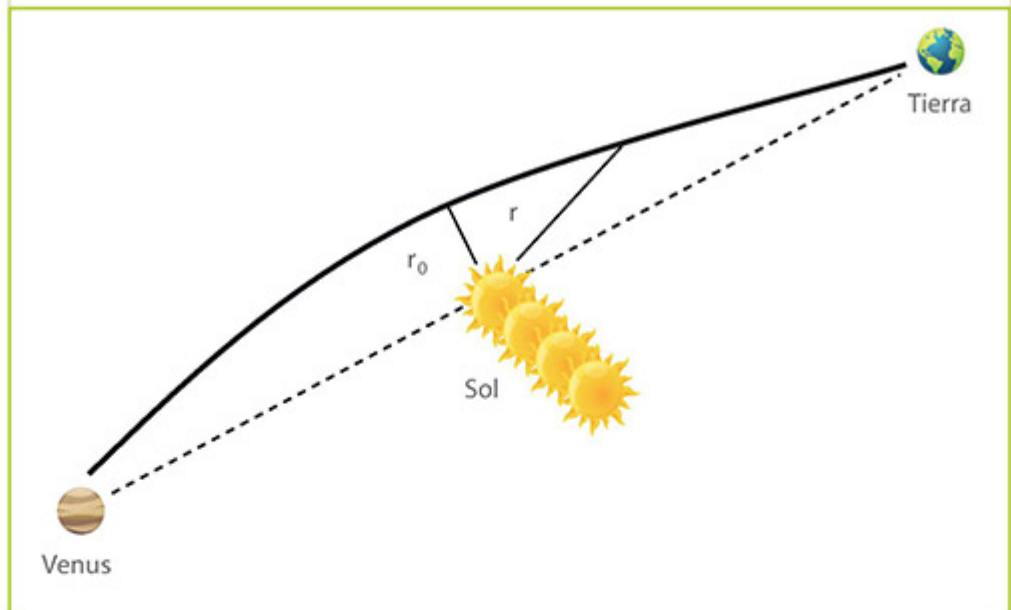
ECOS DE RADAR

Para esta tercera prueba experimental se considera el recorrido de un fotón saliendo de la Tierra hasta el planeta Venus, tal como se muestra en la Figura 3. Al pasar cerca del Sol, el recorrido se deflecta por el campo gravitacional. La expresión que se obtiene mide el tiempo de ida y de regreso del rayo; si fuera en línea recta, más un término adicional dado por la curvatura del recorrido (3).

Se lanza entonces un rayo de radar a Venus y se mide el tiempo coordinado de retraso sobre una línea recta. Por supuesto, los relojes en la Tierra no miden el tiempo coordinado sino el tiempo propio. En el caso de Venus, cuando este planeta está opuesto a La Tierra en el lado más lejano al Sol, la diferencia es

$$\Delta t = 220\mu s \quad (3)$$

FIGURA 3.



3. Segunda parte: métrica estacionaria y simetría axial

Para esta segunda parte se plantean dos experimentos en el contexto de una métrica estacionaria y simétrica con respecto al eje de giro, es decir, una métrica de Kerr.

PRECESIÓN GEODÉTICA O EFECTO GEODÉTICO

Se recurre ahora al experimento llamado "Gravity Probe B". Se colocó a orbitar un satélite alrededor de La Tierra a 640 Km de altitud en una órbita circular que pasaba por los dos polos. Además, el satélite contaba con una fuerza externa de manera que su eje de simetría apuntaba todo el tiempo a la estrella "IM Pegaso" (HR 8703) para asegurar que el eje se desplazaba de forma paralela a la órbita polar (5). Dentro del satélite se colocaron cuatro giróscopos de alta precisión, del tamaño de una bola de ping-pong, los cuales tenían sus ejes de rotación en cuatro direcciones diferentes para medir cualquier desvío del eje del momento angular de cada giróscopo. Se pretendía medir la precesión debida a la interacción del espín del giróscopo con su movimiento orbital alrededor del planeta. Este fenómeno es llamado "Efecto geodético" (4).

De acuerdo a las predicciones de la relatividad general, el giróscopo en un plano orbital debería tener un movimiento de precesión. La curvatura del espacio tiempo ejerce un torque en el giróscopo de tal forma que su eje no sigue una dirección vertical sino una especie de "cabeceo", en otras palabras, precesa más o menos 6,6 arcosegundos por año en el plano de la órbita del satélite. La imagen es la de un pequeño palillo que se mueve paralelo a su longitud en una órbita cerrada alrededor de La Tierra y, al retornar a su punto de origen, la dirección de este palillo se ha desplazado levemente (6).

SISTEMAS DE ARRASTRE

Se tiene una partícula de prueba alrededor de un cuerpo masivo rotante. Recibe este nombre porque la longitud característica es muy pequeña comparada con la distancia del centro de la masa rotante y un punto de la partícula. En este caso, la partícula de prueba está orbitando alrededor de la fuente central en el plano ecuatorial de la misma y experimenta un "arrastre" en su sistema inercial, llamado "Efecto de Lense-Thirring". Este desplazamiento en el espacio tiempo es muy pequeño para ser medido, pero dado a que es un fenómeno acumulativo se puede calcular después de que ha dado muchas vueltas la partícula alrededor de la masa central (7).

En la sección anterior se citó el experimento llamado “*Gravity Probe B*”. Con él no solo se quería comprobar los efectos de precesión sino también el arrastre que ejerce La Tierra sobre los giróscopos al interior del satélite, que experimentaron un arrastre de $37.2 \pm 7.2 \text{ marcsec}$ frente a 39.2 marcsec predicho por la teoría. Esta medida fue tomada en el lapso de un año que empleó el satélite alrededor del planeta en una órbita polar (8).

4. Conclusiones

La ciencia física tiene un componente tanto teórico como experimental, es decir, no bastan los modelos teóricos, hace falta la parte experimental. La relatividad general no es ajena a esta característica, así que es importante corroborar con la experiencia los planteamientos teóricos que hacía Albert Einstein hace 100 años. Los avances tecnológicos han permitido que muchos de ellos sean sometidos a la experimentación. En varios contextos de la astronomía se escucha que nuestro sistema solar es un buen laboratorio para comprobar las teorías científicas. La ciencia y la tecnología en sus avances con satélites e instrumentos de medición han permitido plantear experimentos imposibles de pensar hace unas décadas. Cada vez se logra más precisión en los instrumentos de medida y, sobre todo, unos buenos alcances en los experimentos. Satélites, interferómetros, laboratorios espaciales, entre otros, han dado buenos resultados para comprobar el componente teórico de la ciencia física y, en este caso, de la relatividad general.

Aún quedan partes por comprobar experimentalmente de la teoría general de la relatividad, entre otros la existencia de ondas gravitacionales. En las últimas décadas tanto la teoría como la experimentación han buscado salidas para resolver este fenómeno físico. Dados los avances tecnológicos cada vez más acelerados, en poco tiempo encontraremos una comprobación experimental para las ondas gravitacionales. Cada vez la ciencia está más cerca de seguir confirmando la genialidad de Albert Einstein quien, con poca tecnología, dio unos pasos agigantados en el campo de la teoría.

BIBLIOGRAFÍA

1. Turyshev S. (2009) Experimental test of general relativity: recent progress and future directions. *Physics-Uspekhi*. 52: p. 1-27.
2. Misner C, Thorne K, Wheeler JA. (2000) *Gravitation*. New York: WH Freeman and Company;.
3. Hobson MO, Efstathiou G, Lasenby AN. (2006) *General Relativity: An introduction for Physicists*. Cambridge: Cambridge University Press;.
4. Adler R, Silbergleit A. (2000) A General Treatment of Orbiting Gyroscope Precession. *Int. J. Theor.Phys.* p. 1291-1316.
5. Will C. (2003) Covariant calculation of general relativistic effects in an orbiting gyroscope experiment. *Phys. Rev D*. p. 062003.
6. Everitt CW, et al. (2011) Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity. *Phys. Rev. Lett.* p. 221101.
7. Vetö B. (2010) Gravity Probe B: experiment and gravitomagnetism. *Eur. J. Phys.* p. 1123-1130.
8. Mashhoon B, Gronwald F, Lichtenegger H. (2001) Gravitomagnetism and the Clock Effect. In Lämmerzahl C, Everitt F, Hehl F. In: *Gyros, Clocks, Interferometers. Testing Relativistic Gravity in Space*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg;. p. 83-108.



LA RELATIVIDAD: GEOMETRÍA Y ESPACIO-TIEMPO

ANDRÉS VARGAS DOMÍNGUEZ

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA, BOGOTÁ

qpro2o@gmail.com

RESUMEN

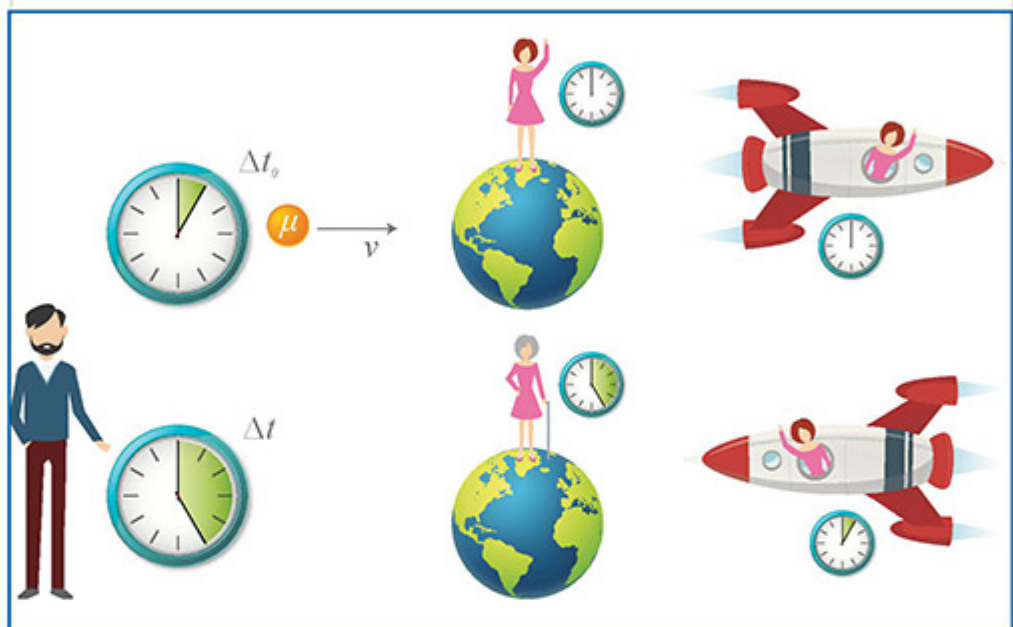
En noviembre de 2015 se cumplieron 100 años desde que Albert Einstein presentó, ante la Academia Prusiana de Ciencias, su trabajo sobre las ecuaciones de campo de la 'Teoría de la relatividad general'; con ellas, dio forma definitiva a su propuesta de una Teoría geométrica de la gravitación, que no sólo sustituyó a la Teoría de gravitación universal, de Isaac Newton, vigente desde finales del siglo XVII, sino que cambió radicalmente, y para siempre la forma en que entendemos el espacio y el tiempo. Para describir algunos de los aspectos físicos y matemáticos más importantes de esta teoría, repasamos brevemente la Teoría de la relatividad especial, pasando por un panorama geométrico que, a partir del quinto postulado de Euclides, motiva algunas nociones de geometría diferencial, como la curvatura, y, finalmente, introducimos las ideas básicas en las que se fundamenta la relatividad general.

En su famoso “año maravilloso” de 1905, Albert Einstein (1879-1955) propuso la Teoría de la relatividad especial o restringida (1) para resolver el problema que surge entre las nociones de espacio y tiempo absolutos de la mecánica clásica newtoniana, las cuales implican que la velocidad de la luz debe depender del estado de movimiento del observador; también dio respuesta a la conclusión contraria que resulta estar implícita en el otro gran pilar de la física clásica del siglo XIX, la Teoría electromagnética (2), formulada por James Clerk Maxwell (1831-1979). En su modelo relativista, Einstein introduce un cambio conceptual monumental en el que espacio y tiempo dejan de ser cantidades universales, absolutas e independientes para volverse dependientes del estado de movimiento de quien hace las mediciones. En otras palabras, una longitud o un intervalo de tiempo determinado ya no tienen el mismo valor para todos los observadores en un movimiento uniforme. De hecho, a medida que un observador cualquiera incrementa la velocidad a la que se desplaza, su reloj marcha más lentamente (dilatación del tiempo) y sus varas de medición se hacen más cortas (contracción de la longitud) en comparación con lo que ocurriría si se queda en reposo. Es posible probar rigurosamente que estos efectos son consecuencia de postular que debe ser la velocidad de la luz en el vacío (aproximadamente

300.000 km/s) la cantidad que permanece invariante para todos los observadores, tal como lo requiere la Teoría electromagnética; más aún, la velocidad de la luz se convierte precisamente en la velocidad límite de desplazamiento que ningún observador puede llegar a superar.

Experimentos posteriores han confirmado que, efectivamente, estos fenómenos contraintuitivos, como la dilatación temporal, ocurren, pero sólo son notorios para sistemas físicos cuya velocidad es extremadamente alta. Por ejemplo, la vida media de partículas elementales, como los muones ultraveloces, se prolonga considerablemente antes de decaer en otras partículas menos masivas a consecuencia de la llamada interacción nuclear débil. Esto ha sido observado en el anillo de almacenamiento de muones del laboratorio europeo CERN, en donde los muones alcanzan velocidades superiores al 99% de la velocidad de la luz (Figura 1).

FIGURA 1.
DIFERENCIA ENTRE EL
TRANSCURSO DEL TIEMPO
PARA UN OBSERVADOR
EN REPOSO Y OTRO EN
MOVIMIENTO.
PROLONGACIÓN DE LA VIDA
MEDIA DE MUONES
(IZQUIERDA) Y EL CONOCIDO
CASO DE LA PARADOJA DE
LOS GEMELOS (DERECHA)
(FUENTE: [HTTP://CNX.ORG/
CONTENTS/06555A80-
80D8-4829-9346-
07EA9391F391@5](http://cnx.org/contents/06555a80-80d8-4829-9346-07ea9391f391@5)).



La relatividad especial ha puesto en evidencia los límites de la física newtoniana y ha extendido la capacidad de predicción de la física a otros niveles no alcanzados anteriormente.

Puesto que, en general, los efectos relativistas sólo empiezan a tener relevancia a velocidades superiores al 10% de la velocidad de la luz (unos 30.000 km/s), en el ámbito mucho menos energético de nuestra vida cotidiana las predicciones de la mecánica clásica siguen siendo perfectamente válidas para todos los propósitos prácticos. Entonces, no es que la relatividad especial haya invalidado completamente la física newtoniana sino, más bien, ha manifestado sus límites y ha extendido la capacidad de predicción de la física a otros niveles no alcanzados anteriormente.

Sin embargo, la relatividad especial en sí misma presenta al menos dos inconvenientes importantes. El primero y más serio es que, al igual que la mecánica newtoniana, otorga un papel privilegiado a todo sistema que se mueva a velocidad constante, denominado en este contexto marco de referencia inercial. Pero si, de acuerdo a la relatividad, la noción misma de espacio pierde su inmutabilidad, el movimiento debe ser solamente una noción relativa entre dos o más sistemas independientes. Así, las nociones de reposo, movimiento uniforme y movimiento acelerado quedan sujetas al punto de vista de cada observador y la idea universal de marco inercial pierde sentido. Esto pone de manifiesto la necesidad

de formular las leyes de la física de modo que no dependan de un observador privilegiado. Más rigurosamente, se dice que las leyes físicas deben tener una forma covariante, es decir, su formulación debe expresarse de manera universal, pero los valores concretos de las cantidades que se miden dependerán del marco de referencia desde el que se hacen las observaciones. El segundo inconveniente de la relatividad especial es que no dice nada sobre la Teoría de gravitación universal (3) de Isaac Newton (1643-1727) y, concretamente, se vuelve conflictiva con la idea de una fuerza de gravedad entendida como una acción a distancia, de origen desconocido, que se propaga a una velocidad infinita.

Inconforme con esta situación, y a medida que las consideraciones mencionadas fueron cada vez más claras, Einstein concibió un nuevo punto de vista, todavía más fundamental, en el que la diferencia entre marcos inerciales y acelerados desaparece para identificarse, además, con los sistemas de referencia que se mueven en caída libre bajo la atracción gravitacional producida por cualquier distribución de materia. Como consecuencia, un observador aislado del exterior, en una cabina de una nave que se mueve aceleradamente con el mismo valor de la aceleración gravitacional terrestre, resulta ser incapaz de distinguir si su estado de movimiento es debido a la aceleración producida por los motores de su nave o porque ésta se encuentra en reposo sobre la Tierra (Figura 2).



FIGURA 2:
UN OBSERVADOR ENCERRADO EN UNA CABINA NO PUEDE DIFERENCIAR EXPERIMENTALMENTE SI SUS OBSERVACIONES SON PRODUCTO DE QUE SE MUEVE ACCELERADAMENTE O PROVIENEN DE QUE SE ENCUENTRA BAJO LA INFLUENCIA DE UN CAMPO GRAVITACIONAL.
(FUENTE: [HTTPS://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:ELEVATOR_GRAVITY.SVG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elevator_gravity.svg)).

Este es el punto de partida de la Teoría general de la relatividad, cuyo momento culminante se dio el 25 de noviembre de 1915 cuando Einstein presentó a la Academia Prusiana de Ciencias de Berlín el último (4) de una serie de trabajos que desarrollan su teoría y en el que finalmente postula, de forma ex-

plícita, las ecuaciones que determinan el comportamiento de un campo gravitacional convertido ahora en una cantidad puramente geométrica. Estas ecuaciones reciben el nombre de Ecuaciones de campo de Einstein y describen la relación existente entre la geometría de esta nueva concepción del espacio-tiempo y cualquier forma de materia o energía contenida en él que produzca efectos gravitatorios.

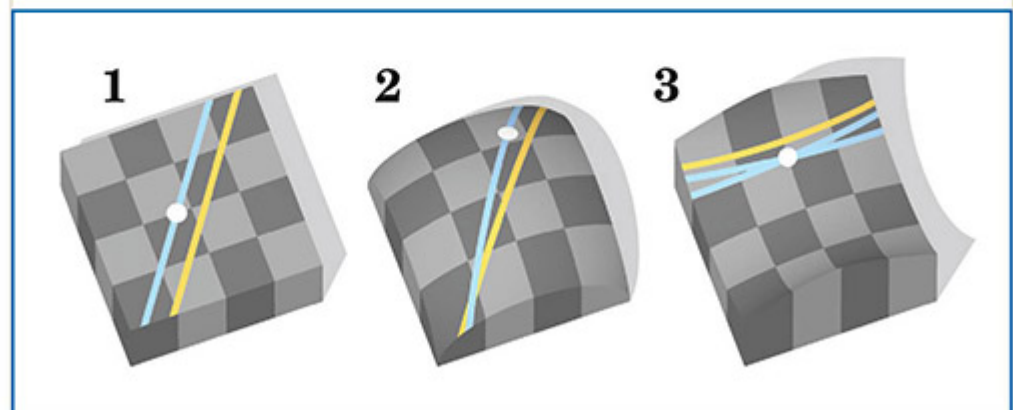
La novedad en la manera de entender el espacio-tiempo en la relatividad general radica en abandonar la idea de que se trata de un continuo estático e independiente, en el cual transcurren los fenómenos, para convertirlo en un concepto dinámico cuyas características son alteradas por la presencia de cualquier forma de energía, incluyendo materia y radiación. Es entonces por medio de estos cambios en la propia geometría del espacio-tiempo como se explica el origen de la atracción gravitacional que anteriormente era descrita por la teoría de gravitación newtoniana.

Como ha ocurrido desde que Newton enunció sus leyes de la mecánica, las matemáticas han sido una herramienta fundamental necesaria para la formulación precisa de las teorías físicas. Recíprocamente, las matemáticas puras se han inspirado constantemente en los fenómenos físicos para abstraer ideas y conceptos que son axiomatizados y originan nuevas áreas formales de estudio; curiosamente, en esta interrelación entre física y matemáticas, la geometría ha jugado un papel preponderante convirtiéndose en un puente natural por medio del cual desarrollos inicialmente independientes en ambos campos encuentran puntos de contacto. La geometría juega, por supuesto, un aspecto central en la comprensión de la Teoría de la relatividad, especialmente en su versión general, y, para hacer una mejor descripción de este aspecto, es necesario presentar un breve panorama geométrico e introducir algunos conceptos de lo que se conoce como geometría diferencial.

Desde la geometría clásica de los griegos, cuyos principios fueron plasmados por Euclides (cerca del año 300 a.c.) en su libro *Los Elementos*, y por prácticamente 20 siglos, el problema central de la geometría consistió en determinar si el famoso quinto postulado que Euclides propuso se podía deducir de los primeros cuatro. En conjunto, estos cinco axiomas determinan lo que hoy conocemos como geometría plana o, más exactamente, geometría euclidiana (aunque una formulación completa y moderna requiere en realidad más axiomas). Bajo la hipótesis de que los primeros cuatro postulados son válidos, el quinto puede enunciarse de varias formas equivalentes, entre las cuales las dos más conocidas son:

- “La suma de los ángulos internos de un triángulo es 180 grados”.
- “Por un punto exterior a una recta, pasa una única recta paralela a la primera”.

FIGURA 3:
ILUSTRACIÓN DEL QUINTO
POSTULADO DE EUCLIDES:
POR EL PUNTO BLANCO
EXTERIOR A LA RECTA
AMARILLA SE CUMPLE QUE,
EN EL CASO 1, EXISTE UNA
ÚNICA PARALELA (AZUL),
EN EL CASO 2 NO EXISTEN
PARALELAS Y, EN EL CASO 3,
EXISTEN MUCHAS.
(FUENTE:
[HTTPS://COMMONS.
WIKIMEDIA.ORG/WIKI/
FILE:PARALLEL_POSTULA-
TE_EN.SVG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Parallel_postulate_en.svg)).



Fue sólo hasta comienzos del siglo XIX con los trabajos de Nikolái Lobachevski (1792-1856) y János Bolyai (1802-1860), anticipados por trabajos no publicados de Carl Friedrich Gauss (1777-1865), que se hizo evidente la independencia entre el quinto postulado y los cuatro restantes. El obstáculo primordial

en la resolución de este problema consiste en la dificultad psicológica de separar los postulados geométricos de la intuición visual, condicionada por la geometría usual del plano (Figura 3); sin embargo, hoy nos queda muy fácil decir que la geometría puede también ser estudiada sobre la superficie de una esfera (cuya curvatura se dice positiva porque todo par de caminos sobre ella que se cruzan perpendicularmente en un punto se curvan hacia el mismo lado de un plano tangente a la superficie en ese punto) o sobre la de una silla de montar a caballo, llamada hiperboloide (que tiene curvatura negativa porque los caminos perpendiculares se curvan en direcciones opuestas del plano tangente) y, entonces, el quinto postulado pierde validez.

Es intuitivamente claro que, sobre estas superficies, habría que reemplazar las líneas rectas por las curvas que minimizan la distancia entre puntos y que reciben el nombre de geodésicas. Hecho esto, para el caso de la esfera, la suma de los ángulos internos de lo que correspondería a un triángulo resulta siempre mayor que 180 grados y, sobre el hiperboloide, resulta siempre menor (Figura 4).

Este tipo de geometrías existen también en dimensiones superiores, más allá del espacio tridimensional que conocemos, pero en ellas la intuición visual se pierde casi por completo

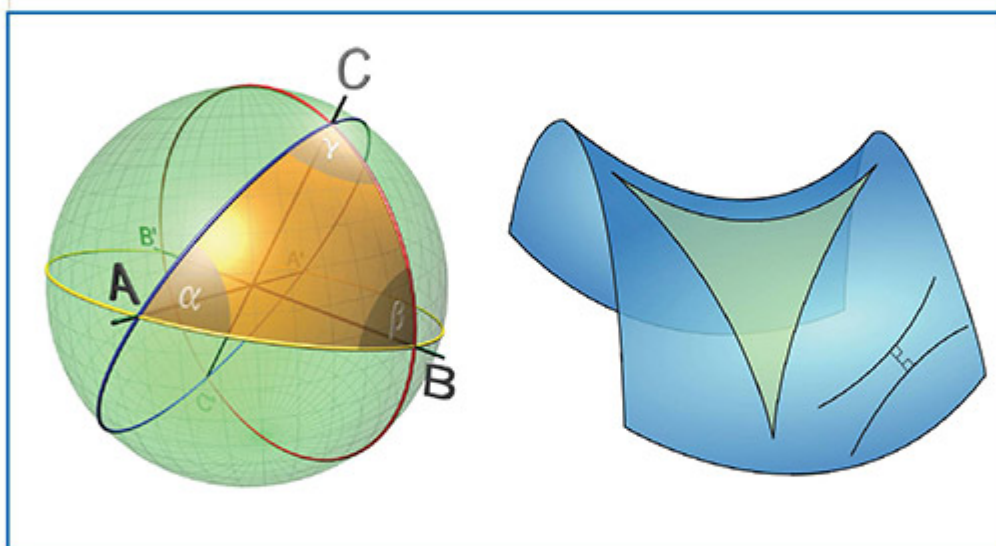
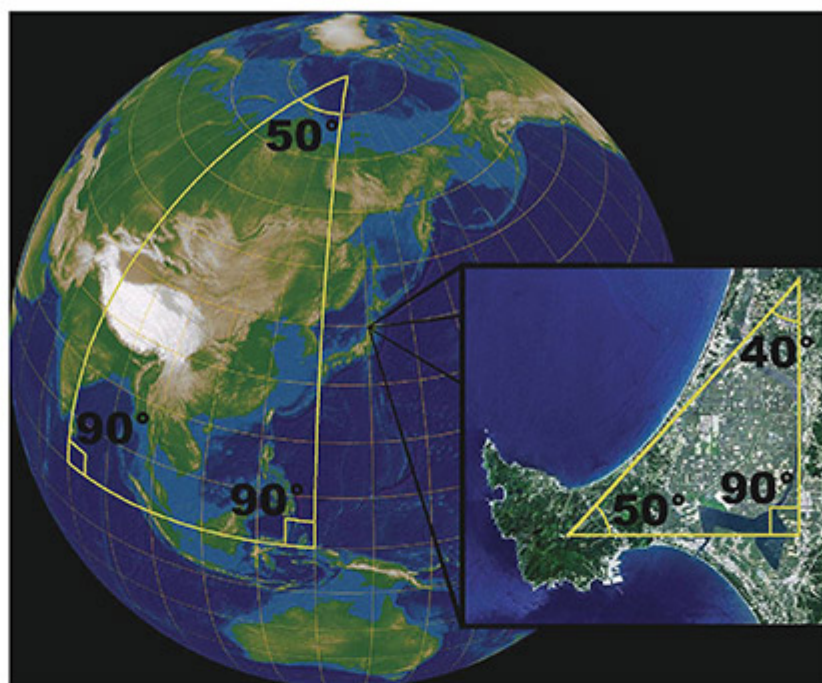


FIGURA 4: TRIÁNGULOS SOBRE LA ESFERA (IZQUIERDA) Y EL HIPERBOLOIDE (DERECHA). LOS LADOS DE LOS TRIÁNGULOS CORRESPONDEN A GEODÉSICAS SOBRE LAS SUPERFICIES; SOBRE LA ESFERA, LA SUMA DE ÁNGULOS INTERNOS EN EL TRIÁNGULO ES MAYOR A 180 GRADOS Y, SOBRE EL HIPERBOIDE, ES MENOR. EN AMBOS CASOS SE VIOLA EL QUINTO POSTULADO DE EUCLIDES (FUENTE: [HTTPS://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:SPHERICAL_TRIANGLE_3D_OPTI.PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spherical_triangle_3d_opti.png)).

y una formulación abstracta y matemáticamente rigurosa se vuelve indispensable. El área de la geometría encargada de estudiar estos aspectos, a partir de herramientas que generalizan las ideas que se enseñan en todo curso de cálculo diferencial, se conoce como geometría diferencial. En ella se estudian los aspectos geométricos de espacios en principio abstractos y multidimensionales, que comparten con las superficies la propiedad de que en toda región suficientemente pequeña la geometría satisface las propiedades de un espacio euclidiano estándar. Estos espacios se denominan variedades diferenciables y el ejemplo más claro corresponde a la superficie de nuestro propio planeta: vivimos en la superficie de una esfera, pero a una escala muy pequeña, como la humana, podemos suponer que la tierra es plana. Por ello, sobre el mapa de una ciudad, los cinco axiomas de la geometría plana resultan válidos (Figura 5).

Existe adicionalmente un aspecto que, en el ejemplo de las superficies, viene dado intrínsecamente por el hecho de estar “sumergidas” en lo que podemos denominar el espacio ambiente tridimensional. Se trata de la medición de distancias sobre una superficie, puesto que la forma de hacerlo viene predeterminada por la manera como se miden distancias en el

FIGURA 5:
 SOBRE LA SUPERFICIE DE LA ESFERA TERRESTRE NO SE SATISFACE EL QUINTO POSTULADO DE LA GEOMETRÍA EUCLIDIANA, PERO EN REGIONES SUFICIENTEMENTE PEQUEÑAS, COMO A LA ESCALA DE UNA CIUDAD, EL QUINTO POSTULADO SE CUMPLE CON GRAN PRECISIÓN (FUENTE: [HTTPS://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:TRIANGLES_\(SPHERICAL_GEOMETRY\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triangles_(Spherical_Geometry).jpg)).



espacio ambiente. Pero en ejemplos más abstractos, en donde no existe ningún espacio ambiente preestablecido, la manera de medir distancias hay que especificarla explícitamente. Esto se hace por medio de lo que se conoce como una métrica. En términos más físicos, la métrica permite asignar una magnitud a la velocidad con que se recorren trayectorias en estos espacios: así, para calcular la longitud de una trayectoria, basta entonces calcular el espacio recorrido, que corresponde a “integrar” esta velocidad como función del tiempo. Entonces, es natural decir que la distancia entre dos puntos se determina por la longitud de la trayectoria más corta entre ellos, y éstas corresponden precisamente a las curvas que denominamos geodésicas.

El estudio geométrico de las variedades diferenciables para las cuales se especifica la manera de medir distancias por una métrica, se conoce como geometría riemanniana en honor a Bernhard Riemann (1826-1866)

El estudio geométrico de las variedades diferenciables para las cuales se especifica la manera de medir distancias por una métrica en el sentido arriba mencionado, se conoce como geometría riemanniana en honor a Bernhard Riemann (1826-1866), quien expuso las bases de este punto de vista en 1854 como parte de su trabajo de habilitación (5). Como en los casos de

la esfera o el hiperboloide mencionados anteriormente, la característica geométrica más sobresaliente de las variedades riemannianas es su curvatura. Pero definirla rigurosamente para variedades de mayor dimensión resulta más complicado, principalmente porque, asociado a cada par de dimensiones independientes que se puedan escoger dentro del espacio en cuestión, existe un valor asociado que se comporta como la curvatura de las superficies; al final, toda esta información queda almacenada en un objeto matemático conocido como el tensor de curvatura de Riemann y su gran complejidad es todavía tema de investigación en esta área.

Finalmente, para esclarecer la conexión con la relatividad, hay que decir que, a diferencia de la distancia geométrica usada en el espacio euclidiano, la relatividad especial se puede

formular geométricamente usando una noción de distancia un poco diferente que involucra tanto la distancia espacial como el intervalo temporal entre dos eventos que tienen lugar en el espacio-tiempo estático de esa teoría. Esta distancia se denomina el “intervalo relativista” entre los eventos involucrados y codifica, de cierta manera, la información física relevante para describir la situación. Un espacio-tiempo de cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal) dotado de esta noción de distancia se conoce también como espacio de Minkowski, a partir del aporte de Hermann Minkowski (1864-1909), quien presentó esta formulación geométrica de la relatividad especial (6). La geometría del espacio de Minkowski comparte con la geometría euclidiana el hecho de que la manera como se determina la magnitud de los vectores en cualquier punto del espacio-tiempo es la misma. En este sentido, todo punto es geométricamente equivalente a cualquier otro y ello significa, en otros términos, que el espacio-tiempo de la relatividad especial no tiene curvatura (como tampoco la tiene el espacio euclidiano) y, por ello, se dice también que es plano (Figura 6).

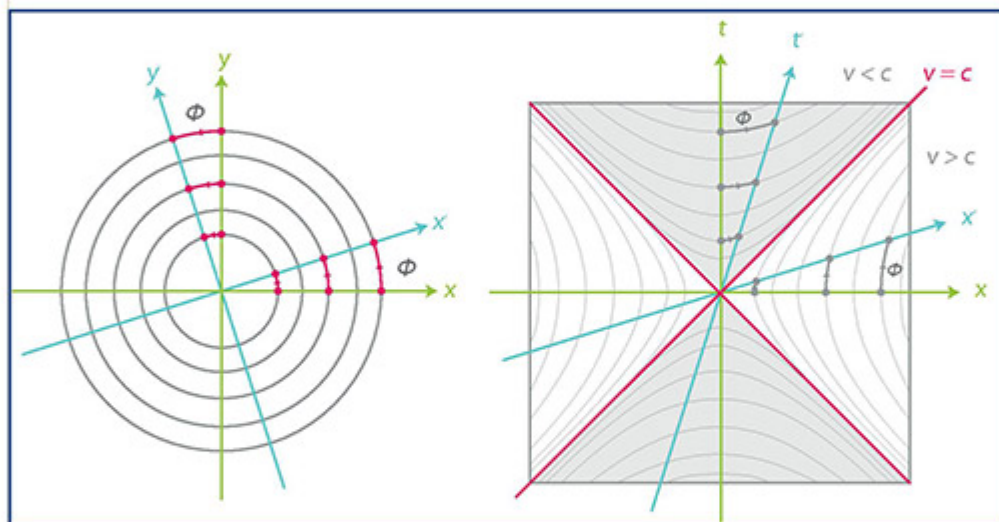


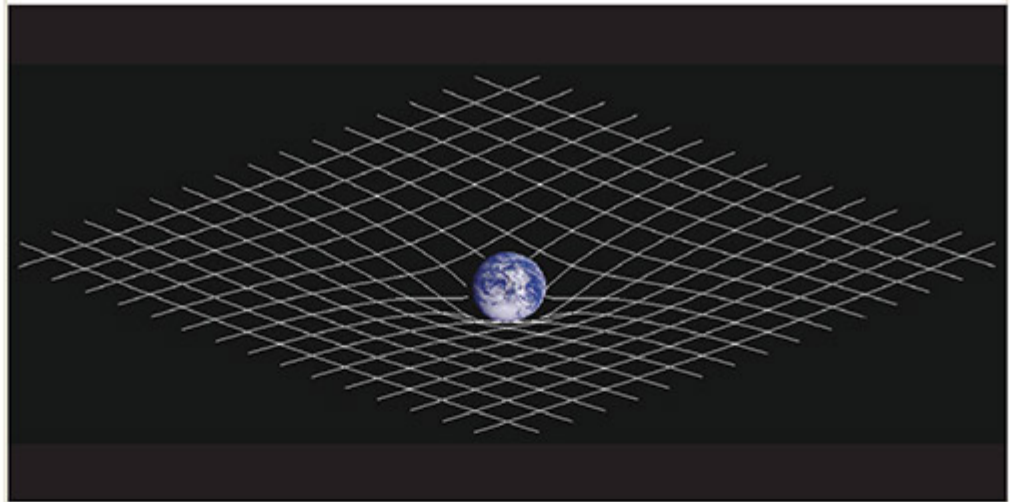
FIGURA 6:
COMPARACIÓN ENTRE UNA
ROTACIÓN EN EL PLANO
EUCLIDIANO (IZQUIERDA) Y EN
EL ESPACIO DE MINKOWSKI
BIDIMENSIONAL (DERECHA).

El último paso para llegar a la relatividad general consiste, como ya se mencionó, en suponer que el espacio-tiempo físico ya no es estático sino que interactúa con la materia y energía que contiene. Geométricamente, esta interacción se manifiesta en que el espacio-tiempo cuatridimensional se puede curvar de forma análoga a como se curva la superficie de una esfera, o de un hiperboloide, debido a la presencia de fuentes gravitacionales; de hecho, el campo gravitacional está ahora representado por la métrica del espacio-tiempo, que puede variar punto a punto según lo dicte la presencia de estas fuentes. La manera precisa en que cambia esta métrica está determinada por las Ecuaciones de campo de Einstein y ello explica su importancia. En palabras de Einstein, que se han vuelto casi un cliché, “la materia le dicta al espacio cómo curvarse y el espacio le dicta a la materia cómo moverse”. Siendo más rigurosos, habría que cambiar la palabra espacio por espacio-tiempo y, además de materia, incluir otras formas de energía, como la radiación, que también producen efectos gravitatorios, pero la idea básica es perfectamente clara.

La dificultad para imaginar la curvatura del espacio-tiempo está en que ahora no disponemos de un espacio ambiente que nos permita visualizarla, pero la popular analogía bidimensional da una idea de la situación (Figura 7). En la práctica, la curvatura de una región del espacio-tiempo sólo se puede determinar por sus efectos en el movimiento de los cuerpos que por allí transitan. Cuando no hay influencia de otras fuerzas externas, se dice que estos cuerpos están en caída libre y su trayectoria corresponde

FIGURA 7.

CURVATURA DEL ESPACIO-
TIEMPO (FUENTE: [HTTPS://
COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/
WIKI/FILE:SPACETIME_CURVA-
TURE.PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spacetime_curvature.png)).



precisamente a una geodésica sobre la variedad diferenciable de dimensión cuatro que podríamos llamar espacio-tiempo curvo; ahora, la medición de las distancias o intervalos relativistas viene determinada por una métrica que resulta ser la manera como se representa el campo gravitacional.

Sólo basta aclarar un punto importante en este contexto: en regiones suficientemente pequeñas no se satisfacen las propiedades de la geometría euclidiana sino las propiedades de la geometría de Minkowski. Puesto que, entonces, la métrica del espacio-tiempo no cumple exactamente las condiciones estándar de las métricas riemannianas, en su lugar se dice que es de tipo lorentziano, en honor de Hendrik A. Lorentz (1853-1928), quien estudió (7) las transformaciones de coordenadas espaciotemporales entre marcos inerciales que preservan las ecuaciones de Maxwell y que se volvieron parte esencial de la relatividad especial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Einstein, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik 1905, 17(10), 891-921
2. Maxwell, J.C. (1873) A Treatise on Electricity and Magnetism. Clarendon Press, Oxford.
3. Newton, I. (1687) Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica. London,.
4. Einstein, A. Die Feldgleichungen der Gravitation (1915). Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, , 844-847
5. Riemann, B. (1868) Über die Hypothesen welche der Geometrie zu Grunde liegen. Abhandlungen der Könische Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen., 13, 133-150
6. Minkowski, H. (1909) Raum und Zeit. Physikalische Zeitschrift.,10, 104-111
7. Lorentz, H.A. (1904) Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences. 6, 809-83

SUSCRÍBASE

Revista Educación y Cultura

32 años construyendo el movimiento pedagógico



- 1 año:** (6 revistas) \$65.000
- 2 años:** (12 revistas) \$125.000
- 3 años:** (18 revistas) \$180.000

CEID - FECODE

Calle 35 No. 14-55 Bogotá - Teléfono: (1) 2453925
Movil: 3155299515 - email: revistaeducacionycultura@fecode.edu.co

GEOMETRÍA DEL ACOPLAMIENTO ENTRE LA GRAVEDAD Y LA MATERIA



JORGE PLAZAS (DR.RER.NAT)

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

jorge.plazas@javeriana.edu.co

RESUMEN

El modelo de Connes-Chamseddine extiende las ideas de la relatividad general a un marco teórico en el cual no solo dan cuenta de la gravitación sino también de las otras fuerzas fundamentales de la física. En este documento exploramos algunas de las ideas centrales de la física moderna y vemos el papel que juegan en el desarrollo del modelo de Connes-Chamseddine, acoplando las cuatro fuerzas fundamentales dentro de un contexto puramente geométrico.

La física moderna y su formulación matemática

Toda actividad científica gira alrededor del entendimiento de ciertos fenómenos. En el caso de la física podríamos decir que su objetivo principal es entender el universo, esto visto como el entendimiento de sus partes constituyentes así como las leyes que rigen sus interacciones. Las revoluciones tecnológicas de finales del siglo XIX y principios del XX, junto con la comprensión de distintas estructuras matemáticas, acompañaron el desarrollo de las dos grandes teorías que conforman el núcleo de la física moderna: la mecánica cuántica y la relatividad general. La primera se basa en el principio de dualidad onda-partícula de los componentes subatómicos de la materia, su formalismo matemático utiliza el lenguaje del análisis funcional dentro del marco del álgebra de operadores; por su parte, la relatividad general se basa en el estudio de la geometría del espacio-tiempo y utiliza para su formulación matemática las herramientas de la geometría riemanniana. La mecánica cuántica explica procesos que tienen lugar a escalas sumamente pequeñas mientras que nuestras observaciones a escalas astronómicas son explicadas por la relatividad general.

Una pregunta fundamental al momento de conectar los experimentos con las teorías que buscan explicar los resultados obtenidos es la de la naturaleza de las cantidades observables. ¿A que

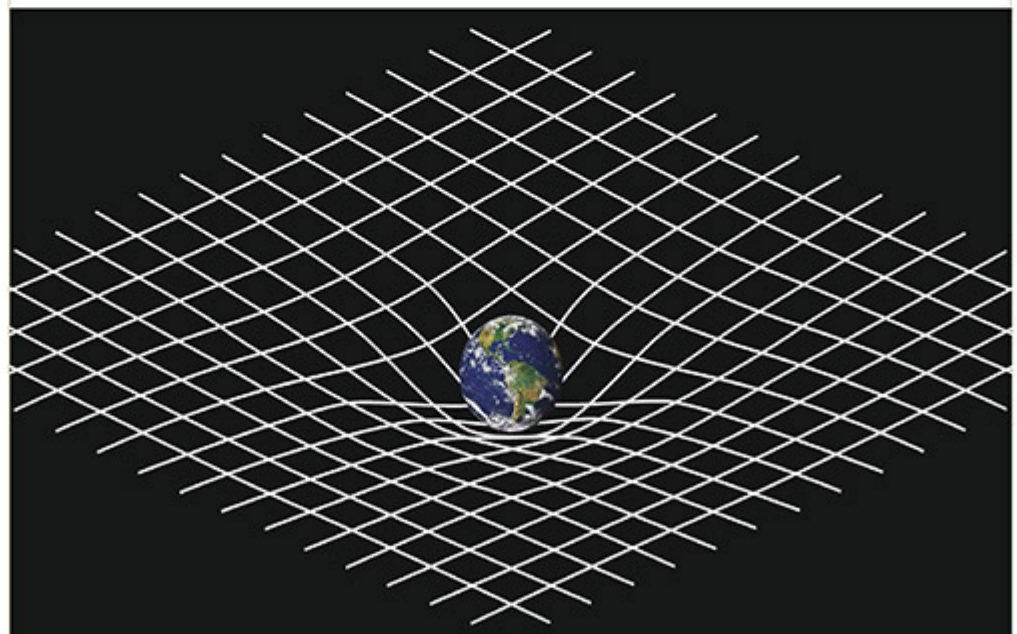
nos referimos? Si estamos estudiando una partícula en movimiento, su masa, energía y velocidad son cantidades observables. Si estamos estudiando un gas, su temperatura y presión son cantidades observables. En el caso de una estrella, su posición relativa al eje que une al sol con el centro de nuestra galaxia es una cantidad observable. En todos estos casos nos damos cuenta de que en nuestras observaciones se asignan valores numéricos o vectoriales, según el caso, al fenómeno que buscamos describir. Es posible pensar en dichos procesos de asignación como *funciones matemáticas*, y parte de la tarea de la física teórica es entender su naturaleza y los espacios sobre los cuales están definidas. Es decir, podemos preguntarnos cuál es la estructura subyacente al tipo de mediciones que estamos haciendo y así determinar qué tipo de objeto matemático nos da una mejor aproximación al fenómeno que buscamos entender.

En los párrafos que siguen describiremos algunas de las ideas centrales de la física moderna y exploraremos distintas lecciones que podemos aprender de sus formulaciones matemáticas.

Relatividad general y geometría

Las ideas de Einstein revolucionaron nuestra manera de entender los fenómenos asociados a la gravitación. De acuerdo a la Teoría general de la relatividad, la presencia de objetos masivos tiene como consecuencia que el espacio-tiempo se curve afectando de esta manera las trayectorias de otros objetos. La gravitación es, pues, un fenómeno de tipo geométrico y las cualidades geométricas del espacio-tiempo son cantidades dinámicas cuya evolución está determinada por

FIGURA 1.
CURVATURA DEL
ESPACIO-TIEMPO.
FIGURA TOMADA
DE LA NATIONAL
AERONAUTICS
AND SPACE
ADMINISTRATION
(NASA)
(VER:
[HTTP://ASD.GSFC.NASA.GOV/BLUESHIFT/INDEX.PHP/2015/11/25/100-YEARS-OF-GENERAL-RELATIVITY](http://asd.gsfc.nasa.gov/blueshift/index.php/2015/11/25/100-YEARS-OF-GENERAL-RELATIVITY)
Y
[HTTP://ASD.GSFC.NASA.GOV/BLUESHIFT/WP-CONTENT/UPLOADS/2015/11/SPACETIME_CURVATURE.PNG](http://asd.gsfc.nasa.gov/blueshift/wp-content/uploads/2015/11/SPACETIME_CURVATURE.PNG))



las leyes de la relatividad general. El espacio-tiempo es entendido como un espacio geométrico en el sentido de la geometría riemanniana, cuya curvatura es la variable dinámica de interés, es decir, la cantidad observable que buscamos entender.

Las ecuaciones que deben satisfacer la curvatura del espacio-tiempo pueden ser deducidas a partir de un principio de acción, el cual generaliza el principio de mínima acción de la física elemental y juega un papel fundamental en muchas áreas de la física moderna. En él asociamos a cada posible configuración

de nuestro sistema, una cantidad que alcanza su mínimo en la solución o soluciones posibles del problema. Dicho funcional de acción es normalmente expresado en términos de una integral. En el caso de la relatividad general, el funcional de acción está dado por:

$$\frac{1}{2k} \int R \sqrt{-g} d^4x$$

Ecuación 1: Funcional de acción de Einstein-Hilbert. Este funcional toma su mínimo en las geometrías que describen el campo gravitatorio a partir de la curvatura del espacio tiempo.

Donde k es una constante, R es la curvatura del espacio-tiempo, g su métrica y el diferencial d^4x denota el volumen infinitesimal del espacio-tiempo. Es decir, vemos la curvatura en cada punto del espacio-tiempo como una función sobre este espacio geométrico y consideramos su valor promedio, expresado como una integral debidamente normalizada, como la acción correspondiente. Las soluciones a las ecuaciones de Einstein estarán dadas por las geometrías para las cuales el valor de esta acción alcance su mínimo. Para un tratamiento completo de la derivación de estas ecuaciones referimos al lector a texto estándar (1), cf. artículo de Andrés Vargas en este volumen.

La fuerza de gravedad, descrita por la relatividad general, es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la física junto a la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil. El término fuerza fundamental se refiere al hecho de que los procesos descritos mediante teorías físicas conocidas pueden, en todos los casos, ser entendidos como consecuencia de los cuatro tipos de interacciones correspondientes a estas fuerzas.

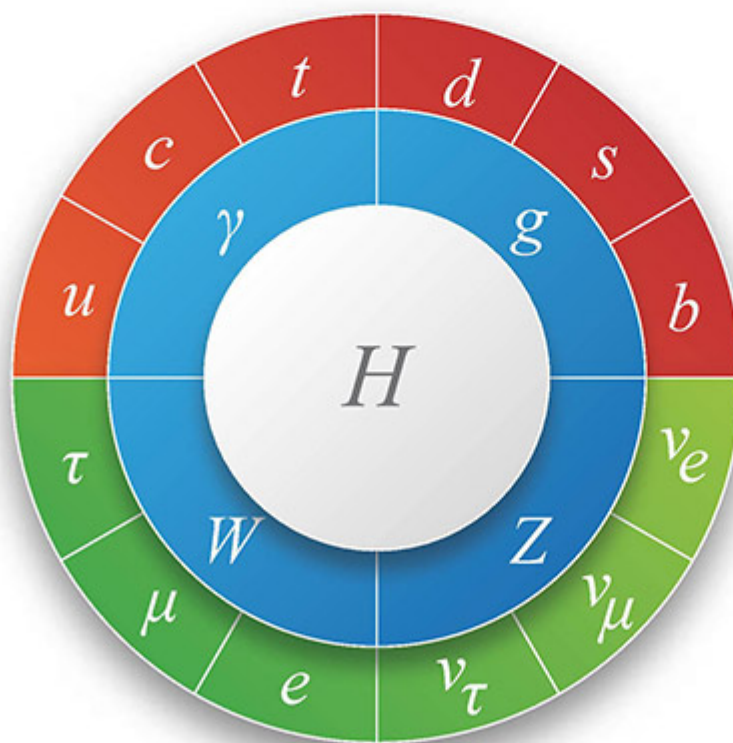


FIGURA 2.
DIAGRAMA DE LAS
PARTÍCULAS FUNDAMENTALES
DEL MODELO ESTÁNDAR.
GRÁFICA DE WALTER MURCH
PARA LA PELÍCULA PARTICLE
FEVER (VER: [HTTP://PARTICLEFEVER.COM/](http://particlefever.com/))

Partículas elementales y campos

Las partículas subatómicas se mueven en un régimen de velocidades comparables a la velocidad de la luz, así que es necesario tener en cuenta varios efectos relativistas en el momento de describir su comportamiento dinámico. La mecánica cuántica evolucionó durante el siglo XX en esta dirección dando lugar a la teoría conocida como cuántica de campos. Su descripción de las fuerzas electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil conforman lo que hoy conocemos como el modelo estándar de la física de partículas, en el cual las interacciones entre partículas elementales dadas por las tres fuerzas mencionadas corresponden al intercambio de otras partículas elementales. Así, por ejemplo, la interacción electromagnética que experimentan las partículas con carga eléctrica está mediada por el intercambio de fotones entre ellas.

Las partículas del modelo estándar pueden ser divididas en varios grupos según sus características: 6 quarks (los protones y neutrones en el núcleo atómico están, cada uno, constituido por tres partículas de este tipo), 6 leptones (entre estos, el electrón), 4 bosones de acoplamiento (partículas que median interacciones, como el fotón) y el recientemente descubierto *bosón de Higgs*, cuya existencia había sido predicha por el modelo estándar siendo necesario para su consistencia. El lector interesado en el modelo estándar puede consultar los varios recursos del *Particle Data Group* (2).

En la formulación matemática del modelo estándar, las partículas elementales corresponden a campos; matemáticamente, un campo es una función con valores vectoriales. La dinámica de los campos en el modelo estándar es determinada por un principio de acción. Al igual que en el caso de la gravitación,

el funcional de acción correspondiente puede ser descrito en términos de una integral, sin embargo, en este caso, el integrando es mucho más complicado: (Ver Ecuación 2, página opuesta)

Es posible que la primera reacción del lector al ver esta ecuación sea la de pasar la página tan rápido como sea posible. Si tenemos en cuenta que esta ecuación describe tres de las cuatro fuerzas responsables de cuantos fenómenos observamos en la naturaleza, es natural esperar tal complejidad. En los párrafos que siguen veremos, sin embargo, que utilizando un principio geométrico adecuado es posible encapsular la información contenida en la *ecuación 2* en una de la misma naturaleza que la *ecuación 1*. En

La fuerza de gravedad, descrita por la relatividad general, es una de las cuatro fuerzas fundamentales de la física junto a la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil.

el modelo del espacio-tiempo de Alain Connes y Ali Chamseddine, nuestro espacio subyacente es un nuevo tipo de espacio geométrico conocido como *un espacio no conmutativo*. El paso de la geometría clásica a la geometría no conmutativa nos permitirá entender el modelo estándar como parte de la gravedad.

Acoplando gravedad y materia

Dado que tres de las cuatro fuerzas fundamentales pueden ser unificadas en un mismo marco teórico, es natural preguntarse si es posible desarrollar una teoría que unifique la relatividad general con el modelo estándar. La mayor parte de los esfuerzos teóricos en esta dirección han estado dirigidos a desarrollar una teoría cuántica de la gravedad, y podemos resaltar aquí la teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de lazos y la teoría de twistors. Otro camino posible, sin embargo, es el de entender el modelo estándar acoplado con la fuerza de gravitación como una teoría geométrica sobre un espacio adecuado.

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \\
& \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \\
& \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2} m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \\
& \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
& i g c_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - i g s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\
& A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + \\
& g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
& g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2 A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g \alpha [H^3 + H \phi^0 \phi^0 + \\
& 2H \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + \\
& 2(\phi^0)^2 H^2] - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2} i g [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
& W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2} g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
& \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
& i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
& i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w^2} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} i g^2 \frac{s_w^2}{c_w^2} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \\
& \frac{1}{2} i g^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma^\partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\partial + \\
& m_d^\lambda) d_j^\lambda + i g s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \frac{i g}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
& \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \\
& \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda k} d_j^k)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
& \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^k C_{\lambda k}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^k}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \\
& \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^k}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_\lambda^k (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \gamma^5) d_j^k) + \\
& m_\lambda^k (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_j^k)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^k (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^k) - m_\lambda^k (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 - \\
& \gamma^5) u_j^k)] - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^k}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^k}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^k}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
& \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^k}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \\
& \bar{Y} \partial^2 Y + i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + \\
& i g c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + \\
& i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ H + \\
& \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \\
& \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + i g M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} i g M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
\end{aligned}$$

Ecuación 2: Integrando del funcional de acción del modelo estándar de la física de partículas.

El mínimo de este funcional describe las interacciones entre las partículas elementales correspondientes a la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil.

FOTO 1
EL MATEMÁTICO FRANCÉS
ALAIN CONNES DANDO UNA
CHARLA SOBRE EL TRABAJO
DE ÉVARISTE GALOIS Y NIELS
HENRIK ABEL.
IMAGEN DEL ABEL
SYMPOSIUM DE 2004
EN OSLO
(VER: [HTTP://ABELSYMPO-
SIUM.NO](http://abelsymposium.no)).



FOTO 2
EL FÍSICO LIBANÉS ALI
CHAMSEDDINE DURANTE
SU VISITA AL HAUSDORFF
RESEARCH INSTITUTE FOR
MATHEMATICS, EN BONN, EN
2014 (VER: [HTTPS://WWW.
HIM.UNI-BONN.DE/](https://www.him.uni-bonn.de/)).



Dicho enfoque comenzó a ser desarrollado durante los años 90 por Alain Connes y Ali Chamseddine (3), quienes, junto con Matilde Marcolli (4) y Walter van Suijlekom (5), han dado grandes aportes en esta dirección. Para entender el modelo estándar como gravedad dentro de una teoría geométrica es necesario extender las ideas de la geometría riemanniana a un contexto más amplio, conocido con el nombre de geometría no conmutativa. Antes de entender qué queremos decir con un espacio no conmutativo, es conveniente revisar de nuevo algunas de las ideas fundamentales de la mecánica cuántica.

De la mecánica cuántica a la geometría no conmutativa

Una de las lecciones principales de la mecánica cuántica está dada por el hecho de que el proceso de medir una cantidad afecta el valor que ésta y otras puedan tomar en mediciones posteriores; así, por ejemplo, si medimos la posición de una partícula y luego su velocidad, los resultados no serán necesariamente los mismos que obtendríamos si midiéramos primero su velocidad y luego su posición. A diferencia de las cantidades numéricas usuales, los objetos matemáticos con los cuales representamos observables en mecánica cuántica no conmutan. Dichos objetos, conocidos como operadores, generalizan las matrices del álgebra lineal elemental. Si representamos la posición de una partícula por un operador Q y su momento (masa por velocidad) por uno P , obtenemos la relación $QP \neq PQ$, la cual es natural si pensamos en Q y P como matrices.

En el caso de una partícula clásica moviéndose sobre una línea recta con posición q y momento p , las observables relevantes son funciones sobre su espacio de fase, el cual es el espacio geométrico cuyas coordenadas locales están dadas por q y p . Al pasar a mecánica cuántica nos podemos preguntar cuál es el análogo del espacio de fase, es decir, cuál es el objeto geométrico para el cual los operadores Q y P juegan el papel de coordenadas.

La geometría no conmutativa extiende las construcciones y herramientas de la geometría riemanniana

a un contexto más amplio en el que los espacios geométricos admiten operadores como coordenadas. Podemos imaginar un espacio no conmutativo como un espacio geométrico en el cual, junto con las coordenadas usuales, coexisten otras coordenadas dadas por matrices y generalizaciones de estas (operadores).

La geometría no conmutativa se ha desarrollado a partir del trabajo del matemático francés Alain Connes, quien recibiera en la 1982 la medalla Fields por su trabajo sobre álgebras de operadores. Las herramientas resultantes enriquecen las posibilidades de la geometría y pueden aplicarse en distintos contextos que van de la teoría de números a la física de partículas (6).

El modelo de Connes-Chamseddine

En el caso del modelo estándar acoplado a la gravedad, el punto de partida es el análisis detallado de las simetrías de las cuatro interacciones fundamentales. Estas simetrías son bien conocidas y juegan un papel fundamental en física. Connes y Chamseddine estudian las posibles representaciones de este grupo en espacios vectoriales que admiten una acción de matrices cuyas propiedades son compatibles con la relatividad general desde un punto de vista geométrico. Como resultado, se obtiene una geometría no conmutativa finita F que juega un papel central en el modelo.

Las variedades riemannianas en geometría no conmutativa están representadas por tripletas espectrales, objetos matemáticos constituidos por un conjunto de operadores, un espacio sobre el cual actúan y un operador destacado que incorpora la información métrica. A cada tripleta espectral le corresponde un funcional de acción conocido como acción espectral. Si aplicamos la acción espectral a la tripleta correspondiente al espacio-tiempo, obtenemos el funcional de gravitación (*Ecuación 1*). Si, en cambio, tomamos la tripleta espectral correspondiente al producto del espacio-tiempo por la geometría finita F , obtenemos como resultado el funcional de acción del modelo estándar junto con el funcional de gravitación (*Ecuaciones 1 y 2* mínimamente acopladas). Es decir, la geometría no conmutativa nos permite entender las cuatro interacciones fundamentales como gravitación pura sobre un espacio-tiempo no conmutativo. Un vistazo a la *Ecuación 2* nos hará dar cuenta del valor teórico de un contexto geométrico lo suficientemente profundo como para condensar su información en una ecuación de la misma naturaleza que la *Ecuación 1*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A. Gravitation. Freeman & Co. (1973).
2. K.A. Olive et al. (Particle Data Group) (2015) The Review of Particle Physics Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014) and 2015 update. Disponible en: <http://pdg.lbl.gov/>
3. Chamseddine A.H., Connes A. (1996), Universal formula for noncommutative geometry actions: Unifications of gravity and the standard model. Phys. Rev. Lett. 77 4868-4871.
4. Chamseddine A.H., Connes A., Marcolli M. (2007), Gravity and the standard model with neutrino mixing. Adv. Theor. Math. Phys. 11, 991- 1089.
5. Chamseddine A.H., Connes A., van Suijlekom W.D. (2013), Inner fluctuations in noncommutative geometry without the first order condition. J. Geom. Phys. 73 222-234.
6. Connes A. (1994). Noncommutative Geometry. Academic Press, San Diego

LA CUARTA OLA: EL TSUNAMI DE LA AUTOMATIZACIÓN



JORGE IVÁN BONILLA LEÓN

jbonilla@tesseract.com.co

RESUMEN

Los nuevos avances en las tecnologías de la robótica y la inteligencia artificial harán innecesarios muchos empleos en el futuro próximo. Esta revolución de la automatización afectará la estructura socioeconómica de las sociedades humanas de una manera tanto o más poderosa como lo hiciera la Revolución Industrial, 250 años atrás. Las naciones que sepan aprovecharla serán las ricas del futuro. ¿Qué puede hacer Colombia para prepararse?

NOTTINGHAM, 1811. Los luditas –tejedores enfurecidos– marcharon a las fábricas para destruir los recién inventados telares mecánicos. La industrialización fue un proceso de destrucción creativa en el que la irrupción de la máquina de vapor hizo irrelevantes muchos oficios y forzó a sus practicantes a buscar nuevas ocupaciones. Fueron tiempos difíciles, de mucho sufrimiento.

En el libro clásico *La tercera ola* (1), Alvin Toffler describe cómo tres grandes épocas de cambio tecnológico alteraron radicalmente la estructura de las sociedades humanas. La primera tuvo lugar hace 10.000 años con la Revolución Agraria; la segunda, hace 200 años con la Revolución Industrial; y la tercera, hace 50 años con la Revolución Informática. (Figura 1)



FIGURA 1
ÉPOCAS DE CAMBIO TECNOLÓGICO QUE HAN ALTERADO RADICALMENTE LA ESTRUCTURA DE LA SOCIEDAD

Todo indica que esta cuarta ola que se avecina será un auténtico tsunami. La Revolución de la Automatización significará la desaparición de numerosas ocupaciones debido a la masificación de la robótica y la inteligencia artificial. Las sociedades que entiendan cómo remontar esta ola serán las ricas del futuro; las que no, enfrentarán un ciclo de pobreza de duración indefinida.

La obsolescencia tecnológica del *wetware*

Según un artículo de la Oxford Martin School, el 47% de los trabajos de hoy habrán sido automatizados para el año 2034. O lo que es lo mismo: en dos décadas, uno de cada dos trabajos actuales será realizado por una máquina (2). La mitad de la población económicamente activa se verá forzada a aprender nuevas habilidades y buscar otras ocupaciones o a depender de sus familias o de la beneficencia.

¿Cuáles trabajos están en mayor riesgo de reemplazo? Los que implican rutinas o series de acciones repetitivas, bien sean de índole física o cognitiva. Algunos ejemplos de tales tipos de trabajo son los desempeñados por telemarcaderistas, recepcionistas y cajeros de banco.

En el sector de *Business Process Outsourcing (BPO)* es predecible que el rol de los call centers sea sustancialmente modificado por los sistemas automatizados que combinan reconocimiento de voz con inteligencia artificial, tales como los asistentes digitales de los sistemas operativos móviles.

El transporte de carga y de pasajeros, a su vez, será impactado por las nuevas tecnologías de conducción automatizada. Freightliner y Mercedes-Benz ya demostraron sus camiones autónomos; Google, Uber y Tesla están trabajando en los carros que se conducen solos.

FIGURA 2.
TRABAJO QUE NO LOGRAN
SER IMPACTADOS POR
LAS MÁQUINAS



Los trabajos que están a salvo son los que requieren habilidades en las que, en el futuro previsible, los seres humanos seguirán superando a las máquinas de manera consistente. En concreto: 1) las labores creativas, incluyendo el emprendimiento y la investigación científica; 2) la interacción social, en particular la que requiere de inteligencia emocional y empatía; y 3) la destreza manual y movilidad física, sobre todo en entornos no estructurados (aquellos diferentes a, por ejemplo, las líneas de montaje de automóviles). Algunos ejemplos son los fisioterapeutas, enfermeros y trabajadores sociales. (Figura 2)

La BBC desarrolló un aplicativo en el que las personas pueden seleccionar el trabajo que desempeñan y consultar qué tan expuestas están al riesgo de automatización (3). La lista comprende 365 ocupaciones, inicia con “vendedor por vía telefónica”, con un alarmante 99% de riesgo de reemplazo, y finaliza con “gerente de hotel”, con un 0,4% de riesgo.

¿Son únicamente los trabajos poco calificados los que están en riesgo de reemplazo? Definitivamente no. En algunas firmas de abogados la tecnología de “codificación predictiva” ya está automatizando la tediosa labor de revisión documental. El supercomputador Watson, fabricado por IBM, está brindando consejo a una docena de hospitales acerca del mejor tratamiento para casos específicos de cáncer. El software *Quill* es capaz de componer una narrativa simple a partir de data bruta (Forbes lo está usando para los reportes de ganancias corporativas y Associated Press para algunas notas deportivas).

¿Significa esto que en el mundo del futuro ya no va a haber abogados ni médicos ni periodistas? Eso no parece muy factible. Lo más probable es que las máquinas se encarguen de las labores tediosas y repetitivas, liberando el tiempo de estos profesionales para que puedan dedicarse a actividades de mayor valor agregado.

“Debemos empezar a pensar qué hacer cuando grandes grupos de la población no puedan trabajar sin que medie culpa alguna de su parte. Qué hacer en un futuro donde para la mayoría de los trabajos no se requieran humanos.”
Humans need not apply

¿Ser levantados por la ola o ser revolcados por ella?

El *skill-biased technical change*, SBTC o Reemplazo técnico influenciado por habilidades, es la teoría económica que establece que, a medida que la tecnología hace irrelevantes los trabajos poco calificados, se incrementa la demanda por trabajos altamente calificados (4). Cuando una puerta se cierra otra se abre, ¿verdad?

En la práctica, la economía digital ha demostrado ser menos intensiva en mano de obra que la economía tradicional. Para la muestra un botón: cuando Facebook adquirió Instagram por un valor de 1.000 millones de dólares, ésta última solamente daba empleo a 13 personas. Una empresa manufacturera que estuviera avaluada en ese monto tendría centenares de empleados.

Lo anterior es una demostración contemporánea del desempleo de origen tecnológico, concepto popularizado por Lord Keynes en la década de 1930. En palabras simples, la nueva economía no va a crear nuevos trabajos a la velocidad y en la cantidad suficientes como para reponer los que serán destruidos. La balanza laboral, entonces, dará saldo negativo.

*“Debemos empezar a pensar qué hacer cuando grandes grupos de la población no puedan trabajar sin que medie culpa alguna de su parte. Qué hacer en un futuro donde para la mayoría de los trabajos no se requieran humanos.” Esta es la conclusión del documental breve *Humans need not apply* (5).*

El destino no está escrito en piedra

En palabras del economista británico Sir Anthony Atkinson: “La trayectoria del progreso tecnológico no es inevitable, depende de las decisiones tomadas por los gobiernos, los consumidores y los negocios a medida que determinan cuáles tecnologías son investigadas y comercializadas y de qué manera deben ser utilizadas” (6).

Francisco Mojica, director del Centro de Pensamiento Estratégico y Prospectiva de la Universidad Externado de Colombia, explica que en el campo de los estudios de futuro existen dos escuelas diferentes. Según la norteamericana, el futuro se prevé (foresight). Un único futuro, hagamos lo que hagamos, necesariamente va a manifestarse.

Según la escuela francesa, en cambio, el futuro no se predice sino que se construye (prospectiva). Esta es la escuela de Michel Godet. Primero se determina una serie de “futuribles” (futuros posibles), después se escoge el que más conviene a nuestros intereses y se traza desde el presente todo lo que tiene que hacerse para que ese futuro específico, y no otro, sea el que se manifieste. Esta lógica conlleva una actitud proactiva, de decisión y compromiso con nuestro porvenir. *Debemos trabajar para que las cosas buenas nos pasen a nosotros.*

¿Qué puede hacer Colombia para prepararse?

El ideograma chino de “crisis” está compuesto por los símbolos de “peligro” y “oportunidad”. Si queremos aprovechar esta oportunidad, al decir del jugador de hockey Wayne Gretzky, debemos patinar no hacia donde está el disco sino hacia donde estará.

Debemos asegurar que la reforma educativa construya las capacidades que el mercado del futuro va a requerir. Que los niños que hoy ingresan a Preescolar tengan, dentro de 15 o 20 años, las competencias requeridas por la economía en ese momento.

Un primer paso evidente es la creación de una red de *think tanks* o centros de pensamiento dedicados a evaluar tanto las tecnologías emergentes como los modelos de negocios disruptivos y la manera en que Colombia puede sacar provecho de ellos. Esto serviría como un sistema de alerta temprana que le daría al sector productivo y a los entes reguladores una ventana de oportunidad para implementar ajustes antes de ser impactados.

Además de lo anterior, se deben implementar las siguientes tres estrategias:

1. EXPLOTAR LA VENTAJA HUMANA

También según Anthony Atkinson: “[Debemos] estimular la innovación [en la educación] de manera que incremente la empleabilidad de los trabajadores”. En el contexto de la Revolución de la Automatización, a lo que esto se refiere es a desarrollar habilidades en la población que no sean fácilmente replicables por los robots o por la inteligencia artificial, al menos en el mediano plazo previsible.

Debemos asegurar que la reforma educativa construya las capacidades que el mercado del futuro va a requerir. Que los niños que hoy ingresan a Preescolar tengan, dentro de 15 o 20 años, las competencias requeridas por la economía en ese momento. De esa forma se podrá prevenir la descoordinación de oferta y demanda que constituye la causa del desempleo.

También se deben desarrollar mejores técnicas de andragogía (enseñanza en adultos) para que quienes hace mucho tiempo no ingresan a las aulas puedan reinventarse a sí mismos y reciclarse en el mercado laboral. Con una población que cada vez vive más tiempo, es imperante dotarlos de las herramientas para mejorar su empleabilidad. Las nuevas tecnologías, curiosamente, pueden ser un gran aliado para esto. Generaron el problema, pero también pueden aportar la solución.

2. UN ESTADO QUE MUTA, SE ADAPTA Y EVOLUCIONA

Hay una decisión que debe tomarse: si resistir o abrazar el cambio tecnológico. Cualquier país que bloquee la innovación será dejado atrás por aquellas naciones que sí la adopten. Se tendería a creer que quienes escriben nuestras leyes tienen esto claro, pero la salida del país de Paypal, la complacencia con el boicot taxista de Uber y ahora la “Ley Netflix” dan testimonio de lo contrario.

Estas tres son decisiones de “pan para hoy, hambre para mañana”. En el corto plazo puede que beneficien a unas pocas empresas, pero en el largo plazo las hacen menos competitivas y empobrecen a la nación. Si se quiere que Colombia sea un protagonista y no un espectador del futuro, se debe contar con un Estado que se adapte ágilmente al cambio y que no ceda a la presión de los intereses económicos que pretenden bloquear la implementación de nuevas tecnologías o nuevos modelos de negocio.

Se necesita que quienes escriban las leyes estén versados en tecnología y sean visionarios que impulsen al sector productivo a adaptarse a la nueva economía. La Visión 2032, creada por la Comisión Nacional de Competitividad, debe ser cuidadosamente revisada a la luz de esta nueva información. También lo debe ser el Programa de Transformación Productiva y sus 20 Sectores de Talla Mundial.

Los gobiernos deben implementar las reformas antes de que sus ciudadanos se las pidan mediante protestas y disturbios. Los luditas del siglo XXI merecen que se les evite el sufrimiento innecesario. Es claro que en este momento la agenda del gobierno, y por ende sus recursos, se encuentran enfocados en la construcción de la paz. Pero *una paz duradera sólo será sostenible si podemos garantizar empleo de calidad para todos.*

3. COMBATIR EL FUEGO CON FUEGO

En la matriz DOFA-País de Colombia, a la amenaza del “desempleo de origen tecnológico” se debería oponer la fortaleza del “emprendimiento de base tecnológica”. Poner el mítico ingenio de nuestros coterráneos a trabajar por el bien de todos, de tal manera que esos robots sean fabricados dentro de nuestras fronteras y esos *softwares* sean escritos por manos colombianas.

A comienzos del año 2009, 63 compañías israelíes estaban cotizando en NASDAQ, la segunda bolsa de valores más grande del mundo. ¿Cómo pudo lograr eso un país de 60 años de historia y apenas 7 millones de habitantes? Esta pregunta fue lo que motivó a Dan Senor y a Saul Singer a escribir el libro *Startup Nation*. Este es el ejemplo que deberíamos seguir: convertir a Colombia en la *startup nation* latinoamericana.

Según el Plan Nacional de Desarrollo, para el 2018 se debe alcanzar la meta de invertir el 1% del PIB en Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación [ACTI], el 50% de ese monto aportado por el sector privado. Aunque encomiable, esa cifra no es suficiente. Recientemente, el Consejo Científico de la Secretaría General de las Naciones Unidas recomendó que, *para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, las naciones deberían invertir mínimo el 3,5% de su PIB en ACTI (7).*

En 1962, John F. Kennedy dio su famoso discurso “*We choose to go to the Moon*” en la Universidad de Rice. En él retó a los Estados Unidos a poner un hombre en la Luna antes de finalizar la década. La dimensión del desafío era intimidante y para muchos constituía un imposible. No obstante el país cumplió con el

reto, salió de ahí con su autoestima fortalecida y, en el proceso, desarrolló tecnologías que le permitieron a sus industrias tomarse el mundo.

¿Qué tal si acometiéramos el desafío de que antes de finalizar la próxima década (en el año 2025) estemos dedicando el 20% del PIB Colombiano a Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación? Una inversión semejante, adecuadamente utilizada, le permitiría a Colombia montarse en la cuarta ola y cosechar, para el disfrute de todos, los frutos de esta nueva economía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Toffler, A. (1980) *La tercera ola*. 1a. ed. Bogotá: Plaza y Janés.
2. Frey, C B, Osborne, M A. (2013) *The future of employment: how susceptible are jobs to computerization?* [Internet]. Oxford Martin School. Disponible en: http://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/The_Future_of_Employment.pdf
3. Stylianou N, Nurse T, Fletcher G, Fewster A, Bangay R, Walton J. (2015) *Will a robot take your job?* [Internet]. BBC News. Disponible en: <http://www.bbc.com/news/technology-34066941>
4. Violante, G L. (2008) *Skill-biased technical change*. The New Palgrave Dictionary of Economics. Segunda Edición. Eds. Durlauf S N y Blume L E. Palgrave Macmillan. Disponible en: http://www.dictionaryofeconomics.com/article?id=pde2008_S000493
5. Grey C G P. *Humans need not apply*. [Internet]. Youtube; 2014. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=7Pq-S557XQU>
6. Rotman D. (2015) *Who will own the robots?* [Internet]. MIT Technology Review. Disponible en: <http://www.technologyreview.com/featuredstory/538401/who-will-own-the-robots/>
7. Scientific Advisory Board of the Secretary-General of the United Nations. *Science, Technology and Innovation: Critical Means of Implementation for the SDGs*. [Internet]. 2015. Disponible en: http://en.unesco.org/un-sab/sites/un-sab/files/Final_SAB_PB_MOI.pdf

ACAC es una comunidad de personas, conformada por científicos, profesionales y estudiantes de todas las disciplinas interesadas y comprometidas con la ciencia como instrumento de transformación de Colombia.



Más información en:

www.acac.org.co/acac/asociate/ - asociados@acac.org.co

PBX: +57 (1) 432 0370



LIMITAR EL **CALENTAMIENTO** GLOBAL

GUNTER TRAPP, PH. D.

MIEMBRO FUNDADOR DEL CENTRO INTERNACIONAL
DE FÍSICA EN BOGOTÁ.

guntertrapp@hotmail.com

EL MUNDO NO SALDRÁ DE SU ACTUAL IMPASE
MIENTRAS NO CORRIJAMOS LAS IDEAS QUE LO CAUSARON.
Albert Einstein

RESUMEN

En base a sus experiencias, el hombre pronostica desarrollos futuros y toma previsiones. Predicciones de un crecimiento perpetuo como el de la economía y de la riqueza son ilusorias, ocultan el peligro de colapso e impiden la toma de previsiones acertadas como en el caso del calentamiento global.

La especie previsiva

El homo sapiens es la única especie que conscientemente toma previsiones para aprovechar futuras oportunidades y eludir futuros peligros. Pronósticos acertados han sido y siguen siendo esenciales para su sobrevivencia individual y colectiva. Se toman en base a experiencias previas, conectando causas con consecuencias, reconociendo cambios periódicos e identificando indicios claves para situaciones futuras. La experiencia acumulada durante una vida humana es la base de la sabiduría de los ancianos. La tradición oral y escrita de una sociedad amplía este marco temporal. Experiencias de culturas pasadas son accesibles mediante fuentes históricas y arqueológicas y extienden aún más el acervo de informaciones potencialmente útiles para previsiones acertadas. Los problemas surgen ante un pronóstico ambiguo como el de oráculos, profecías y horóscopos, cuando un falso optimismo nos inclina a dar excesivo crédito a la alternativa favorable; sucede lo mismo ante el pronóstico de una calamidad incontrolable que paralice toda toma de previsiones y ante pronósticos a corto plazo que conduzcan a previsiones perjudiciales a largo plazo.

Pronósticos para el comportamiento de sistemas sencillos como el planetario pueden ser muy exactos y así convertirse en predicciones, por ejemplo, de los eclipses de sol y luna. En cambio, para sistemas complejos como el clima, la economía o un ecosistema, carecen de esta exactitud y se limitan a probabilidades. El comportamiento de sistemas complejos depende de muchas variables conectadas en forma "no lineal" que le proporcionan cierta estabilidad y adaptabilidad, pero que también son



causa de comportamientos que desafían nuestra intuición. La comprensión de los sistemas complejos ha progresado mucho desde la segunda mitad del siglo XX gracias al mejor conocimiento de sus variables y a una mayor potencia computacional, capaz de simular su interacción. Hoy podemos modelar el desarrollo climático, demográfico y económico de acuerdo con las previsiones que tomemos. Podemos elaborar los respectivos escenarios con niveles de confianza muy superiores a los que proporciona nuestra intuición.

En un entorno estable durante generaciones, el hombre intuye la continuación de esta estabilidad, la considera “natural”. Interpreta cambios observados como eventos fortuitos o parte de ciclos repetitivos. La noción del progreso le es ajena. Fue esta su situación durante el Paleolítico superior, que abarcó el 99,9 % de la existencia humana, cuando adaptaciones genéticas y/o culturales resultaron demasiado lentas para ser reconocidas por sus protagonistas; por el contrario, en un entorno de rápidos y frecuentes cambios, estos se consideran “naturales” y se intuye su continuación. Es esta la situación del hombre contemporáneo (en el mundo desarrollado), resultado de un acelerado desarrollo tecnológico que le exige su continua adaptación al entorno cambiante. Un cambio crucial se inició con el invento de la máquina de vapor, capaz de convertir en trabajo útil la energía del carbón (y otros combustibles fósiles) disponible en enormes cantidades. Este invento liberó al hombre de las limitaciones de las energías renovables (agua, viento, su propio trabajo físico y el de sus animales domésticos) a cambio de la dependencia de un recurso que resultó ser contaminante y no renovable. Brindó al hombre, por un momento de su historia, el poder de cambiar la faz de la tierra y de superar su crónica estrechez de recursos.

El hombre moderno ve a sí mismo y su cultura como el resultado de un continuo proceso de desarrollo, desde el origen del sistema solar, de la vida terrestre y de su propia especie, hasta su actual cultura tecnológica, consecuencia de una supuesta tendencia universal hacia el progreso y la perfección. Intuye la continuación de esta tendencia y descarta como improbables (e indeseables) alternativas de un equilibrio, cambio cíclico, declive o colapso, ajenas a su propia experiencia aunque sobren ejemplos en el pasado. Con esta actitud se resiste a tomar en serio escenarios sin permanente expansión tecnológica, industrial y económica y a tomar previsiones adecuadas.

El ocaso del crecimiento

El crecimiento es un fenómeno observado por el hombre desde siempre en sistemas complejos que lo rodean y en sí mismo. Crecen los hijos y los árboles (en sus estadios juveniles), crecen poblaciones de plantas y animales (en condiciones favorables), crecen ciudades e imperios. Pero nunca se ha visto un crecimiento perpetuo, hecho reflejado en proverbios (“No hay árbol que crezca hasta el cielo”) y consecuencia de las leyes que rigen nuestro universo. La idea de un crecimiento sin fin es una extrapolación injustificada; sin embargo, casos de crecimiento prolongado han creado la ilusión de continuar indefinidamente. Ejemplos de esta ilusión que no sobrevivieron al siglo XX fueron la fe en una continua superación moral e intelectual del hombre, en una inagotable explotación de recursos y, con la supuesta colonización de otros planetas, en un perpetuo crecimiento demográfico. Ejemplos de esta ilusión que persisten en la actualidad son la fe en el perpetuo crecimiento de la economía y de la eficiencia tecnológica.

Aún quienes admiten que economía y producción tendrán que dejar de crecer en algún momento, tienden a ubicarlo en un futuro remoto. No advierten que el acelerado crecimiento económico e industrial de los últimos 200 años ha acercado este momento a contadas décadas en cuanto a la escasez de recursos, y a pocos años en cuanto a la contaminación atmosférica con gases de invernadero.

Sistemas complejos finalizan su crecimiento en una de las siguientes tres formas (Esquema 1):

MANERAS MEDIANTE LAS CUALES LOS SISTEMAS COMPLEJOS FRENAN SU CRECIMIENTO

SATURACIÓN Y
EQUILIBRIO

Mecanismos internos del sistema

COLAPSO

Sistema carece de mecanismos
para frenar su crecimiento

EFFECTO
BURBUJA

Sistema frena tarde o poco su
crecimiento

ESQUEMA 1

1. Saturación y equilibrio

Resultan cuando el sistema cuenta con mecanismos internos que frenan y paran el crecimiento a medida que este avanza. Los seres humanos dejamos de crecer cuando nuestro sistema endocrino

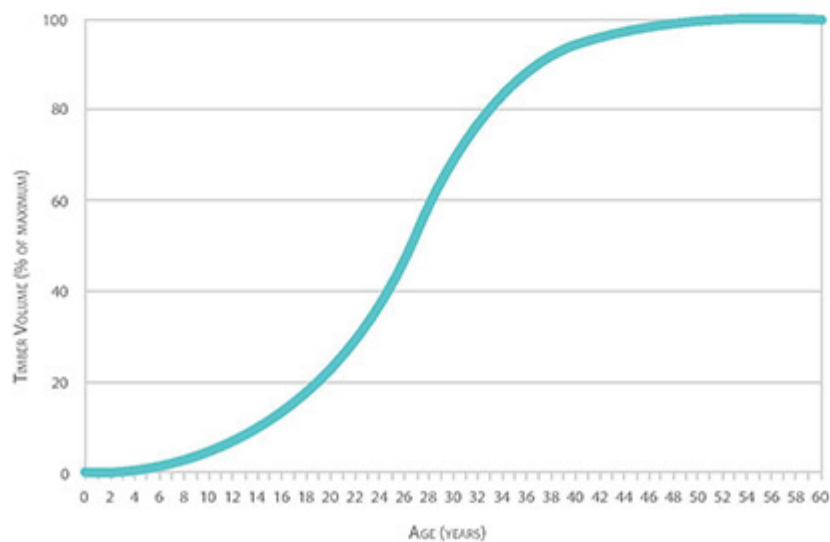


FIGURA.1

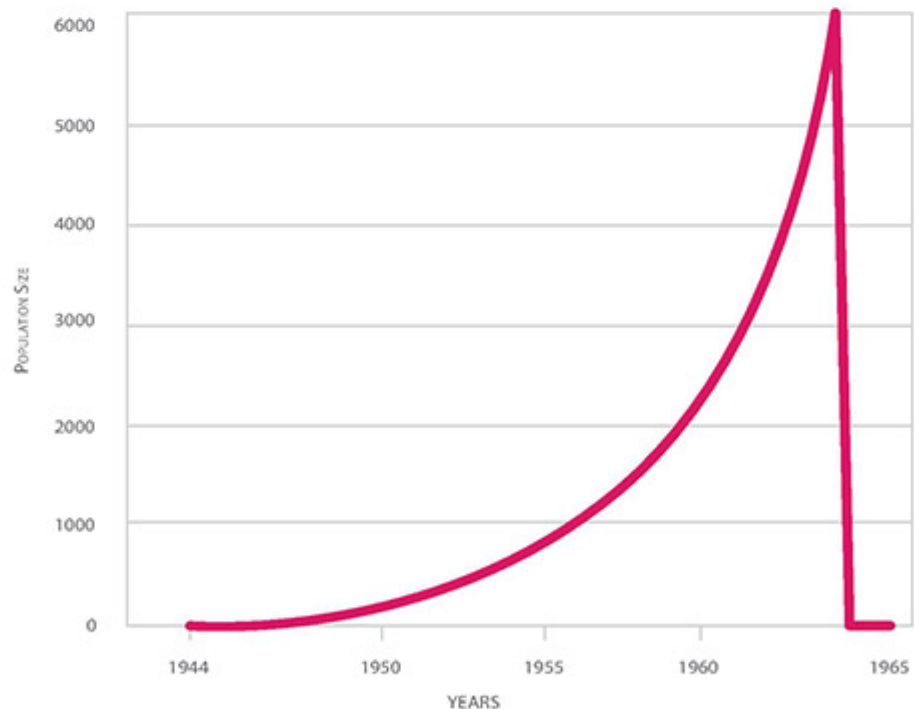
"LA CURVA LOGÍSTICA":
TRANSICIÓN DESDE UN
CRECIMIENTO ACCELERADO A
UN ESTADO DE EQUILIBRIO
(EJEMPLO DE UN ÁRBOL).

deja de producir la hormona del crecimiento. Una población de animales deja de crecer cuando su mayor tamaño causa una mayor mortalidad por escasez de alimentos, mayor presencia de predadores y/o creciente susceptibilidad a enfermedades. Tales mecanismos, lejos de ser perjudiciales para el sistema, son esenciales para su estabilización. La transición desde el crecimiento acelerado hasta el estado de equilibrio sigue la "curva logística" de la Figura 1. Las especies de un ecosistema estable se encuentran en este equilibrio; el tamaño de cada población (su "capacidad de carga") es estable y sostenible.

2. Colapso.

Un colapso resulta cuando el sistema carece de mecanismos capaces de frenar su crecimiento, que avanza hasta cuando sus consecuencias lo destruyen. Ejemplos del colapso de poblaciones son insectos que con su multiplicación destruyen el monocultivo que los alimentaba y microbios fermentadores (como la levadura) que se envenenan con el producto de su propio metabolismo (el alcohol). La Figura 2 muestra el caso documentado por Klein (1) de dos docenas de renos introducidos en 1944 en la isla de San Mateo, Alaska, cuya multiplicación exponencial durante 20 años (sin predadores ni enfermedades) terminó destruyendo su ecosistema. El entorno insular impidió una emigración y la población de renos pereció. Otros ejemplos son poblaciones humanas que destruyeron el ecosistema del que dependían, como las descritas por Diamond (3). Esta forma de crecimiento poblacional no solo es insostenible, es suicida. Un colapso también se produce cuando una creciente deuda lleva a la quiebra del deudor o cuando una creciente liquidez financiera desemboca en hiperinflación.

FIGURA 2
CRECIMIENTO
DESENFRENADO Y COLAPSO
DE UNA POBLACIÓN DE RENOS
EN LA ISLA DE ST. MATEO
(ALASKA)
SEGÚN D. KLEIN (1)



3. Efecto burbuja (colapso parcial).

Esta forma la sufren sistemas con mecanismos que sí frenan su crecimiento, pero "demasiado poco, demasiado tarde" para evitar un permanente deterioro. El resultado es un colapso parcial que no excluye una re-estabilización posterior pero en condiciones degradadas. En el caso de poblaciones, el

desplome parcial es consecuencia del deterioro de su capacidad de carga. En la economía son conocidos (y temidos) los colapsos de burbujas especulativas en la bolsa de valores, los mercados inmobiliarios, financieros etc. El desplome es tanto mayor cuanto mayor resulta el deterioro sufrido por el sistema, como sucede cuando un efecto burbuja se prolonga. La Figura 3 muestra el esquema de burbuja en una población: su crecimiento excede la capacidad de carga, la merma, lo que produce el desplome de la población con posterior re-estabilización en un nivel deprimido.

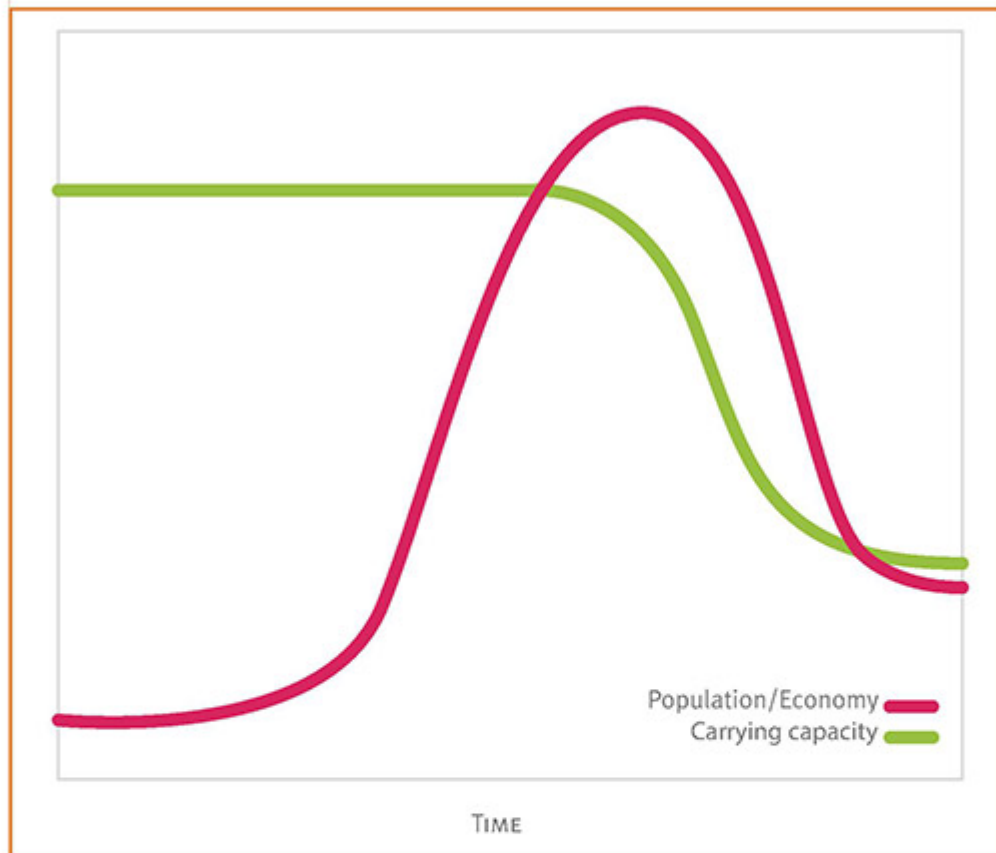


FIGURA 3.
EFECTO BURBUJA
Y COLAPSO (PARCIAL) EN
UNA POBLACIÓN.

El caso de poblaciones humanas se distingue del de otras especies en dos aspectos importantes.

a) La capacidad de carga para el hombre en su entorno no es fija sino depende de los recursos que, con su tecnología, pueda movilizar en forma sostenible.

b) El hombre es capaz de manipular los mecanismos que determinan el tamaño de su población. De hecho, ha puesto todo el empeño en reducir su mortalidad, combatiendo (con creciente éxito) hambre, enfermedad y violencia sin reducir al mismo tiempo su natalidad. El resultante crecimiento demográfico fue causa de su crónica escasez de recursos, obligándolo a una continua lucha por recursos adicionales mediante conquistas territoriales y/o tecnológicas. Fue una lucha, en última instancia frustrante, por arrebatarle a un planeta finito una siempre creciente capacidad de carga. Solo los últimos 50 años han visto esfuerzos serios de ajustar la natalidad humana a la limitada capacidad de carga del planeta.

El creciente ritmo global de extracción de recursos empezó a causar alarma a mediados del siglo XX, cuando la población humana había crecido más de diez veces en comparación con la época pre-industrial y continuaba haciéndolo a un ritmo nunca antes alcanzado. Ya resultó previsible cuándo el declive de recursos impediría la continuación del crecimiento y lo convertiría en burbuja o colapso. Sin embargo, publicaciones como las de Ehrlich (3) y del Club de Roma (4) que analizaban la situación fueron ignoradas o vilipendiadas. El "business as usual" continuó, convirtiendo la explotación de recursos

en sobreexplotación y el crecimiento demográfico en burbuja; hoy, una explotación sostenible de los restantes recursos de la biósfera solo alcanzaría para el 60% de la población global.

Evitar (o sufrir) el colapso de la burbuja demográfica significa una inevitable reducción (voluntaria o forzosa) de la población humana. No sorprende que publicaciones recientes tengan títulos como *Movilizar-se para salvar la civilización* o *El fin del crecimiento* (5). Inquietantes preguntas que plantea esta situación son: ¿cuánto más tiempo puede crecer la burbuja demográfica antes de colapsar? ¿El control de natalidad será suficiente para evitar el colapso demográfico o resultará “demasiado poco, demasiado tarde”? ¿Cuáles serán los países más afectados? ¿Qué tamaño global de la población humana es sostenible?

El crecimiento económico

La actual economía de crecimiento condiciona el desarrollo de todos los países. Su origen e implementación se remontan al siglo XVIII en pleno auge industrial (y colonial) del mundo occidental con su creciente población, riqueza y poder. Su base es el crecimiento. Autores clásicos como A. Smith (7) y, mas tarde, J. S. Mill insinuaron que en algún momento éste debiera ceder a un estado de equilibrio; sin embargo, más de dos siglos de crecimiento (con sus altibajos) crearon la convicción de que el crecimiento económico es natural y de que no existen alternativas. Como todo sistema complejo, la economía cuenta con mecanismos estabilizadores, como los del libre mercado, pero mecanismos más potentes le imponen su imparable dinámica de crecimiento: el aumento de productividad (por los avances tecnológicos), el aumento de oferta y demanda (por la producción en masa y un mayor consumo), el aumento de capitales y deudas (por el interés compuesto) y la estrecha relación entre los poderes económico y político. La economía de crecimiento es una carrera sin fin donde solo hay dos alternativas: crecer o perecer (*grow or die*). De hecho, cuando la economía de crecimiento se estanca, sobreviene la recesión con consecuencias devastadoras.

El tema del desarrollo sostenible, hoy una preocupación generalizada, no se tradujo en una preocupación comparable por una economía sostenible. Los economistas neoliberales, cuyas pautas dominan la actualidad, se limitaron a proponer un “crecimiento económico sostenible” (contradicción en sí misma) que se “desacoplaría” de los recursos materiales. Descartan un fin del crecimiento (en cualquiera de sus tres formas) por ser incompatible con su teoría.

Propuestas serias para una economía sostenible (sin necesidad de crecimiento) han sido elaboradas por economistas “alternativos”, ecólogos y grupos de especialistas a partir de la segunda mitad del siglo XX. Pero, pese a la importancia y urgencia de iniciar la transición a una economía sostenible, estas propuestas no se han llevado a la práctica, lo que también plantea inquietantes preguntas: ¿cuánto más tiempo puede crecer la burbuja económica? ¿Cuáles serán los países mas afectados por su colapso?

El cambio climático

El aumento de “gas carbónico”, CO₂, en la atmósfera es un fenómeno reciente: se debe al uso masivo de combustibles fósiles en nuestra civilización industrial. Su “efecto invernadero”, descubierto hace más de un siglo, pasó inadvertido hasta la segunda mitad del siglo XX cuando sus consecuencias empezaron a notarse: deshielo de glaciares (observado desde hace un siglo) y zonas polares, calentamiento atmosférico (confirmado desde los años 80), intensificación de eventos extremos como sequías, inundaciones y huracanes (afectándonos desde comienzos del siglo XXI) y acidificación y subida de los océanos (incipiente). Advertencias sobre el peligro de una incontrolable desestabilización climática, como las de J. Hansen en 1988 (8) ante el congreso estadounidense, no lograron despertar una preo-

cupación generalizada, al contrario, desataron una campaña de las industrias carboneras y petroleras poniendo en duda el hecho y la importancia del calentamiento global.

La serie de conferencias de las Naciones Unidas sobre el cambio climático tampoco motivó a un número suficiente de países para frenar sus emisiones de CO₂. El protocolo de Kioto en 1997, que trazó pautas para la reducción de las emisiones a partir de 2015, fue ignorado por un grupo de países causantes del 85% de las emisiones globales. Consideraciones de corto plazo se impusieron por encima de las de largo plazo. Las emisiones siguieron y siguen creciendo.

Una rápida parada de las emisiones de CO₂, única garantía para evitar un calentamiento catastrófico, se descarta porque produciría el colapso de nuestra civilización industrial, que deriva el 80% de la energía para su funcionamiento, mantenimiento y renovación de combustibles fósiles. Como analizó T. Garrett, durante los últimos 50 años el consumo de energía (y las emisiones de CO₂) ha crecido al mismo ritmo que el sector productivo (incluyendo la agricultura intensiva), las ciudades, los sistemas de transporte etc., es decir, como todo lo que constituye la riqueza creada por el hombre (9). Una disminución de las emisiones solo será posible rompiendo este paralelismo entre riqueza y emisiones mediante una “descarbonización” de nuestra civilización (cuya base tecnológica todavía es inmadura) o pagando el precio de una reducción de riqueza por abandono y/o destrucción. Por ahora, gobiernos, empresarios y economistas de todo el mundo continúan fomentando más riqueza con el fin de combatir miseria, desempleo y crisis financiera, aceptando el mayor ritmo de emisiones de CO₂. Buscan la solución de problemas inmediatos con medios que aumentan el riesgo de un planeta inhabitable en el futuro, como advierte P. Ehrlich (10).

La “inercia” del sistema climático hace que su temperatura crezca de forma poco notoria pero implacable. Las consecuencias completas de la acumulación de CO₂ solo se manifiestan a la postre. El actual aumento de 1 °C frente a la temperatura atmosférica preindustrial es solo parte del efecto de las emisiones pasadas. Ya queda “preprogramado” un adicional aumento de 0,5 °C en las próximas décadas, sin contar el efecto de las emisiones actuales y futuras.

La conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático en París, durante diciembre de 2015 (COP21), se considera la última oportunidad para ganarle la carrera contra el tiempo al calentamiento global. Su objetivo declarado es lograr que todos los países asuman compromisos vinculantes de reducción de sus emisiones, suficientes para que el calentamiento global nunca alcance los 2 °C. Respetar este umbral abre la esperanza de evitar una desestabilización definitiva del clima, pero obliga a dejar bajo tierra 80% de las reservas mundiales de carbón y exige acción rápida en todos los niveles, incluyendo cambios en las prioridades políticas, la moderación del consumo, la transferencia masiva de recursos y tecnologías a países subdesarrollados, y una gigantesca y pronta inversión en las tecnologías de descarbonización, las cuales, para ser atractivas al sector privado, deben ser rentables.

La economía de crecimiento es una carrera sin fin donde solo hay dos alternativas: crecer o perecer (grow or die). De hecho, cuando la economía de crecimiento se estanca, sobreviene la recesión con consecuencias devastadoras.

Conclusiones

La economía del crecimiento de los últimos siglos, hoy globalizada, ha permitido a una parte de la población humana no solo satisfacer sus necesidades sino gozar de comodidades, lujos y extravagancias mientras el resto continúa en escasez y miseria. Ha conllevado la sobrepoblación y sobreexplotación del planeta y la desestabilización del clima. Es insostenible y expuesta al colapso. Su remplazo por una economía sostenible significa abandonar conceptos cuya validez no se ha cuestionado en 200 años, situación que las ciencias físicas superaron en el siglo XX.

Mientras no se logre un alto porcentaje de descarbonización de nuestra civilización, todo crecimiento de riqueza será acompañado de un incremento de las emisiones de CO₂, aumentando el riesgo de un galopante e irreversible calentamiento.

Mientras no se logre un alto porcentaje de descarbonización de nuestra civilización, todo crecimiento de riqueza será acompañado de un incremento de las emisiones de CO₂, aumentando el riesgo de un galopante e irreversible calentamiento. El cambio a una sociedad descarbonizada tiene que ser global y rápido para evitar que resulte “demasiado poco, demasiado tarde”. Un fracaso de la Conferencia COP21 en París, similar al de la COP15 en Copenhague seis años atrás, un incumplimiento de los compromisos o una acción retardada, condenaría nuestro planeta a una nueva extinción en masa, incluyendo al homo sapiens.

Los países latinoamericanos, como la mayoría de las naciones en desarrollo, están ubicados en zonas tropicales y subtropicales especialmente vulnerables a las consecuencias del cambio climático. En

su conjunto solo producen el 5% de las emisiones globales de CO₂, así que son más víctimas que protagonistas del cambio. Para ellos es importante concentrarse en la previsión de los efectos del calentamiento (algunos de los cuales ya son patentes) y su mitigación. La prevista descarbonización tendrá efectos importantes sobre todo en países exportadores de energía.

Los países latinoamericanos combinan en su seno sectores del mundo desarrollado (en sus centros urbanos y enclaves industriales) con sectores subdesarrollado (en sus “cinturones de miseria” urbanos, zonas rurales y poblaciones indígenas). Tienen que compaginar las aspiraciones de estos sectores y evitar una confrontación de sus intereses que, a nivel internacional, es frecuente entre países desarrollados y subdesarrollados. Esta tarea requiere tomar previsiones innovadoras que tomen en serio los cambios pronosticados y dejen atrás las previsiones basadas en el “más de lo mismo”. Para Colombia, esta innovación coincide con el esperado fin de su bicentenario historia de confrontación interna; representa un doble reto pero promete un doble éxito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Klein, D. R. (1968) *The introduction, increase and crash of reindeer on St. Matthew Island*. *Wild-life Management* 32: 350-367.
2. Heinberg, R. (2011) *The End of Growth*. New Society Publishers, Gabriole Island, Canadá.
3. Diamond, J. (2005) *Collapse*. Penguin Books, EE.UU.
4. Ehrlich, P. R. (1968) *The Population Bomb*. Sierra Club / Ballantine Books, EE.UU.
5. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. (1972) *The Limits to Growth*. Potomac Ass., Nueva York.
6. Heinberg, Richard. (2011) *The End of Growth*. New Society Publishers, Gabriole Island, Canadá..
7. Smith, A. (1776) *The Wealth of Nations*. Londres.
8. Hansen, J. E. (2009) *Storms of my grand children*. Bloomsbury, EE.UU..
9. Garrett, T. (2012) *No way out: The double-bind in seeking global prosperity alongside mitigated climate change*. *Earth Syst. Dynam.* 3 – 1
10. Ehrlich, P. R., Ehrlich, A.H. *Can a collapse of global civilization be avoided?* *Proc. R. Soc B* 280 20122845. 2013

NOTICIAS

Desde la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia

Visita de ACAC a la Universidad del Norte

A inicios del 2016, el equipo de ACAC encargado del tema de Innovación y comunicaciones, viajó a la ciudad de Barranquilla para ser recibidos por el grupo de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Universidad del Norte, dirigido por el Doctor Raimundo Abello Llanos. En esta experiencia, se conoció las instalaciones de la Universidad, algunos de los resultados de las investigaciones, el funcionamiento de becas y el apoyo a los

futuros científicos sobretodo en áreas relacionadas con la biotecnología y bioquímica.

Se visitó el Museo Mapuka, un lugar mágico donde se invita a niños, jóvenes y adultos a conocer arqueología regional y la historia de las aguas del Caribe colombiano.

Para el equipo de ACAC fue una experiencia gratificante ver que Universidades como la del Norte en Barranquilla apoyan los avances científicos, hace seguimiento a los mismos e involucra la



sociedad para que conozca de primera mano la importancia del pasado en la construcción de conocimientos que generen interés desde temprana edad en campo de la ciencia.



En una aventura sin precedentes, el equipo de Innovación y Comunicación de ACAC viajó en el mes de Febrero a Mocoa en el departamento del Putumayo, para ser testigos de los trabajos realizados en la Feria de Estudiantes de Ciencia y Tecnología e Innovación.

jóvenes e investigadores del departamento.

Se encontraron trabajos de estudiantes muy interesantes y prometedores; uno de ellos, conformado por 3 estudiantes de no más de 18 años, quienes

Feria de estudiantes de CTel en Putumayo

Esta feria es un proyecto desarrollado por Putumayo CTel, que busca el fortalecimiento de las capacidades, competencias y habilidades en ciencia, tecnología e información especialmente en niños,

elaboraron productos curativos como ungüentos y jabones, usando como herramienta de su investigación a la planta de la región, Martin Galvis. Muchos de los proyectos presentados fueron premiados y se le reconoció su importante labor a cada uno de los estudiantes en pro de la ciencia.

Debido al óptimo resultado en esta feria, próximamente estaremos presentando un video contándoles más sobre esta maravillosa experiencia que demuestra que *Colombia tiene su ciencia*.



REFLEXIONES SOBRE LA EVOLUCIÓN Y RETOS DE **LOS MUSEOS** FRENTE A LA APROPIACIÓN DE LA CIENCIA Y **LA TECNOLOGÍA**

ANDRÉS FELIPE CEBALLOS M.

PROFESIONAL DE EDUCACIÓN
EN EL MUSEO DEL AGUA EPM

HERNÁN GIL P.

VICEPRESIDENTE DE LA ASOCIACIÓN COLOMBIANA
DE MUSEOS, COORDINADOR DEL ICOM – COLOMBIA.

MARÍA DEL ROSARIO ATUESTA V.

DOCENTE E INVESTIGADORA EN INFORMÁTICA
EDUCATIVA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT.

andres.cebillos@fundacionepm.org.co
hgilpa@gmail.com
matuesta@eafit.edu.co

RESUMEN

Esta reflexión está dirigida a comprender, desde una revisión histórica, el rol que han asumido los museos a lo largo de los años y cómo el surgimiento de los museos interactivos como una opción moderna de acercamiento a la sociedad es, en parte, una respuesta a los retos sociales y culturales de los países en la búsqueda de la promoción de la ciencia y la tecnología. Estas situaciones están llevando a los museos a enfrentarse al reto de la extramuralización con el fin no solo de acercarse a las sociedades y comunidades para aportar conocimiento sobre la historia y la ciencia sino, incluso, para su supervivencia como escenario social.

Introducción

Los museos tienen su origen remoto en la antigua Grecia, específicamente en un lugar denominado Museion. Aquel espacio de los griegos era utilizado como templo de las musas donde se adoraban a las diosas del arte, la ciencia y la música. Como característica particular, una vez al año la población llevaba sus regalos y ofrendas al Museion donde los sacerdotes, que actuaban como “curadores”, seleccionaban las piezas a ser exhibidas (1). Años después, los romanos se volverían coleccionistas de las obras tomadas como botín en sus campañas militares con el propósito de decorar sus palacios (2). Posteriormente se observa la aparición del Studioli o Wunderkammer, los cuales, en otros términos, eran denominados como estancias o cuartos de las maravillas: eran lugares donde almacenaban una gran cantidad de objetos valiosos y que por lo general estaban en posesión de los nobles y la monarquía, pero eran de carácter privado y no se exhibían al público (3).

Van a pasar muchos siglos hasta que aparezcan los primeros museos con la conformación de la Galería de los Uffizzi en la Florencia de los Medici; sin embargo, todavía son colecciones privadas sin acceso al público. La Historia registra al Museo Ashmolean (Ashmolean Museum of Art and Archaeology), creado en 1683 por la Universidad de Oxford, como la primera entidad en exhibir al público sus colecciones.



En diversas ciudades europeas como Roma, Londres, Florencia, San Petersburgo, Besanzón y Madrid se seguirá este ejemplo, centrándose en las exposiciones de obras de arte y antigüedades (3). Es en el renacimiento donde se desarrolla en la humanidad una noción más precisa de museo, definida como aquella institución abierta al público donde se exhibe, preserva e investiga el bien material e inmaterial de una nación. La institución que simboliza el comienzo de este paradigma museológico es el Louvre, el cual fue transformado en un museo público luego de la revolución francesa (1).

Con el correr de los años, las temáticas fueron haciéndose más amplias, aunque no así las expectativas que se tenían alrededor de esas entidades convertidas en unos inmensos depósitos de vestigios de pasados remotos y cercanos, de glorias que habían precedido a los espectadores. El poco formalismo académico de los museos propiciaba un goce estético más que un proceso educativo; esta realidad los enfrenta por primera vez al reto de repensarse en la perspectiva de pasar de mostrar objetos del pasado a contar un cuento (o historia) por medio de objetos. Esto implicaba superar la materialidad del objeto, por encima de su valor estético o económico, en función de su importancia como testimonio de un suceso con importancia cultural. Se inicia así la superación del paradigma del depósito: el visitante pasaría del rol de observador al de receptor, lo que está de la mano con una nueva función que asumían estas entidades: comunicar.

La comunicación, entendida como una interacción entre la exposición (emisor) y el público (receptor) a través de un mensaje, generó inmediatamente la necesidad de intervenir en su proceso de transmisión produciendo profundos cambios en los conceptos de la museografía, la cual pasó de diseños y distribuciones de salas a incorporar elementos prestados por el diseño, la iluminación, la psicología, la semiótica y, más tarde, la producción multimedia y la cibemética. Asimismo, se fueron dando otros importantes hitos en la evolución de los museos que, además de mantener su función de conservadores y divulgadores del patrimonio cultural y científico, se adentraron al reconocimiento de la identidad cultural, tarea que se convertiría en una bandera.

En la década de 1960, y como consecuencia de las acciones emprendidas por el Consejo Internacional de Museos (ICOM), asociación independiente vinculada a la Unesco, se incrementó un movimiento de estudio y reflexión acerca de la función de los museos a fin de propiciar su desarrollo optimizando su dinámica social y cultural (4). En esas mismas décadas, la preocupación empieza a volcarse hacia los visitantes por encima de los objetos mismos de la colección. Pesan más las necesidades educativas, culturales y los procesos de construcción de ciudadanía con la sociedad que los objetos exhibidos; en este nuevo pensamiento museológico surgen los museos interactivos de ciencias.

El primero fue inaugurado en 1969 por Frank Oppenheimer, científico destacado en la enseñanza de las ciencias por medio de prototipos interactivos (5). El objetivo de estos museos fue desarrollar procesos de apropiación social del conocimiento y la ciencia en sus visitantes bajo el supuesto que las personas, al estar mejor informadas en procesos científicos, pueden contribuir a procesos de toma de decisiones en pro del colectivo social y ser mejores ciudadanos (6).

El reto de la extramuralización

Durante el tercio final del siglo pasado, la institución museal se vio comprometida en adaptarse a las nuevas dinámicas culturales que la sociedad empezó a imponer. Como entidad conservadora del patrimonio científico y cultural no podía quedarse “con los brazos cruzados” esperando que llegara un público a visitar sus eventos. Se hizo imperante la necesidad de ir a buscarlo y, más allá del ámbito de la publicidad, había que llegar hasta donde se encontraba.

Surgió así, un “rompimiento de los muros” a través de la itinerancia de exposiciones en los entornos locales, regionales, nacionales y aún hasta los internacionales. Esto obligó a los museos a realizar un proceso de aprendizaje sobre su nueva tarea que los enfrentó no solo a retos logísticos (transportes, seguridad, empaques, etc.) sino, y lo más importante, a dominar un lenguaje adecuado a los diferentes ambientes donde se exponían sus muestras.

Este proceso coincide con el surgimiento de la nueva museología, donde la preocupación por el papel que tienen los museos en la sociedad se amplía con respecto al pensamiento clásico museológico, donde se les entiende como instituciones encargadas de conservar y preservar el patrimonio en la sociedad. Bajo esta nueva perspectiva, adicional a su papel tradicional, los museos deben ser conectores de pensamientos, ideas, conceptos, proyectos que sean de relevancia para los ciudadanos. En última, deben considerarse a sí mismos como instituciones clave en la cohesión social y líderes de procesos que permitan construir ciudadanía (7,8).

En este intento de ser relevantes en la sociedad, los museos han realizado grandes apuestas para llevar sus programas educativos a comunidades que, por sus contextos geográficos, culturales, sociales, o económicos, no pueden llegar a sus instalaciones. Es por esto que se han desarrollado iniciativas como los museos itinerantes, en los cuales, dependiendo de sus programas educativos o colecciones, viajan a comunidades urbanas y rurales para desarrollar en ellas procesos o intervenciones educativas. (Figura 1)

Los programas extramurales se han convertido en elementos clave para el funcionamiento de los museos, ya que de acuerdo a la encuesta realizada por la ASTC (Association Of Science Technology Centers, 2014) un 58% de los museos interactivos alrededor del mundo de tamaño pequeño (área entre 1.000 y 2.000 m²) han reportado pérdida de visitantes total de aproximadamente un 10% en el 2014 con respecto a 2013 (9), (ver Tabla 1).



FIGURA 1.
ENTREGA DE KITS
EDUCATIVOS EN EL URABÁ
ANTIOQUEÑO CON EL
PROYECTO "EXPERIENCIAS
PEDAGÓGICAS ITINERANTES
DEL MUSEO DEL AGUA EPM".
(FUENTE: OFICINA
COMUNICACIONES
FUNDACIÓN EPM, 2015)

**TABLA 1: CIFRAS DE INGRESOS DE VISITANTES
EN EL 2013 Y 2014 PARA LOS MUSEOS INSCRITOS EN LA ASTC.**

TOMADA DE ASSOCIATION OF SCIENCE TECHNOLOGY CENTERS, 2014.

PROMEDIO DE VISITANTES					
Clasificación	Categoría	2013	2014	% incremento/ decremento	n=
Todos		210.678	200.273	-5,2%	176
Por ubicación	U.S.	174.812	174.308	-0,3%	139
	Otros países	311.983	334.013	6,6%	37
Por tipo de institución	Centros de ciencia	234.540	214.006	-9,6%	113
	Todos los demás	183.250	185.091	1,0%	63
Por tamaño	Muy pequeños	38.000	40.030	5,1%	33
	Pequeños	129.475	116.847	-10,8%	41
	Medianos	230.304	206.652	-11,4%	41
	Grandes	516.912	529.902	2,5%	54
Por gastos (USD)	<\$ 1 millón USD	31.994	37.864	15,5%	32
	\$1-\$3 millones USD	117.289	112.597	-4,2%	44
	\$3-\$10 millones USD	286.582	290.559	1,4%	61
	>\$10 millones USD	690.852	680.031	-1,6%	38
Museo del Agua		87.143	73.410	-18,7%	1
		2015	15.126	84,53%	

TABLA 2: BENEFICIARIOS EN ACTIVIDADES POR FUERA DE LOS MUSEOS EN EL 2013 Y 2014 PARA LOS MUSEOS INSCRITOS EN LA ASTC.

TOMADA DE ASSOCIATION OF SCIENCE TECHNOLOGY CENTERS, 2014.

PROMEDIO DE BENEFICIARIOS POR FUERA DE LOS MUSEOS					
Clasificación	Categoría	2013	2014	% incremento/ decremento	n=
Todos		22.076	20.639	-7,0%	131
Por ubicación	U.S.	16.095	17.700	9,1%	109
	Otros países	43.453	34.720	-25,2%	22
Por tipo de institución	Centros de ciencia	28.259	30.370	7,0%	82
	Todos los demás	16.095	15.168	-6,1%	49
Por tamaño	Muy pequeños	60.015	60.146	0,2%	30
	Pequeños	10.687	15.632	31,6%	30
	Medianos	29.113	27.232	-6,9%	32
	Grandes	44.745	43.636	-2,5%	39
Por gastos (USD)	<\$ 1 millón USD	4.393	3.800	-15,6%	30
	\$1-\$3 millones USD	12.955	17.267	25,0%	34
	\$3-\$10 millones USD	25.864	24.718	-4,6%	45
	>\$10 millones USD	130.864	128.146	-2,1%	22
Museo del Agua		1.430	8.197	82,6%	1

Esto hace pensar que hay una serie de factores aún desconocidos que han disminuido la asistencia de visitantes. Cabe preguntarse entonces: ¿cuál es el alcance de los museos? Si se revisa la encuesta de la ASTC para los museos de categoría pequeña, se evidencia un aumento importante en la cifra de públicos atendidos extramuros en 2014 con un alza del 46% frente al año anterior (9).

La encuesta de la ASTC (ver Tabla 2) demuestra que la extramuralidad es un elemento fundamen-

tal para los museos interactivos en la actualidad (especialmente en los pequeños, donde se observa un mayor incremento en el promedio de beneficiarios), ya que son estos programas los que permiten mantener cifras positivas de atención al público y continuar siendo relevantes en la actualidad; se deduce entonces que cada vez más pronto los museos interactivos deben volcarse hacia las comunidades, viajar y dejar el espacio de confort en su sede.

El diseño de acciones de extramuralización, como la exposición itinerante, implica pensar en

nuevos públicos objetivo de cara a comprender sus afinidades culturales, sus intereses y motivaciones; todos estos elementos, entre más amplia sea la itinerancia, diferirán a los del entorno propio o local del museo.

En la medida en que el museo va aprendiendo su nueva tarea, ha ido entendiendo y aceptando que el reto de la extramuralización lo convierte en un promotor del diálogo intercultural, necesario en la sociedad globalizada de los años presentes. Este nuevo rol dinamiza las posibilidades de cimentar su acción sobre la base de unas nuevas relaciones, del contacto con otras miradas y opiniones, de enriquecerse con las experiencias de otras entidades.

los museos deben ser conectores de pensamientos, ideas, conceptos, proyectos que sean de relevancia para los ciudadanos. En última, deben considerarse a sí mismos como instituciones clave en la cohesión social y líderes de procesos que permitan construir ciudadanía

Una dimensión de la extramuralización de los museos, diferente a la de las exposiciones itinerantes, se viene dando a través de los programas didácticos de extensión que involucran una amplia gama de acciones y actividades, entre otras: publicación de libros y revistas (físicas o virtuales), producción de materiales audiovisuales y multimediales, realización de cursos y talleres, y la elaboración de kits didácticos, también llamados 'Maletas Viajeras', que se constituyen en una herramienta que, a la vez que llevan el mensaje cultural, aportan un apoyo directo a la educación formal que se realiza en los centros educativos cumpliendo con un propósito pedagógico inscrito en el esquema de contenidos.

En la actualidad, bajo las nuevas concepciones museológicas se evidencia una definición expandida del museo donde hay amplios rangos de tipo, como el caso de Medellín y Antioquia con el Museo VIZTAZ (tiene una colección virtual sobre el patrimonio fotográfico de la ciudad de Medellín), el Museo Comunitario Graciliano Arcila, el Museo del Agua de Empresas Públicas de Medellín - EPM (con sus programas de Kits pedagógicos en el tema Agua) y el MAMM con su maleta didáctica sobre arte (Figura 2).

Si bien los museos interactivos y sus expansiones de manera especial se vienen enfrentando a variados retos como los extramuros, la tarea de aportar escenarios para la apropiación social de la ciencia y la tecnología continúa constituyéndose en el gran reto. En América Latina, por ejemplo, su dinámica se ha relacionado con la búsqueda constante de acciones que los acerquen cada vez más a las comunidades educativas y a las tareas formativas, superando al diletantismo cultural. El museo se está perfilando como un elemento más del sistema educativo y, en un sentido amplio, en parte de la educación informal.

En Colombia, la estrategia nacional de Apropiación Social de la Ciencia, Tecnología e Innovación (AS-CyTi), dirigida desde Colciencias, promueve un aprovechamiento social del conocimiento, entendiéndolo como un proceso de comprensión e intervención de las relaciones entre tecnociencia y sociedad, en el cual los museos interactivos juegan un papel fundamental: el gran reto de llevar acciones y escenarios legítimos para la apropiación de la ciencia y la tecnología a los diversos contextos sociales y culturales, labor que implica la participación activa de los diversos grupos sociales y no solo la entrega de colecciones y recursos museales.

Por tanto, el mayor reto actual de los museos interactivos podría considerarse en la implementación de estrategias y acciones que reconozcan e involucren activamente grupos socio-culturales en los temas de ciencia y tecnología, según su propósito museal, como el primer eslabón para la construcción de una ciudadanía basada en la equidad, la calidad y la participación, y en la que la ciencia, la tecnología y la innovación encuentran sentido desde lo cotidiano de cada grupo social.

El desarrollo de procesos extramurales es de una importancia definitiva para que los museos interactivos en el contexto latinoamericano sean entidades que puedan lograr transformaciones sociales mediante la apropiación del conocimiento científico. En el caso particular del Museo del Agua EPM, sus maletas pedagógicas le han permitido ser un actor reconocido en el contexto departamental por los procesos de apropiación social de la ciencia que promueve en las temáticas de desarrollo sostenible con una mirada interdisciplinar al recurso hídrico. Los programas extramurales amplían el espectro de oportunidades al Museo del Agua EPM, ya que por medio de ellos contribuye al gran objetivo de promover territorios sostenibles y competitivos en los lugares donde tiene influencia.



FIGURA 2.
ACTIVIDADES ESCOLARES EN
EL MUNICIPIO DE BELMIRA
— ANTIQUIA, CON LA MALETA
PEDAGÓGICA "OPERACIÓN
SUMÉRGETE" DEL MUSEO
DEL AGUA EPM. (FUENTE:
OFICINA COMUNICACIONES
FUNDACIÓN EPM, 2015)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Piedrahita, L. (2011) *Diplomatura Museología, Museografía y Estudios Curatoriales*. Medellín.
2. Bennett, Tony. (1995) *The birth of the Museum: History, theory, politics*. Routledge Ed. Londres.
3. Piedrahita, L. (2008) Letras Anónimas. Museo: Lugar y Territorio. (2). <http://www.ecbloguer.com/letrasanonimas/?p=152>. Consultado el 24 de Agosto de 2015.
4. ICOM. (2007). 22ª Conferencia General del ICOM, Viena.
5. Ogawa, R. T., Loomis, M., & Crain, R. (2009) *Institutional history of an interactive science center: The founding and development of the Exploratorium*. Science Education. 93(2), 269-292.
6. Colciencias. (2010) *Estrategia Nacional de Apropiación Social de la Ciencia, Tecnología e Innovación*. Bogotá.
7. DeCarli, G. (2004) *Vigencia de la Nueva Museología en América Latina: conceptos y modelos*.
8. Díaz Balerdi, I. D. (2002) *¿Qué fue de la nueva museología?: el caso de Québec*. En: Artígrama: Revista del Departamento de Historia del Arte de la Universidad de Zaragoza. (17), 493-516.
9. ASTC. (2014) *The 2014 ASTC Statistics Analysis Package*. Attendance Highlights.
Lecturas alternas para complementar el tema:
Para ampliar el tema sobre las exposiciones de obras de arte y las antigüedades en los museos europeos, léase: Carlos Rico, J. *La difícil supervivencia de los museos*. Ed. Trea, Gijón, 2003.
10. Un análisis mas amplio sobre la incorporación de la cibernética en los museos se encuentra en: Hernández F. *El Museo como espacio de Comunicación*. Ediciones Trea, S.L. Gijón, 1998.
Para mayor información sobre ICOM, consultar <http://icom.museum/L/1/>
11. Para ampliar información sobre la participación de los museos en los procesos educativos, léase: Asensio, Mikel. *Lazos de Luz Azul: Estándares de Calidad en la Utilización de la Tecnología para el Aprendizaje en Museos y Espacios de Presentación del Patrimonio*. SEJ2006-15352/EDUC. Universidad Autónoma de Madrid, 2009.



ASOCIACIÓN COLOMBIANA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA

www.acac.org.co



ASOCIACIÓN COLOMBIANA
PARA EL AVANCE DE LA CIENCIA

SERVICIOS DE INNOVACIÓN Y COMUNICACIONES

NUESTRA OFERTA



Generamos valor a través del desarrollo de productos y servicios de comunicaciones. Somos conocedores del mundo de la Ciencia, Tecnología y la Innovación - CTel y sabemos cómo comunicar sus logros en esta área.

PRODUCCIÓN DE VIDEO

Institucionales, documentales y cortometrajes.

DISEÑO GRÁFICO

Piezas impresas, digitales, e imagen corporativa.

DISEÑO WEB

Soluciones web a la medida de nuestros clientes.

MERCHANDISING

Estrategias de mercadeo para su producto o servicio.

SOCIAL MEDIA

Manejo de medios digitales para la divulgación su mensaje.

FREE PRESS

Posicionamiento en medios de su producto o servicio.

COBERTURA DE EVENTOS

Resultados óptimos en la cobertura de sus eventos.

MAILING

Su mensaje a más de 40.000 personas y entidades.

REVISTA DIGITAL

Innovación & Ciencia - Publique sus artículos y pautas aquí.

MÁS INFORMACIÓN EN:

www.acac.org.co - acac@acac.org.co
Teléfonos: +57 (1) 432 0370 - (57) 316 418 6677
Carrera 16 No. 31A - 36 - Bogotá D.C. Colombia



Albert Einsten
y la relatividad