

CIENCIA DE BOLETO

6

Tectónica de placas

Juan Manuel Espíndola Castro



Esta publicación es de todos para leer en el Metro

Tectónica de placas



GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
México, la Ciudad de la Esperanza

Gobierno del Distrito Federal

Lic. Alejandro Encinas Rodríguez
Jefe de Gobierno

Lic. Francisco Garduño Yáñez
Secretario de Transportes y Vialidad

Dra. Florencia Serranía Soto
Directora General del Sistema
de Transporte Colectivo



Universidad Nacional Autónoma de México

Juan Ramón de la Fuente
Rector

Enrique del Val Blanco
Secretario General

Daniel Barrera Pérez
Secretario Administrativo

René Drucker Colín
Coordinador de la
Investigación Científica

Julia Tagüeña Parga
Directora General de
Divulgación de la Ciencia

Patricia Gómez Cano
Jefe del Departamento de Difusión de la
Coordinación de la Investigación Científica

Tectónica de placas

Juan Manuel Espíndola Castro



Dirección General de
Divulgación de la Ciencia
U N A M

Dirección General de Divulgación de la Ciencia

Coordinación editorial
Rosanela Álvarez y Juan Tonda

Diseño de la colección
Elizabeth Cruz

Corrección técnica
Martín Bonfil y Javier Crúz

Formación
Elizabeth Cruz y Kenia Salgado

Asistente editorial
Leticia Monroy

Ilustración de portada
Elizabeth Cruz

Ilustraciones
Raúl Cruz

Primera edición, 2006

D.R. © Dirección General de Divulgación de la Ciencia
Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio Universum, tercer piso, Circuito Cultural,
Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, México, D.F.

ISBN 970-32-2080-0



Agradecemos el apoyo otorgado por ISA Corporativo

Impreso y hecho en México

Este libro no puede ser reproducido, total ni parcialmente, por ningún medio electrónico o de otro tipo, sin autorización escrita de los editores.

Tectónica de placas

Un poco de historia

Cuando se escucha la palabra revolución, la mayoría de personas piensa en algún evento político-social. Aquí nos vamos a referir a otro tipo de revoluciones que, a pesar de ser menos dramáticas, afectan a la sociedad de manera profunda. Nos referimos a las revoluciones científicas, cuyo papel determinante en la sociedad cambia nuestra percepción del mundo y la tecnología de la que nos servimos en la vida diaria. Un ejemplo de revolución científica fue la debida a Copérnico, al considerar que la Tierra era un planeta y se movía alrededor del Sol y no al contrario, como daban por hecho los astrónomos de la época.

Estos descubrimientos son revolucionarios porque conducen a una interpretación de la naturaleza radicalmente distinta de la que se tenía hasta entonces, y van en contra de ideas generalmente acepta-

das. Dichos cambios no son aceptados con general alegría por la mayoría de los científicos de la época, sino con escepticismo y recelo. Sólo el peso de los hechos y el paso del tiempo les confieren su debido lugar. No cualquier afirmación descabellada es una idea científicamente revolucionaria sólo por el hecho de ir a contracorriente. En general son propuestas con argumentos serios que dan solución a los múltiples problemas que se acumulan en la ciencia a lo largo del tiempo.

Una de estas revoluciones se produjo en las ciencias de la tierra durante el siglo pasado. Recibe el nombre de *tectónica de placas*, y está asociada con la idea fundamental de que los continentes bajo nuestros pies se mueven.

El movimiento al que se refiere la tectónica de placas es un movimiento de la corteza terrestre sobre la superficie del planeta. Este movimiento es el que ha producido un cambio en la posición relativa de los continentes, separándolos en algunas partes y acercándolos en otras. Esta afirmación resulta difícil de aceptar de buenas a primeras, pues el movimiento es tan lento que no podemos percibirlo. Y sin embargo, tomando palabras de Galileo, se mueven.

Comencemos entonces con un poco de historia. El primer científico que propuso esta teoría seriamente, apoyándola con argumentos de varios tipos, fue el astrónomo y geofísico alemán Alfred Lothar

Wegener (1880-1930). Wegener notó que la costa oriental de Sudamérica parecía encajar en la costa occidental de África. ¿Cómo podía tal ajuste no ser más que coincidencia si, como se creía en esos días, los continentes están fijos sobre el planeta? Wegener ahondó en los estudios sobre la geología y paleontología global y encontró evidencias de que los continentes habían estado unidos en el pasado. En su libro *El origen de los continentes y los océanos*, publicado en 1915, expuso sus ideas sobre el desplazamiento de los continentes. Wegener pensaba que hace unos 200 millones de años existía un solo gran continente al que llamó *Pangea* (del griego *pan*, todo, y *gea*, tierra) (véase figura 1).



Figura 1. Pangea

Wegener sostuvo que por aquella época comenzaron a desprenderse los actuales continentes, moviéndose a las posiciones en que los encontramos actualmente, como si fuera un enorme rompecabezas. Sin embargo, cuando unimos las piezas de un rompecabezas sabemos que el mero ajuste de dos bordes no es suficiente para saber si los dos elementos van juntos; es necesario que el diseño continúe en ambos elementos. Wegener argumentó que efectivamente existía continuidad geológica y paleontológica en los continentes que alguna vez habían estado unidos. Es decir, que los tipos de rocas y rasgos geológicos continuaban de un continente en otro.

Por ejemplo, en el extremo sur de África se encuentran las llamadas Montañas del Cabo, formadas durante el periodo pérmico (hace 286-245 millones de años). Montañas semejantes, en tipo de roca y estructura, se encuentran en el territorio de la actual Argentina. Por otro lado, en el occidente africano encontramos una gran plataforma de una roca muy particular conocida como *gneiss*, bandeada y de grano grueso. Este mismo tipo de rocas conforman la plataforma gneisítica del Brasil. De manera análoga, los pliegues gneisíticos de Escocia encuentran continuación en las montañas de la península del Labrador, en Canadá, y otras sierras de Escocia y Noruega en las montañas Apalaches canadienses. Otras sucesiones de rocas en Sudamérica, África,

India, Antártida y Australia muestran también notable similitud.

Wegener argumentó que en localidades que ahora se encuentran en diferentes continentes se podían reconocer tres estratos diferentes con las mismas características y sucesión, y que son las siguientes: la capa más profunda (y por consiguiente más antigua) es una capa de tillita, roca formada por los sedimentos de los glaciares que en su lento movimiento desgarran las rocas por las que pasan. La capa o estrato intermedio es una capa con areniscas (formadas a partir de arenas), lutitas (formadas a partir de arcillas) y carbón. Estas dos capas también contienen fósiles de *Glossopteris*, un helecho que se extinguió hace 200 millones de años. Finalmente, la capa más joven está compuesta por lavas. Esta sucesión de rocas de origen muy particular en lugares ahora remotos y desconectados plantea varias preguntas: en primer lugar, ¿podría darse casualmente por procesos semejantes que ocurrieron al mismo tiempo a distancias muy grandes y en el mismo orden? En segundo lugar, dado que, por ejemplo, la tillita indica la ocurrencia de glaciaciones, ¿podrían haber ocurrido con la disposición actual de los continentes? Por último, ya que los fósiles de *Glossopteris* se han encontrado en Sudamérica, África, India, y Australia, ¿podrían haberse distribuido tan ampliamente en el pasado en lugares con clima tan diverso?

Wegener pensó que una mejor solución al problema era considerar que los continentes habían estado congregados en un solo supercontinente (Pangea), del que después se habían desprendido y movido a las posiciones actuales. De esta manera era posible explicar la distribución de *Glossopteris*, suponiéndola extendida sobre un área geográfica original contigua más pequeña. Lo mismo podía decirse de otros fósiles.

Wegener también usó la distribución de los tipos de roca específicos para determinar la distribución de zonas climáticas en el pasado. Por ejemplo, las tillitas y las rayaduras en la roca que producen los glaciales sobre sus rocas indican clima polar, y las rocas calcáreas de origen coralino, clima tropical. Como podemos ver si consultamos un mapa actual de climas, las diferentes zonas climáticas son aproximadamente paralelas al ecuador; sin embargo, las zonas climáticas reconstruidas del pasado no son paralelas al ecuador actual: para explicarlas es preciso suponer que el polo de rotación de la Tierra ha cambiado; o bien, como propuso Wegener, que los continentes se han desplazado a otras posiciones.

Muchos de estos problemas en la interpretación de la evolución de la Tierra eran bien conocidos en tiempos de Wegener. Pero se proponían soluciones menos radicales que no involucraban el movimiento de los continentes. Así, para explicar la distribu-

ción de los fósiles que hemos comentado, los paleontólogos invocaban la existencia de “puentes intercontinentales” que eran porciones de tierra que conectaban los continentes y posteriormente habrían sido sumergidas por los océanos. Por otro lado, para explicar la formación de montañas, que Wegener atribuía al movimiento de los continentes, se proponía que la Tierra, al enfriarse, se contraía formando pliegues, como se forman en una manzana cuando se seca. Estas teorías eran insuficientes para explicar la totalidad de las observaciones y presentaban problemas muy serios, aunque gozaban de una simpleza que las hacía preferibles a la solución radical de Wegener. Porque, además, si los continentes se mueven, ¿qué fuerza los hace moverse? ¿Puede decirnos el doctor Wegener cómo lo hacen? En este punto, desgraciadamente, Wegener no tenía una buena explicación. Como meteorólogo, disciplina que también cultivaba, propuso fuerzas que son de relevancia en el movimiento de la atmósfera pero que, como otros físicos se encargaron de demostrar, eran insuficientes para explicar el movimiento de algo tan rígido como las rocas. Por algún tiempo durante la vida de Wegener y algo después, se sostuvo un amplio debate sobre la deriva continental en la que participaron sobre todo geólogos y geofísicos, la mayor de las veces con resultados poco favorables para Wegener y sus pocos seguidores. Algunos años

más tarde el debate había terminado y la teoría había sido dejada de lado como caso curioso.

Sin embargo, en la década de 1950, el estudio del fondo marino había experimentado un crecimiento notable, y se acumulaba gran cantidad de información que debía ser interpretada. Por un lado, las técnicas de fechamiento de rocas habían madurado y ya constituían una herramienta confiable para la datación de rocas muy antiguas. Por otro lado, a causa del tendido de cables telefónicos en el fondo oceánico, y las operaciones marinas en el curso de las dos guerras mundiales, había surgido un gran caudal de información sobre el fondo marino. Se había descubierto que el fondo oceánico era geológicamente reciente y bastante irregular; con grandes cordilleras y fosas alargadas conocidas como trincheras. Contenía además una capa de sedimentos muy delgada, lo cual planteaba problemas cuya solución no era evidente. La razón es que si el suelo marino ha sido siempre el mismo, debería ser muy antiguo, contener una capa de sedimentos muy gruesa y poco relieve debido a la erosión. Éste no sólo no era el caso, sino que además el suelo marino poseía un sistema global de cordilleras submarinas de más de 50 mil kilómetros de longitud, 800 de ancho y una elevación promedio de 4 mil 500 metros sobre el nivel del fondo oceánico. Y para complicar las cosas estaban los datos magnéticos sobre el fondo marino.

Polaridades magnéticas e inversiones del campo

Durante la segunda Guerra Mundial, los técnicos y científicos de las naciones enfrentadas, sobre todo los Estados Unidos e Inglaterra, habían diseñado ciertos instrumentos para medir campos magnéticos muy débiles, llamados magnetómetros, con el fin de detectar los producidos por los submarinos y conocer, de este modo, su ubicación. En los años 50, dichos instrumentos fueron adaptados para medir el débil campo magnético de las rocas. Éstas últimas contienen cantidades muy pequeñas de magnetita, el componente esencial de la piedra imán, que les confiere un campo magnético muy débil pero permanente y estable. Los pequeños cristales de magnetita se forman en la roca cuando se enfría a partir de un estado de fusión y posteriormente se alinean con el campo magnético de la Tierra. Al solidificarse la roca, conservan la dirección en que fueron magnetizadas. Los granos de magnetita “retratan” la dirección del campo magnético presente cuando se formaron.

Al medirse la magnetización de las rocas oceánicas, los resultados fueron asombrosos. En lugar de encontrarse una distribución similar de la dirección de magnetización, se encontraron bandas con magnetización en un sentido, seguidas de bandas de

magnetización en sentido contrario con centro en las cordilleras submarinas.

Ya desde las primeras décadas del siglo xx, los científicos habían descubierto que las rocas de los continentes no tenían una misma dirección de magnetización, además de las direcciones normales, es decir, las que reflejan aproximadamente el campo actual de la Tierra; había otras inversas o en dirección aproximadamente contraria a las anteriores, situación que sugiere que el campo magnético terrestre se ha invertido abruptamente en el pasado, es decir, que los polos Norte y Sur magnético han estado en los puntos opuestos. Este fenómeno explicaba la aparición de bandas magnéticas centradas en las cordilleras oceánicas, si se supone que las rocas se han formado ahí, donde adoptan el magnetismo terrestre en el momento de su cristalización. El patrón bandeado sugiere que las franjas de fondo marino son desplazadas lateralmente y el nuevo material que allí se solidifica adquiere la dirección del campo terrestre del momento. Este mecanismo fue llamado *esparcimiento del fondo oceánico*.

Ya que el mecanismo supone la formación continua de nueva corteza oceánica, la pregunta es ahora: ¿cómo se distribuye esta corteza si la Tierra tiene una superficie constante, o peor aún, si se está contrayendo? Una solución sería suponer que la Tierra, en lugar de contraerse, se expande y así acomoda la

nueva corteza, pero tal conclusión acarrea más dudas que explicaciones. Así las cosas, Harry H. Hess (1906-1969) y Robert S. Dietz (1938-1995), científicos estadounidenses, propusieron que si la corteza se está creando en las cordilleras oceánicas, debe estar desapareciendo en otras regiones. Estos científicos propusieron que la corteza generada en las cordilleras oceánicas se desplazaba a lo largo de grandes áreas formando el fondo marino, y se sumía en las grandes trincheras oceánicas para desaparecer en el manto, que como veremos es la capa rocosa interna de la Tierra, de manera análoga a lo que sucede en las escaleras mecánicas cuyos escalones aparecen en un extremo y desaparecen en el otro.

Las ideas de Hess y Dietz explicaban también por qué hay poca acumulación de sedimentos en el océano y por qué la corteza marina es tan joven. Hess además sugirió que el océano Atlántico estaba creciendo, mientras que el Pacífico se estaba encogiendo, de manera que esto implicaba un movimiento de los continentes, tal como lo planteaba Wegener en su teoría de la deriva continental.

El paso siguiente fue sintetizar ambas teorías en una sola coherente. Dietz propuso que el movimiento de esparcimiento de la corteza oceánica se realizaba en una capa externa cuyo comportamiento era rígido como una *placa*, y con un espesor de alrededor de 100 kilómetros, a la que hoy se conoce como *li-*

tosfera (del griego *litos*, roca y *sfara*, esfera). Esto entraña una diferencia esencial con el modelo de Wegener, porque ahora el movimiento tanto de los continentes como del lecho marino se desarrolla en una capa más gruesa. Otras disciplinas aportaron evidencias necesarias para construir la nueva teoría unificada, a la que se llamó *tectónica de placas*. Por ejemplo, los sismólogos encontraron que las zonas en que la placa descendía hacia el manto, ahora llamadas zonas de *subducción*, son reveladas por la localización de los focos de los terremotos. Dichas zonas son los lugares donde ocurren la mayoría de los temblores globales y sobre todo los grandes terremotos.

La tectónica de placas en pocas palabras

La tectónica de placas comenzó a ser generalmente aceptada a principios de los años setenta. Pasarían varias décadas, sin embargo, antes de que quedara sólidamente sostenida con la fuerza de las observaciones y el desarrollo teórico.

Consideremos en primer lugar la estructura interna de la Tierra, que podemos ver en la figura 2. En el centro, con un radio de aproximadamente 3 mil kilómetros, se encuentra lo que se conoce como el núcleo terrestre, compuesto fundamentalmente por

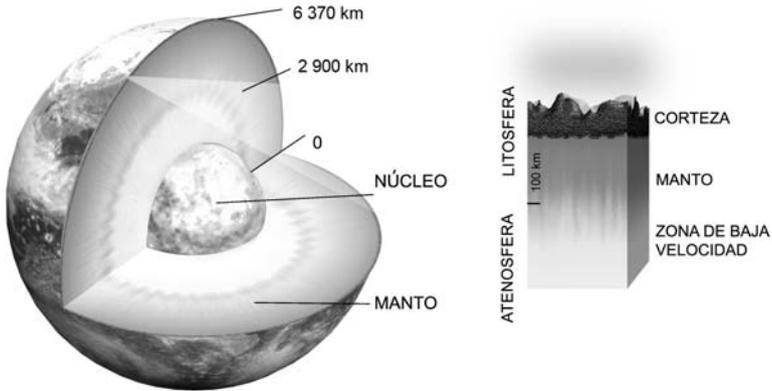


Figura 2. Estructura interna de la Tierra.

elementos metálicos como hierro y níquel. La siguiente capa está compuesta por rocas. Los geoquímicos infieren que son peridotitas, ricas en silicio y oxígeno, así como aluminio, magnesio y calcio. A esta capa se le llama *manto*, y junto con el núcleo forma casi el 100 por ciento del volumen de la Tierra, ya que su cascarón más externo, formado por las rocas que vemos bajo nuestros pies, y que constituye la corteza terrestre, sólo tiene espesores de entre 10 y 50 kilómetros (en la escala de la figura es más delgada que el grosor de la línea del dibujo). Las rocas de la corteza son de composición diferente a las del manto: entre ellas hay basaltos y granitos, rocas menos densas que la peridotita.

Los sismólogos, al estudiar la propagación de las ondas que causan los terremotos a través del interior de la Tierra, han encontrado que su velocidad

aumenta progresivamente con la profundidad, desde unos 7 kilómetros por segundo en la base de la corteza hasta unos 14 kilómetros por segundo cerca del núcleo. Esto es debido sobre todo a que a mayor profundidad las rocas se encuentran más comprimidas, por lo que sus átomos se encuentran más próximos entre sí y transmiten las ondas más rápidamente. Pero existe una zona en el manto, a profundidades entre 100 y 200 kilómetros, en que la velocidad disminuye en lugar de aumentar. La disminución se debe probablemente a que a esas profundidades y temperaturas las rocas se encuentran parcialmente fundidas.

La porción de manto por encima de la zona de baja velocidad y la corteza terrestre tienen propiedades mecánicas muy semejantes, es decir, se mueven conjuntamente. Por lo tanto, ambos, corteza y manto subyacente, forman una unidad con espesor aproximado de 100 kilómetros. Ésta es la capa conocida como *litosfera*, que es capaz de presentar movimientos como un sólido rígido flotando sobre el manto parcialmente fundido, al que se llamó *atenuosfera*. Tanto la corteza oceánica como la continental y el manto que se encuentra debajo, se mueven como un todo (véase figura 3).

La litosfera no es continua sobre la superficie de la Tierra: no es como la cáscara de una naranja que la cubre sin interrupción; más bien es como un balón de

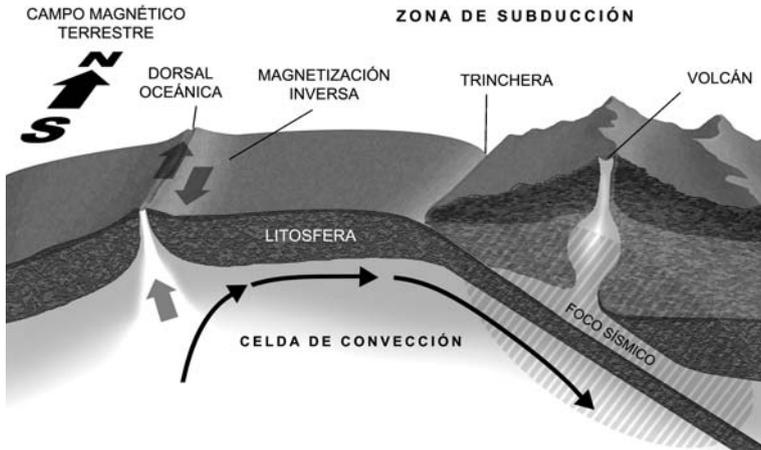


Figura 3. Corte de las placas.

fútbol, recubierto por secciones. Estas secciones que se mueven como elementos rígidos reciben el nombre de *placas*. Las placas sufren movimientos relativos, debidos a fuerzas de origen aún no completamente conocido, aplicadas a lo largo de las mismas. El movimiento relativo entre ellas se da porque en algunos de sus márgenes, sobre todo en las cordilleras oceánicas se está creando nueva litosfera, mientras que en otros márgenes se sumergen (*subducen*) bajo otra placa menos densa.

La mayoría de los científicos que han dirigido su atención a las causas del movimiento de las placas suponen que las fuerzas que producen los movimientos de las placas son debidas a movimientos en el manto y que son arrastradas por éste. Algo semejante sucede cuando se hierve agua. El fluido más cer-

cano a la fuente de calor se expande, se vuelve menos denso y tiende por lo tanto a subir a la superficie, donde se enfría y es desplazado hacia el fondo por el fluido ascendente. De esta manera se establece un proceso continuo de corrientes de ascenso y descenso del líquido, llamadas *celdas de convección*. Aunque el manto terrestre está compuesto por rocas, en su seno pueden presentarse corrientes de convección como en un líquido, si lo sometemos a fuerzas por tiempos muy largos. Si aplicamos a éste una tensión por un tiempo corto, la roca volverá a su posición inicial, es decir se comportará elásticamente. Si la tensión se aplica por un periodo prolongado de tiempo, la roca quedará deformada permanentemente, es decir, la roca se comportará plásticamente. Así se explican los pliegues de las rocas que observamos muchas veces en los cortes de las carreteras. Finalmente, si la tensión se aplica indefinidamente, la roca fluirá como un líquido.

El calor necesario para la convección en el manto tiene varios orígenes: una parte es el calor que quedó contenido en el planeta durante su formación; otra parte proviene de la compresión del planeta por su propia gravedad y, finalmente, la contribución más importante: el decaimiento de elementos radiactivos contenidos en las rocas, que aunque es una cantidad muy pequeña, dado el tamaño de la Tierra llega a ser una cantidad importante.

El movimiento de las placas nos habla de la existencia de una dinámica interna del planeta y justifica su designación como “planeta vivo”. Ahora sabemos que otros cuerpos de tipo terrestre del Sistema Solar ya no registran movimientos de placas, pero los tuvieron en el pasado.

La tectónica de placas y el territorio mexicano



Figura 4. Placas que afectan a México.

México es parte de una gran placa designada como placa de Norteamérica; bajo esta placa se están deslizando la placa de Cocos y la pequeña placa de Rivera (véase figura 4).

La sismicidad de nuestro país, cuya mayoría de epicentros tienen lugar en la costa occidental, se explica por este hecho. Los volcanes de la faja volcánica mexicana, al que pertenecen la mayor parte de nuestros volcanes activos, pueden explicarse también así. Aunque en este último caso existen aún algunas interrogantes, como el hecho de que la cadena volcánica no sea paralela a la trinchera, sino con cierta oblicuidad. Hacia el noroeste, bajo el Mar de Cortés, existe un sistema de fallas que han apartado la península de Baja California (perteneciente a la placa del Pacífico) del resto del continente (que pertenece a la placa de Norteamérica). Este sistema de fallas tiene su continuación más al norte y encuentra expresión en la famosa falla de San Andrés y otras fallas asociadas.

Epílogo

Al hablar de las ideas de Wegener nos remontamos unos 200 millones de años en el pasado, pero nuestro planeta, como hemos mencionado, es muchísimo más viejo; así que el lector se preguntará si la tectónica de placas es un proceso que ocurrió única-

mente en los últimos cientos de millones de años. La respuesta es no: dado que la causa fundamental del mecanismo es la transferencia de la energía interna del planeta, y ésta en el pasado fue incluso mayor, los procesos deben haber actuado a lo largo de la vida de la Tierra. La reconstrucción de ese pasado más remoto, sin embargo, es más difícil y sujeta a debate, porque las huellas del proceso son más escasas y menos claras. Por otro lado, el reciclamiento de la litosfera elimina progresivamente los restos de corteza más antigua y con ella la información que guardaba.

El proceso continuará en el futuro hasta que la Tierra agote su energía interna u otro proceso planetario termine con su curso. En 100 millones de años el mapa del mundo será muy diferente del actual; pero podemos vislumbrarlo con las herramientas que nos proporcionan los conceptos que hemos considerado. Éste es el poder de la ciencia: permitirnos reconstruir el pasado y darnos un atisbo del futuro.

Juan Manuel Espíndola Castro

Estudió física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Obtuvo el grado de doctor en la Purdue University, Indiana, EUA. Es investigador en el Instituto de Geofísica de la UNAM, en el Departamento de Vulcanología. Sus intereses se enfocan a los procesos físicos en volcanes activos y sismología volcánica. Ha realizado investigación sobre los volcanes activos mexicanos, particularmente el Chichón, Tacaná, Colima, Tres Vírgenes, Popocatepetl y San Martín Tuxtla.

LA CIENCIA ES CULTURA

La colección Ciencia de Boleto preparada por la UNAM para el Sistema de Transporte Colectivo, pretende que el público se acerque a la ciencia y la considere parte de su cultura. Quienes se preocupan de no fragmentar el conocimiento piensan que la divulgación de la ciencia de calidad es literatura y es arte. Gran cantidad de investigadores y divulgadores de la UNAM ponen su granito de arena para sacar a la ciencia de los laboratorios y las escuelas y llevarla a los usuarios del Metro. Esperamos que este esfuerzo resulte de su agrado. No sólo se puede aprender en los salones de clase y universidades, sino también en caminos subterráneos de nuestra ciudad y en movimiento.

Lee y devuelve CIENCIA DE BOLETO

SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO



GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
México, la Ciudad de la Esperanza



SISTEMA
DE TRANSPORTE
COLECTIVO