

A manera de introducción, una pregunta al lector. Recordemos lo que sabemos de la forma de la Tierra e intentemos responder, sin premura alguna: ¿cuál es el sitio más alto de la Tierra? La mayoría de las respuestas mencionan invariablemente al Monte Everest, una montaña caliza (carbonato de calcio) situada en los Himalayas orientales entre Nepal y Tíbet, a 27.6 grados de latitud N, cuyo pico está a 8 872 metros. Su nombre en tibetano es, utilizando nuestros caracteres, Qomolangma, y quiere decir: Diosa madre del mundo.

Pocos son los que contestan Mauna Kea (Montaña blanca), un volcán durmiente en la isla mayor de Hawaii (19.5 °N), cuya cima está a 4 205 metros y su base a 5 547 metros bajo el nivel del mar. Su mención se debe, esencialmente, a que es un excelente sitio para la observación astronómica. Y raro es que se mencione el Chimborazo, un pico volcánico en los Andes en Ecuador (1.3 °S), cuyo cráter está cubierto por una gruesa capa de hielo que, al derretirse en verano, desciende por la pendiente oriental hacia el Amazonas. Su cima se encuentra a 6 267 metros sobre el nivel del mar.

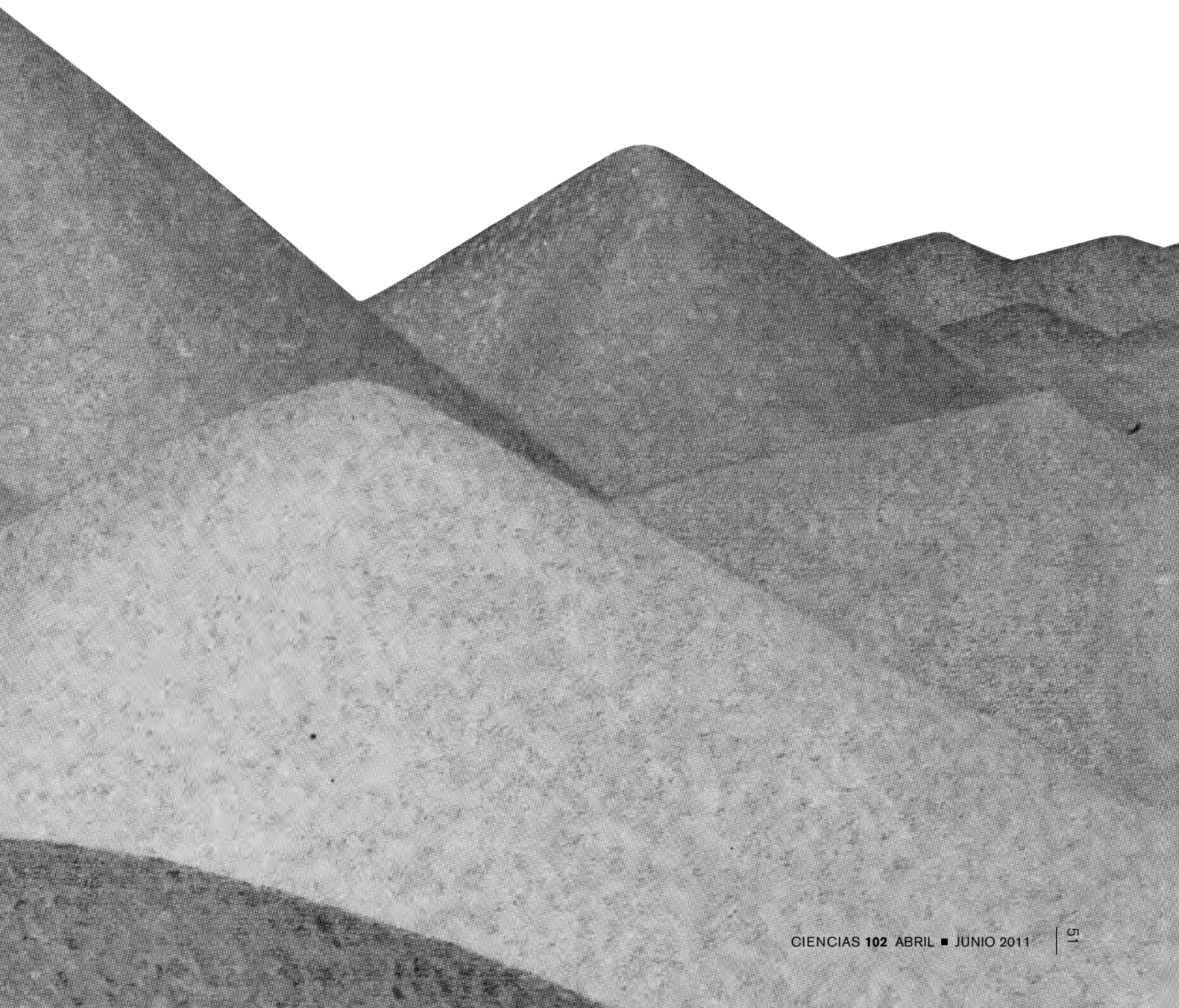
Ahora, se recordará que

la pregunta se hizo precedida de la sugerencia de recordar lo que sabemos de la forma de la Tierra. Por lo general, en las escuelas se enseña que la Tierra es un esferoide oblato, algo así como una esfera, un poco más ancha que alta. En la figura 1 se le muestra, un poco exagerada, la diferencia entre lo ancho y lo alto, así como la ubicación latitudinal aproximada de los tres sitios mencionados.

Con la ayuda de esta figura vemos claramente que la respuesta correcta dependerá de la base que se tome para medir la altura; es decir, si medimos respecto del nivel del mar, el Everest es el punto más alto en la atmósfera, pero si lo hacemos desde la base de las montañas, el más alto es el Mauna Kea, pues su altura desde el fondo del océano es de 9 752 metros. Finalmente, si queremos ser precisos, debemos medir desde el centro de la Tierra, entonces el sitio más alejado de dicho punto es el Chimborazo. La razón es evidente si volvemos la vista a la figura 1, pues la superficie de la Tierra se aleja más del centro mientras más se acerque uno al ecuador.

Antonio Sarmiento Galán

La **forma** de la **Tierra**



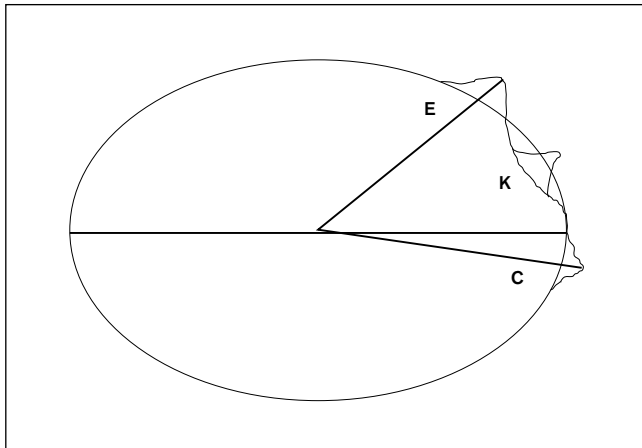


Figura 1. Everest (E), Mauna Kea (K) y Chimborazo (C), de acuerdo a su latitud en un esferoide oblatado exagerado.

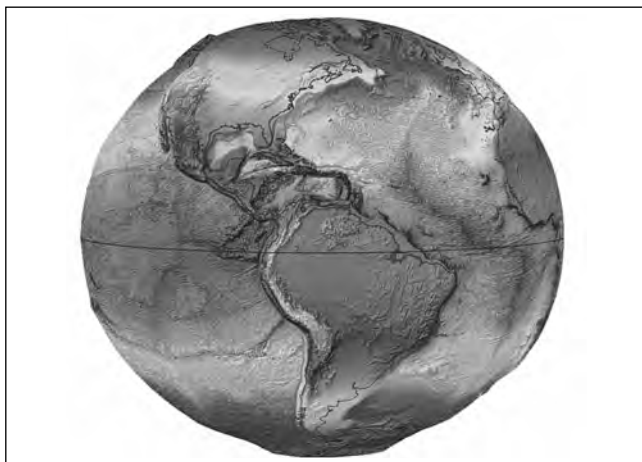


Figura 2. Cambios en la atracción gravitacional terrestre debidos a la eliminación de la fuerza centrífuga (no aparece el agua oceánica).

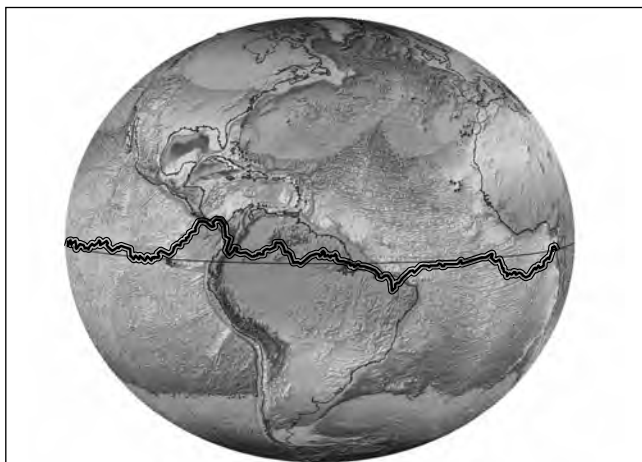


Figura 3. Aparición de los dos grandes océanos circumpolares y el enorme continente Ecuatorial.

Un poco de historia

Como es usual en la historia occidental, donde el crédito de descubrimientos o logros se otorga a una sola persona, en pocos sitios se ha registrado el nombre del sherpa que llevó a Edmund Hillary a la cima del Everest el 29 de mayo de 1953: Tenzing Norgay (1914-1986), un indo-nepalí, cuyo nombre original era Namgyal Wangdi, conocido como Sherpa Tenzing. Tampoco es frecuente que se mencione a Lhakpa Tenzing Sherpa, conocido como Sherpa Apa, quien en mayo de 2010 subió por vigésima vez al Everest —un récord que debería estar entre los más mencionados y conocidos en todo el mundo.

Sabemos entonces que la Tierra es un esferoide oblatado, pero ¿a qué se debe dicha forma? La rotación de la Tierra genera una fuerza inercial a la que llamamos fuerza centrífuga; ésta no es una fuerza real, sino que aparece por el hecho de que la Tierra está girando, es decir, es un sistema no inercial (de ahí el nombre de fuerza inercial) y su dirección es hacia afuera a partir del centro de la Tierra. Como el eje de rotación atraviesa los polos, éstos no giran, y por lo tanto la fuerza desaparece en ellos, pero su intensidad va aumentando a medida que nos alejamos de éstos y alcanza su máximo valor en el ecuador. Esta variación de la fuerza centrífuga por la latitud ha hecho que después de algunos miles de millones de años de rotar alrededor de su eje, la Tierra haya adquirido la forma de esferoide oblatado (o esfera aplanada).

Las medidas precisas de la forma oblatada de la Tierra indican que el eje ecuatorial es 21.4 km (0.33%) mayor que el eje polar. La primera consecuencia de esta forma de la Tierra es la variación en la aceleración de la gravedad por la latitud. Recordemos que, en una primera aproximación, la atracción gravitacional varía en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, es decir, mientras más cerca del centro, mayor es su valor. De esta manera tenemos que la variación en la aceleración de la gravedad por la latitud se debe a la disminución de la distancia al centro de la Tierra conforme aumenta la latitud. Los valores extremos son el famoso 9.78 metros/segundos² en el ecuador y el no tan conocido 9.83 m/s² en ambos polos. Esta variación ya ocasionó un famoso y vergonzante problema con un cargamento de oro enviado de Port Elizabeth, en Suráfrica, a Londres, cuyo peso cambió aun cuando no se había violado el cofre en el que el metal era transportado (el detalle del problema escapa a la intención de este trabajo y el lector acucioso podrá localizarlo fácilmente).

La demarcación entre continentes y océanos, lo que conocemos como el contorno de elevación cero respecto del nivel del mar, queda determinada por un balance entre dos fuerzas que mantienen un equilibrio muy frágil: la fuerza centrífuga causada por la rotación de la Tierra, hacia fuera, y la atracción gravitacional terrestre, hacia el centro de la Tierra. Aunque sabemos que el calentamiento global está causando un aumento considerable en el nivel de los océanos, en este trabajo nos restringiremos a la geometría de la Tierra y las enormes cantidades de energía que determinan el nivel de los océanos; los catastróficos efectos del calentamiento global se discuten en una gran cantidad de publicaciones de fácil acceso, como el informe elaborado por el IPCC en 2007.

La rotación de la Tierra es muy rápida, su velocidad tangencial alcanza un valor máximo de 1 667 km/hora en el ecuador, lo cual ocasiona que la profundidad promedio de los océanos en el ecuador sea de 8 kilómetros. Pero, ¿qué pasaría si la Tierra no girase sobre su eje?

La Tierra estática

¿Cómo sería la Tierra sin rotar?, es decir, una vez que la fuerza centrífuga ha desaparecido. La traslación alrededor del Sol y la inclinación del eje terrestre seguirían siendo iguales, por lo que la duración de un año sería la misma, pero un día duraría lo mismo que un año. Los cambios climáticos y geológicos serían catastróficos por la transformación de las superficies equipotenciales, pero lo que

nos interesa señalar es que ahora tendríamos que la atracción gravitacional es mayor en las regiones polares, intermedia en latitudes meridionales, y menor a grandes altitudes (figura 2).

Como el agua migra siempre hacia los sitios en donde la atracción gravitacional es mayor, esto es, a los sitios más cercanos al centro de la Tierra, esta situación hipotética causaría que toda la zona ecuatorial emergiese, dando origen a un continente ecuatorial enorme y a dos océanos polares (hacemos abstracción del efecto de los cuerpos celestes prominentes, como la Luna o el Sol, sobre el nivel de los océanos debido a la poca masa de la primera y a la gran distancia que nos separa del segundo).

La figura 3 muestra el resultado de las suposiciones hechas en el párrafo anterior. Si la Tierra fuese un esferoide perfecto, entonces la línea que delimitaría las áreas que hidrológicamente contribuirían a cada uno de los océanos debería seguir la del ecuador. Sin embargo, el relieve tanto de los continentes como del fondo de los océanos hace que dicha línea se desvíe notablemente (línea gruesa).

Volviendo a la pregunta del principio, en esta situación hipotética tendríamos que la altitud de los dos volcanes ecuatoriales, el Chimborazo (Ecuador) y el Kilimanjaro (Tanzania) sería de 13 615 y 12 786 metros, respectivamente. La figura 4 muestra el detalle de lo que sería el nuevo continente alrededor de nuestro país; curiosamente, la gráfica recuerda nítidamente la imagen de la Nueva España antes de las invasiones norteamericanas. Asimismo en la figura 5 se muestra la proyección del enorme continente





Figura 4. El hipotético océano circumpolar.

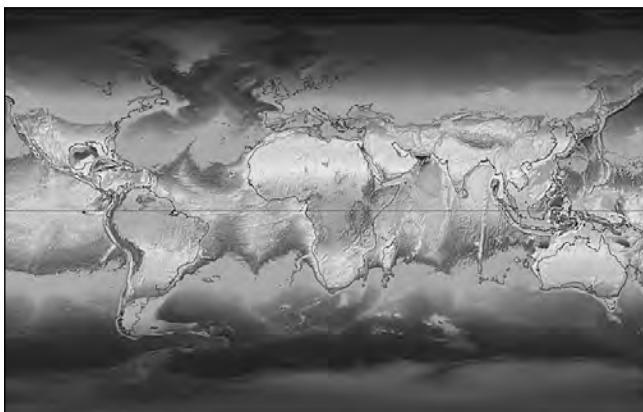


Figura 5. En esta situación hipotética, no existe conexión alguna entre los dos grandes océanos circumpolares; el enorme continente ecuatorial los divide.

ecuatorial y los dos océanos inconexos; las zonas cercanas al continente son someras mientras que las polares son muy profundas. Las antiguas planicies abisales y las trincheras oceánicas se convierten en mares interiores al nuevo continente.

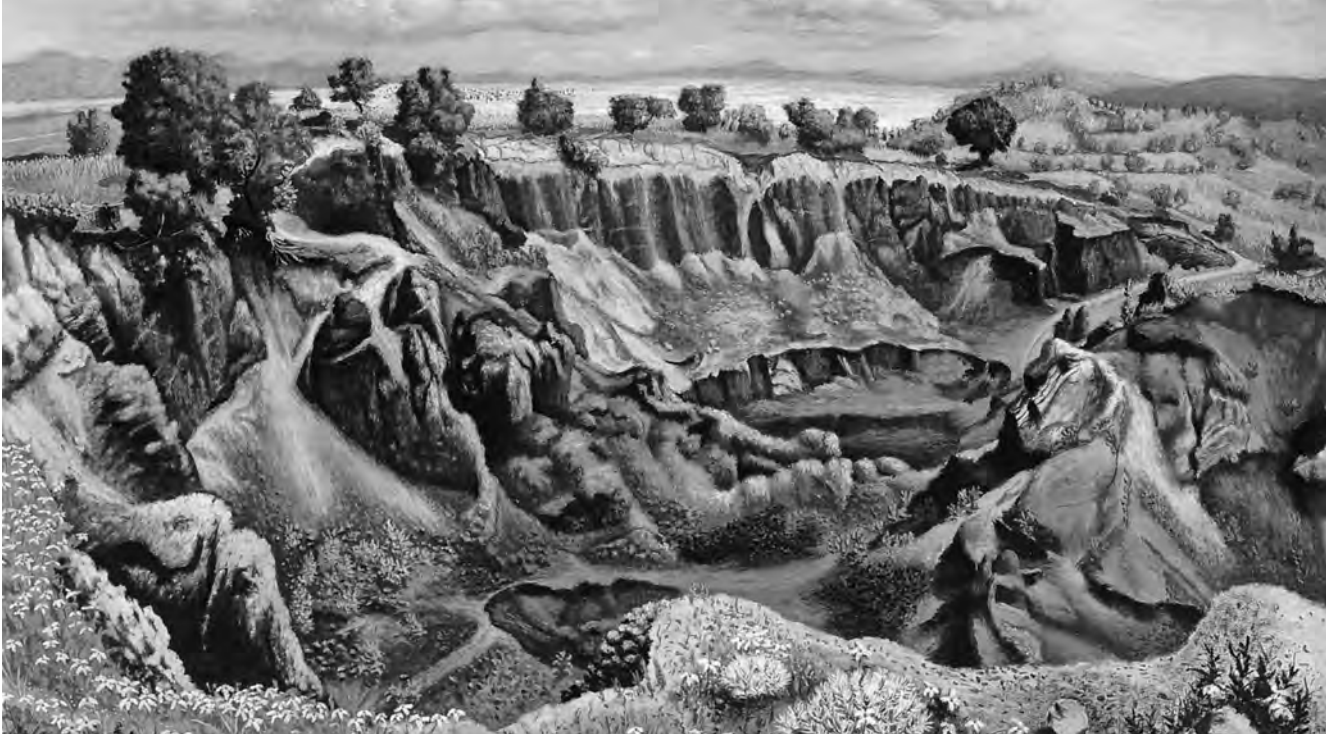
Con este experimento ficticio esperamos hayan quedado más claras la influencia y la magnitud de las fuerzas que en frágil equilibrio determinan el nivel de los océanos, así como la enorme cantidad de energía involucrada en dicho equilibrio.

El geode determinado vía satélite

Recientemente, dada la obsolescencia del World Geodetic System y la necesidad de conocer en detalle las diversas condiciones de nuestro planeta ante el calentamiento global, se han puesto en órbita varios satélites que nos permiten conocer, entre muchas otras cosas, la forma de la Tierra. El más reciente, conocido como el Explorador del campo gravitacional y la circulación oceánica estacionaria (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, GOCE), fue lanzado el 17 de marzo de 2009 por la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés). Su misión ha logrado un nuevo nivel en el conocimiento de una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza: el campo gravitacional terrestre.

Por ello se emplea el llamado geode, que es una superficie imaginaria sobre la cual el potencial gravitacional terrestre tiene un valor único, es decir, constituye la superficie horizontal definida como la superficie donde la atracción gravitacional terrestre en cualquiera de sus puntos es perpendicular a ella. El geode se puede pensar como el nivel de un océano global imaginario en ausencia de mareas, corrientes y vientos; es un sistema de referencia crucial para medir con precisión la circulación de los océanos, el cambio en su nivel y la dinámica del hielo —todos afectados por el calentamiento global.

El GOCE mide el campo gravitacional terrestre, y con los datos se modela el geode con una precisión y resolución espacial sin precedente alguno. El satélite no tiene partes móviles que pudiesen afectar su estabilidad al momento de realizar las mediciones del campo gravitacional; su órbita es la más baja jamás sostenida por un satélite durante lapsos grandes, 254.9 km, lo que obedece al hecho ya mencionado de que las variaciones gravitacionales son tanto más fuertes cuanto más cerca se está del centro de la Tierra. El aire residual a esta altitud causa que la órbita decaiga rápidamente; sin embargo, el GOCE nulifica en forma continua



la fricción mediante un motor que expulsa iones de xenón a velocidades superiores a 40 km/s, modulando la aceleración para mantener una altitud fija; además, su forma es la de un cuerpo delgado, de sección octagonal, de 5 metros de longitud por uno de ancho, configurado para reducir al mínimo tanto el arrastre aerodinámico del aire residual como la torca sobre el mismo (figura 6). Con todo ello se asegura que los sensores gravitacionales vayan en caída libre y que sólo registren el campo gravitacional y no las perturbaciones de otras fuerzas.

La figura 6 muestra esquemáticamente la información obtenida a partir de las mediciones del satélite. Se ilustra tanto la superficie del esferoide (1) como del geoide (3) que es determinado por las mediciones realizadas por el GOCE (2). El hecho de que esta última superficie esté determinada por un único valor del potencial gravitacional se muestra con una pelota que permanece estacionaria a pesar de que parezca como si el geoide tuviese una pendiente en donde se ha colocado dicha pelota (4).

La dinámica de los océanos (5) se logra medir actualmente vía satélite con una precisión sorprendente, y si recordamos que el geoide muestra el nivel que los océanos tendrían en ausencia de mareas, corrientes y vientos, resulta entonces que con sólo restar el geoide al comportamiento observado de los océanos podemos obtener la influencia que tales efectos tienen sobre la dinámica de éstos últimos (6). Es una información crítica para elaborar modelos de circulación global de los océanos, en los cuales se intenta representar la forma en que se realizan las enormes transferencias de energía alrededor del planeta.

En geofísica, la información derivada de los mediciones del GOCE podrá utilizarse para detectar lo que ocurre a grandes profundidades, sobre todo en sitios propensos a terremotos o erupciones volcánicas —desplazamientos de placas tectónicas, flujos subterráneos de lava (7). Uno de los beneficios más importantes de los datos obtenidos es el poder contar con un sistema universal que permita la comparación de alturas en cualquier lugar de la Tierra (8) —en la construcción de grandes obras, por ejemplo, permitirá saber en que dirección fluirá de manera natural el contenido de un ducto.

En sitios de acceso difícil, como los Himalayas o los Andes, las mediciones proporcionan nueva información; para la Antártida en particular, donde no es fácil medir las variaciones del campo gravitacional que son vitales para conocer el flujo de hielo y su dinámica ante el calentamiento global (9), la información es de importancia primordial, ya que intentar medir las variaciones de muy alta frecuencia por medio de aviones no sólo es imposible por la benéfica carencia de suficientes aeropuertos, sino indeseable por las consecuencias adicionales de la gran cantidad de vuelos que se realizarían sobre los glaciares que afectarían su dinámica.

La impresionante precisión de los gradiómetros gravitacionales, variaciones de una parte en diez billones de la gravedad terrestre, se logra con el uso de bloques de platino extremadamente uniformes que permiten la medida simultánea de seis desplazamientos.

Estas seis mediciones corresponden a los desplazamientos de los bloques en las direcciones usuales de los

sistemas de referencia y a los desplazamientos en las direcciones perpendiculares a ellas.

Los resultados de las mediciones preliminares realizadas durante los meses de noviembre y diciembre de 2009 muestran, por ejemplo, que en el Atlántico norte, cerca de Islandia, el geoide está a 80 metros por arriba del elipsoide, mientras que en el océano Índico se encuentra a 100 metros por debajo del elipsoide.

Otro de los resultados preliminares de las multitudinarias mediciones, esta vez en el campo de la geología submarina, es el hecho de que la Gran Bretaña, Irlanda y demás, no son en realidad islas, sino que se encuentran unidas a Europa. Esto permite entender también cómo fue posible construir en 1994 el túnel submarino que une a Inglaterra con Francia en el estrecho de Dover, cuya profundidad máxima es de sólo 75 metros.

La confirmación indirecta

Aunque orientado en sentido distinto, existe un experimento que realiza mediciones equivalentes y también lo hace vía satélite. Su propósito es el de comprobar las predicciones de la teoría general de la relatividad, que ya es biseccular o triseccular si se incluye el experimento de Albert Michelson y Edward Morley realizado en 1887 y la publicación de *La ciencia de la mecánica* de Ernst Mach en 1893, ambos íntimamente ligados. El experimento, llamado *Gravity Probe B*, está diseñado para medir el arrastre del espacio-tiempo alrededor de un objeto en rotación (gravitomagnetismo), propuesto por Josef Lense y Hans Thirring en 1918, un año antes de que ocurriese el eclipse solar que permitió a Frank Watson Dyson, Arthur Stanley Eddington y C. R. Davidson medir la desviación de la luz predicha por Albert Einstein en 1911.

Si la teoría es correcta, un giróscopo libre de toda interacción y en órbita alrededor de la Tierra deberá girar en la dirección de la rotación terrestre con una rapidez de 40.9 milisegundos de arco por año, es decir, poco más de 11 millonésimas de grado por año (figura 7). Para tener una idea de lo que ello significa, un milisegundo de arco es el ángulo subtendido por un cabello situado a 16.093 km de distancia, o bien, al observar desde París una moneda de un centavo de dólar norteamericano situada en la estatua de la Libertad, esto equivale a diez veces el tamaño del ángulo subtendido por el ojo de Lincoln en dicha moneda.

Las mediciones se llevan a cabo mediante cuatro giróscopos de cuarzo fundido con un diámetro de 3.81 ± 0.00000762

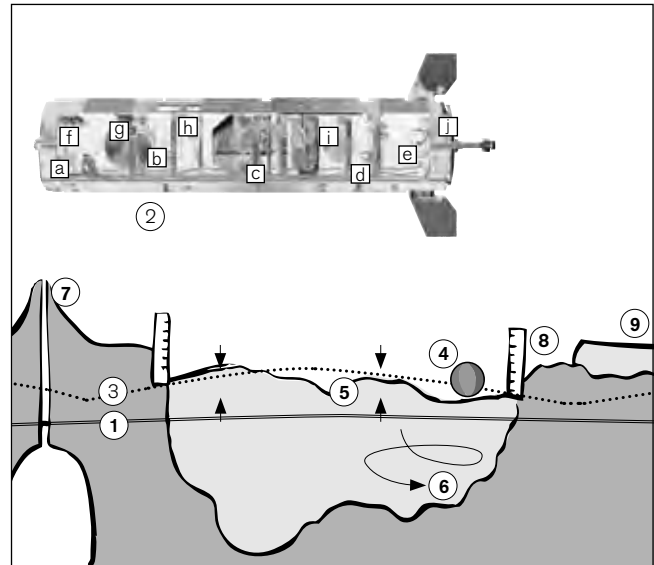


Figura 6. Esquema del conocimiento derivado a partir de las mediciones del GOCE. La línea continua (1) indica la forma del esferoide, la punteada (3) indica el geoide construido a partir de las mediciones del satélite (2); una pelota colocada sobre el geoide (4) permanecerá estática. El nivel conocido de los océanos (IPCC, 2007) (5) al compararse con las mediciones del GOCE (sin los efectos de las mareas, de las corrientes o de los vientos) revela el comportamiento de los océanos bajo la influencia de dichos efectos (6). Las mediciones también detectan el movimiento de magma (7) o la pérdida de hielo en los glaciares (9). Finalmente, contaremos con un sistema global para medir alturas, incluyendo la de los océanos (8) (GOCE, 2009).

Detalles del satélite GOCE. Las partes mencionadas en la parte superior, en el orden acostumbrado, son: impulsores iónicos (j), tanque de xenón (i), sensor estelar (h), tanque de nitrógeno (g) y fuente de poder (f); en la parte inferior: unidad de control de los impulsores (a), controles magnéticos de torca (b), gradiómetro gravitacional (el sensor principal) (c), receptor del sistema de posicionamiento global (d) y unidad de control general (e). (GOCE, 2009).

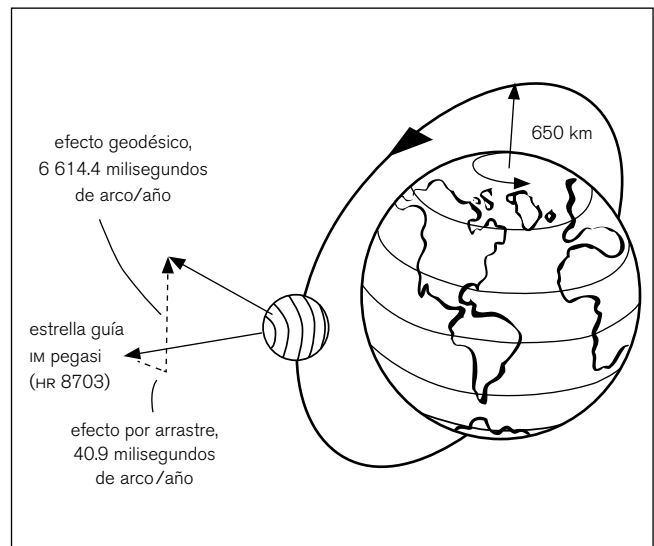


Figura 7. Arrastre gravitacional del giróscopo en caída libre debido a la rotación terrestre. También se ilustra el efecto geodésico o desviación del eje de rotación del giróscopo debido a la deformación del espacio-tiempo causada por la presencia de la Tierra.


centímetros, cubiertos con niobium, sometidos previamente a pruebas que garantizan la más alta homogeneidad, esfericidad mecánica y esfericidad eléctrica (dipolo nulo $\approx 10^{-6}$), jamás antes logradas. Se encuentran levitando eléctricamente suspendidos en cavidades que detectan sus desplazamientos (10^{-6} del centro), al alto vacío (10^{-11} torr), a muy baja temperatura (1.8 K) y girando a altas velocidades ($\omega \approx 5\,000$ rpm).

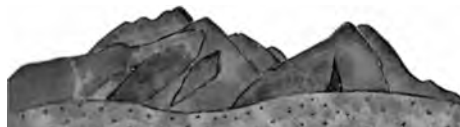
El sistema de giróscopos está totalmente aislado del exterior para evitar que sufra el efecto de alguna otra interacción, ya sea mecánica, eléctrica, magnética, térmica o de cualquier otro tipo conocido.

El satélite que lleva los giróscopos se encuentra en una órbita plana (sistema inercial) definida por el centro de la Tierra, su polo norte y una estrella guía (IM Pegasi o HR8703) respecto de la cual se miden los desplazamientos; el periodo orbital es de 97.5 minutos y su altura es de 645.35 km. Al movimiento del satélite en la órbita polar debe restarse los efectos debidos a las llamaradas y viento solares, los de la traslación de la Luna alrededor de la Tierra, de la trasla-

ción de la Tierra alrededor del Sol, del paralaje de la estrella guía y los movimientos de ésta respecto de estrellas muy distantes que se consideran fijas (en este caso el cuásar 3C454.3).

Para que pueda realizarse la medición de una magnitud tan pequeña con la precisión requerida necesitamos saber con enorme precisión cuál es el campo gravitacional generado por la Tierra. De manera que, como resultado adicional, el experimento proporciona un mapa detallado de las variaciones en dicho campo (ver mapa en la red en la página de GOCE).

A manera de conclusión, aun cuando actualmente sólo se conocen los resultados preliminares de ambos experimentos, podemos afirmar que sus mediciones se complementan y apuntan a una mutua corroboración. Esperemos que pronto se pueda contar con datos que permitan la producción de mapas con la precisión necesaria para la planificación de medidas de prevención en las regiones que muestren una mayor vulnerabilidad ante las inevitables consecuencias del calentamiento global. 



Antonio Sarmiento Galán
Instituto de Matemáticas,
Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- European Space Agency. 2009. *Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE)*, en www.esa.int/esaLP/LPgoce.html.
- Everitt, C. W. F. 2011 Gravity Probe B, en <http://einstein.stanford.edu/>.
- Fraczek, W. 2010. "If the Earth Stood Still, modeling the absence of centrifugal force", en *ArcUser*, Summer, pp. 62-68 (www.esri.com).
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

- Climate Change*, Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor y H. L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Londres.
- wgs. 1984. *World Geodetic System*, 1984, en http://en.wikipedia.org/wiki/World_Geodetic_System.

IMÁGENES

- Pp. 50-51: Luis García Guerrero, *Ferros*, 1990. P. 53: Luis Nashizawa, *Valle de México*, 1947. P. 54: Gerardo Murillo (Dr. Atl), *Vista del Popocatepetl*, 1935. P. 55: Amador Lugo, *Minas de arena*, 1951. P. 57: Carlos Mérida, *Imágenes de Guatemala*, 1928.

THE SHAPE OF THE EARTH

Palabras clave: altitud, gravedad, contorno de elevación cero, geoide.

Key words: Altitude, Gravity, Zero Elevation Contour, Geoid.

Resumen: El Explorador de campo gravitacional y la circulación oceánica estacionaria (GOCE, por sus siglas en inglés) es el encargado de medir el campo gravitacional terrestre y con los datos, modelar el geoide con la mayor precisión alcanzada hasta ahora.

Abstract: The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE) is used to measure the Earth's gravitational field, and with the data obtained, model the geoid with the highest degree of accuracy achieved to date.

Antonio Sarmiento Galán es egresado de la Facultad de Ciencias de la UNAM y del Queen Mary College de la Universidad de Londres. Laboró en el Instituto de Astronomía entre 1981 y 1999, y desde 2000 en el Instituto de Matemáticas, ambos de la UNAM.

Recibido el 21 de enero de 2011, aceptado el 25 de febrero de 2011.