



# La Tierra modelada por la gravedad

Mediciones precisas  
deforman la esfera  
perfecta vista desde  
el espacio

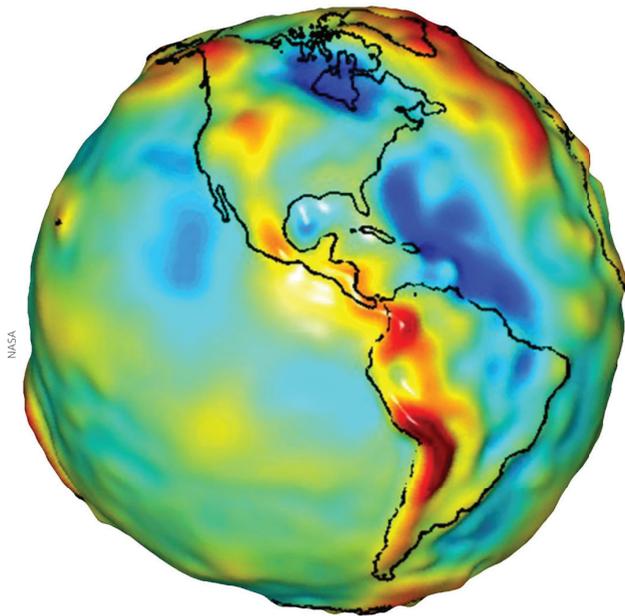
TEXTO **Carlos Fioravanti** FOTOS **Eduardo Cesar**

La gravedad, como ya lo hizo con Newton, continúa excitando la imaginación, y llevando a conclusiones que desorientan. Una de ellas indica que quien viaja en barco desde Ciudad del Cabo, en Sudáfrica, hasta Belén, en Pará, Brasil, recorre una imperceptible bajada. A causa de las diferencias de masa del planeta en el trayecto entre ambos lugares, y, por lo tanto, de las variaciones del campo de gravedad de la Tierra, el nivel del mar en el puerto del sur de Sudáfrica se ubica 70 metros por encima de la altura del mar registrada en el puerto de Belén. “Nadie nota ese desnivel porque la distancia entre Sudáfrica y Brasil es muy grande, de casi ocho mil kilómetros”, asegura el geofísico Eder Cassola Molina, profesor del Instituto de Astronomía, Geofísica y Ciencias Atmosféricas (IAG) de la Universidad de São Paulo (USP). “Además la superficie del mar es curva, ya que nuestro planeta tiene la forma aproximada de una esfera”, declara Molina, autor del mapa del Atlántico Sur que suministra estas conclusiones realizado el año pasado, en el marco de un concurso de libre docencia. Ahora, una versión más pequeña, en formato A4, está colgada en la puerta de uno de los armarios de su amplio laboratorio.

La fuerza gravitacional expresa la atracción física entre los cuerpos y varía en consonancia con la masa. Un ejemplo cotidiano de la acción de esa fuerza es la marea oceánica, resultado de la interacción gravitacional entre la Tierra, la Luna y el Sol, que hace que la Tierra se deforme diariamente. Capaz de actuar en cualquier punto del Universo, la fuerza de la gravedad hace que

los cuerpos en caída libre en las proximidades de la superficie terrestre sufran una aceleración de aproximadamente  $9,8 \text{ m/s}^2$ , o sea, su velocidad de caída aumenta  $9,8 \text{ m/s}$  por segundo. La aceleración de la gravedad varía sutilmente en cada punto de la Tierra, de acuerdo con el relieve y la densidad de las rocas de su interior, ya que la distribución de masa en la Tierra es heterogénea. De ahí se desprende un efecto interesante: “La distribución de masa de la Tierra controla el nivel en el que el agua del mar va a encontrarse en un determinado momento, pues la superficie instantánea del mar se ajusta en consonancia con el campo de gravedad. Así, tenemos altos y bajos en la superficie oceánica”, dice Molina. “El nivel del mar no es constante y varía con el tiempo y la localización geográfica. La verdad, ni tan siquiera existe un nivel del mar, sino un nivel medio o un nivel instantáneo del mar”.

En uno de los ordenadores próximo a las paredes, Molina muestra otro mapa, que detalla las variaciones de altura del agua en la costa brasileña. En ese mapa, publicado en diciembre de 2010 en la revista *Journal of Geodynamics*, una mancha roja al nordeste de la región nordeste de Brasil representa un área en la que el agua del mar estaría 10 metros por encima de las áreas que la rodean, marcada en verde y azul. “Con un mapa de esos a mano”, dice Molina, “el piloto de un barco podría desviarse de las áreas más altas, aunque no las vea y ahorrar tiempo y combustible”. Aunque útil, esa imagen no deja de ser un desafío para la imaginación, principalmente para la de los más escépticos, que dirán que nunca han visto una ladera por la que baja el agua en medio del mar.



Representación de la Tierra expresa fuerza de la gravedad, más intensa en las áreas en rojo

#### EN EL MAR Y EN LA TIERRA

Fernando Paolo, que ahora hace su doctorado en el Instituto Scripps de Oceanografía, en Estados Unidos, elaboró ese mapa en 2010, mientras Molina, que lo dirigía, preparaba el más grande. Las dos imágenes resultan de la suma de dos fuentes de información, una local y otra global. La primera son los aparatos que miden la variación del campo de gravedad, los gravímetros, instalados en boyas amarradas detrás de 300 barcos que recorrieron la costa de África y de Brasil en los últimos 30 años. La otra son medidores de la variación de la altitud del mar instalados en dos satélites, el Geosat, que la Marina de Estados Unidos lanzó en 1986, y el Satélite Europeo de Detección Remota (ERS-1), en órbita desde 1995. “Usando las dos fuentes de información, desarrollamos una metodología que nos permitió ver más, en algunas áreas, tales como la plataforma continental brasileña, que a los investigadores que estudian esa misma región usando sólo datos de satélites”, comenta Molina.

La medición de las variaciones de altura del agua del mar por medio de satélite, aunque parezca extraña a los marineros novatos, puede indicar la existencia de valles o colinas en la superficie oceánica no detectados por otros métodos, ya que no todo lo que el satélite examina fue evaluado mediante estudios batimétricos, bastante caros y trabajosos. En tierra, ese tipo de nivelación, efectuado por aparatos GPS (Sistema de Posición Global), que exige un buen conocimiento

del campo de gravedad, está sustituyendo a las mediciones de relieve por nivelación geométrica clásica, obtenidas por medio de equipos llamados teodolitos: cada medición indicaba las variaciones del relieve a la distancia de aproximadamente cada 100 metros, cubriendo pocos kilómetros por día. “Toda obra de ingeniería necesita datos precisos sobre altitud”, dice Denizar Blitzkow, profesor de la Escuela Politécnica de la USP. Los aparatos con los que él comenzó a medir las variaciones de la gravedad en São Paulo en los años 1970 están hoy en el futuro museo de la ingeniería civil, que se abrirá este año.

Esa forma de medir variaciones asociadas al campo de gravedad, sumada a otras técnicas, indicó depósitos de petróleo en regiones del nordeste, por ejemplo. La medida de la variación de masa, y de la fuerza y aceleración de la gravedad, directamente proporcionales a esa

masa, está también señalizando dónde puede haber minas o cavernas inexploradas, dilucidando detalles antes inexplicables de mapas geológicos, revelando diferencias en el espesor en la litosfera (la capa superficial de la Tierra) y, por último, mostrando cómo y dónde puede oscilar a lo largo del año la cantidad de agua de depósitos subterráneos en los grandes acuíferos. “Hasta hace pocos años”, dice Molina, quien comenzó a trabajar con gravimetría en el inicio de los años 1980, “todo eso era imposible”.

La información proporcionada por dos nuevos satélites europeos, el Grace y el Goce, está detallando las variaciones del campo de gravedad desde 2003 y permitiendo la construcción de una imagen más exacta, aunque un tanto incómoda, de las formas de la Tierra. Los griegos imaginaban la Tierra como una esfera perfecta, pero esa perfección se deshizo a medida que la posibilidad de que el planeta girarse continuamente se consolidaba durante el Renacimiento. Newton afirmaba que, a consecuencia del movimiento de rotación, la Tierra sería achatada. Visto desde espacio, el planeta continúa pareciendo una esfera casi perfecta, aunque los mapas hechos con base en la aceleración de la gravedad representen una Tierra deformada, a veces asumiendo una forma que recuerda un corazón. “Los satélites están mostrando que estábamos equivocados. Con las mediciones más recientes, verificamos que la Tierra es muy poco achatada”, dice Blitzkow. La medida del eje de la Tierra en el ecuador encogió 250 metros, pasando de 6.370.388 metros en 1924 a los actuales 6.370.136,5 metros. Desde 1982 Blitzkow trabaja con equipos del IBGE en mapas de la variación del campo de gravedad en todo el territorio nacional. La versión más reciente, que incluye a otros países de América del Sur, salió en 2010, mostrando que la fuerza o aceleración de la gravedad es más pequeña en el área que comprende Ceará, un poco de los estados vecinos y la región central del país, hasta el norte del estado de São Paulo.

#### EL PROYECTO

Gnss: Investigaciones y aplicaciones en el posicionamiento geodésico, en estudios relacionados con la atmósfera y en la agricultura de precisión - nº 2006/ 04008-2

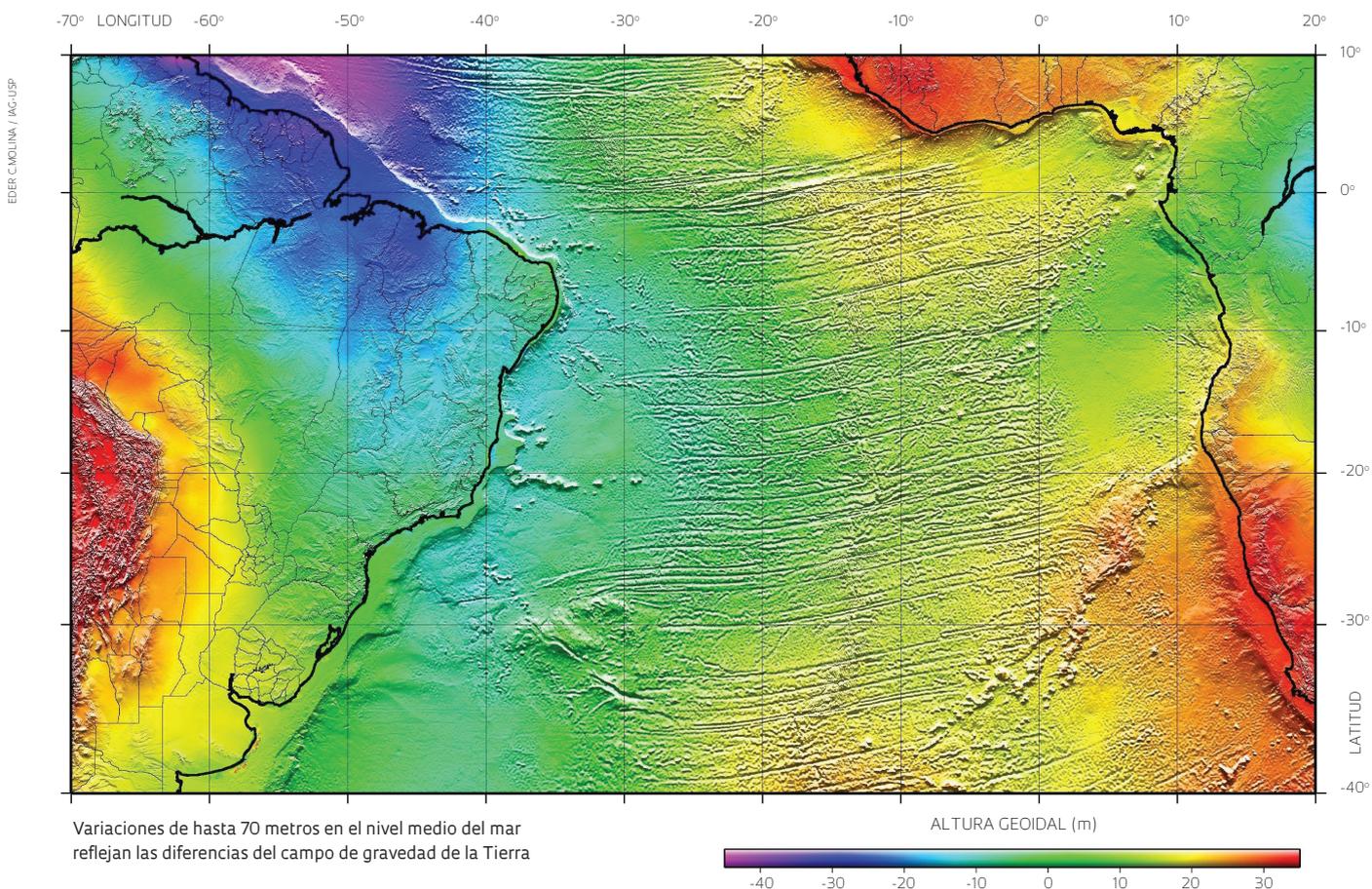
**MODALIDAD**  
Proyecto Temático

**COORDINADOR**  
João Francisco Galera Mônico - Unesp

**INVERSIÓN**  
R\$ 1.279.880,42 (FAPESP)

#### ANDES Y AMAZONIA

Pocos días antes de la Navidad de 2010, una semana antes del plazo final, Gabriel do Nascimento Guimarães presentó a Blitzkow la cuarta versión de un mapa más detallado, con las variaciones del campo de gravedad del estado de São Paulo, resultado de nueve mil puntos de



Variaciones de hasta 70 metros en el nivel medio del mar reflejan las diferencias del campo de gravedad de la Tierra

medición en tierra, complementados con información de los satélites Grace y del Goce. Ese estudio forma parte del doctorado de Guimarães y de un proyecto mayor, coordinado por João Francisco Galera Mônico, de la Universidad Estadual Paulista (Unesp) en Presidente Prudente, dirigido a la llamada agricultura de precisión, cuyo objetivo es conseguir las mejores condiciones de cultivo y cosecha.

Los mapas geodésicos, hechos a partir de las diferencias de elementos del campo de gravedad, ocultan las diferencias de relieve. En el mapa de la altura geoidal del estado de São Paulo el relieve presenta variaciones de sólo seis metros de altura de este a oeste, sin ninguna señal de las montañas de 1.200 metros de altura próximas al litoral. En el mapa de América del Sur las regiones más altas están en los Andes, pero con sólo 40 metros por encima del nivel cero, que corresponde al de la Amazonia.

El concepto de que la aceleración de la gravedad refleja la distribución de la masa ayuda a entender esas diferencias ahora tan pequeñas. “Los Andes, aunque con seis mil metros de altura, no tienen mucha más masa que Amazonia”, dice Blitzkow. “Si pudiéramos agarrar y pesar

## La fuerza de la gravedad tiene ahora nuevas aplicaciones. Sólo falta descubrir de dónde viene la gravedad

un cilindro de la superficie de una montaña de los Andes y otro de Amazonia, veríamos que la diferencia de peso no es tan intensa en lo que respecta a variación de altura.” En el mapa de altura geoidal de la Tierra, la cordillera del Himalaya no pasa de una pequeña colina. Construido por alemanes y norteamericanos, el Grace, abreviación de Gravity Recovery and Climatic Experiment, es un conjunto de dos satélites gemelos, separados 200 kilómetros entre sí, que fueron para el espacio en 2002. Por estar en una órbita baja, a

sólo 250 kilómetros de altura (otros satélites con funciones similares están a por lo menos mil kilómetros), éstos miden las más sutiles interferencias de montañas y valles de la Tierra sobre la trayectoria de cada uno de ellos: los equipos que van a bordo registran variaciones de milésimas de milímetros en la distancia entre ellos. El Goce, sigla de Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer, fue construido por la Comunidad Europea y lanzado en 2009 para registrar algo complementario, la variación de los diferentes elementos del campo de gravedad en relación con tres ejes preestablecidos. La aceleración de la gravedad está constantemente conquistando nuevas aplicaciones. El origen de la gravedad, sin embargo, a diferencia de otras fuerzas, como la electricidad y el magnetismo, aún es un misterio. Nadie sabe cómo el Sol atrae a la Tierra y, en proporción más pequeña, la Tierra atrae el Sol. ■

### Artículo científico

PAOLO, F.S.; MOLINA, E.C. Integrated marine gravity field in the Brazilian coast from altimeter-derived sea surface gradient and shipborne gravity. *Journal of Geodynamics*. v. 50, p. 347-54. 2010.