

# T I E R R A   D E S C O N O C I D A

## Determinación de su figura (II)

Por Angel Requena Villar

Coordinador de la Sección de Dobles-Variables

¿ Es plana o redonda? ¿ Se trata de un globo perfecto, un esferoide achatado o de una figura más compleja?. Estas cuestiones han ido inquietando desde tiempos ancestrales al hombre de ciencia y la respuesta hasta hoy mismo no ha sido del todo unánime y convincente. Actualmente y aún con los medios más avanzados la figura de la Tierra sigue siendo uno de los caballos de batalla para técnicos y científicos. Demos un breve recorrido en la situación actual y analicemos cuáles son los pasos a seguir en la línea de investigación marcada hasta la fecha.

“Apenas se reconoció que era curva se la supuso esférica; finalmente se reconoció que no era perfectamente redonda; se la supuso elíptica, ya que después de la figura esférica era la más sencilla que se le podía dar. Actualmente, las observaciones e investigaciones múltiples empiezan a hacer dudar de esta figura y algunos filósofos incluso sostienen que la Tierra es absolutamente irregular”. En 1756 D’Alembert escribía estas líneas en el capítulo “Forma de la Tierra” que redactó para la Encyclopédie. Apenas hacía veinte años que se había resuelto el debate sobre el achatamiento de la Tierra en los polos y ya la forma elíptica que se había tomado como forma más adecuada era demasiado sencilla y no servía. Pero todavía era demasiado pronto para juzgar y D’Alembert se remitía a los siglos futuros al añadir: “Se ve hasta qué punto la solución completa de este importante problema exige todavía discusiones, observaciones, investigaciones.[...] ¿ Qué partido tomar hasta que los tiempos nos proporcionen nuevas luces? Saber esperar y dudar.”

En la actualidad sabemos que, a la

escala de tiempos geológicos, el planeta se comporta como un fluido en rotación, al girar sobre sí mismo se achata en los polos por efecto de la fuerza centrífuga desarrollando en compensación un barrilete en el ecuador. La figura matemática por tanto más parecida a la Tierra claramente es un elipsoide. En los años treinta los geodestas definieron el “elipsoide de referencia” que representaba la mejor aproximación a la forma de la tierra con los datos de la época, esta definición evolucionaría con la realización de nuevas medidas.

Pero la verdadera nueva visión de las formas de la Tierra vendría del espacio.

Una  
Tierra redonda es la  
visión que solemos  
tener la mayoría. Sin  
embargo, a pesar de su  
aparente forma esférica,  
la Tierra presenta  
leves deforma-  
ciones que

En 1980, gracias a las observaciones de los satélites, se llegó a un acuerdo sobre las dimensiones del elipsoide de referencia; así se obtuvo que el radio ecuatorial mide 6.378,136 km. y supera al radio polar en 21,385 km. Esto da un achatamiento de 1/298,257. Estas nuevas informaciones también nos enseñan que la Tierra se adapta a la forma ficticia de este elipsoide barrigudo con una diferencia solamente de 100 m. ¿Qué representan estos 100 metros y cómo se han detectado?.

Un satélite en órbita alrededor de la Tierra está sometido a la atracción gravitatoria de la Tierra, la Luna, el Sol y los demás planetas, también está sometido a otras perturbaciones como el frenado de la atmósfera terrestre y también la presión de la radiación solar. Todas estas fuerzas determinan el movimiento del satélite pero la más importante es con gran diferencia la atracción de la Tierra, así la trayectoria seguida por el satélite refleja principalmente la acción del campo gravitatorio terrestre sobre éste. Si la Tierra fuese esférica y de densidad homogénea, esta trayectoria describiría una elipse de acuerdo con las leyes de Kepler; pero en la realidad este movimiento es mucho más complicado.

La hipotética elipse se transforma en otra deformada debido a la distribución heterogénea de las masas en la Tierra, naturalmente el efecto producido sobre el satélite nos muestra de una forma indirecta qué fuerzas actúan y de qué intensidad. Por consiguiente si analizamos las perturbaciones producidas podemos obtener todas las formas irregulares del campo gravitatorio, para ello se recurre a observaciones geodésicas entre una red de estaciones en el suelo y el satélite, son las medidas llamadas de seguimiento.

En la medición se utiliza la telemetría láser y el desplazamiento Doppler de las señales radioeléctricas emitidas por las estaciones y determinan con una precisión de centímetros la trayectoria del satélite.

Matemáticamente, el campo gravitatorio terrestre se describe en forma de una serie infinita de parámetros que traducen las desviaciones de la forma real



de la Tierra respecto al elipsoide de referencia (recordemos que es la mejor aproximación a la forma de la Tierra hasta ahora definida). Cada término de la serie describe una determinada escala espacial, por ejemplo, los primeros términos expresan variaciones a escala global mientras que los siguientes corresponden a anomalías cada vez menos extensas y de amplitud cada vez menor. Para obtener el máximo de información, es decir, determinar el máximo de parámetros, se tiene que utilizar las medidas de seguimiento de muchos satélites situados en órbitas de inclinaciones diferentes durante largos períodos de tiempo, es por ello que desde hace treinta años, una treintena de satélites geodésicos han permitido modelar el campo. Actualmente, con la precisión y el número creciente de datos, los modelos se perfeccionan; así por ejemplo el modelo norteamericano JGM-3 y el modelo francoalemán GRIM-4 determinan varios miles de parámetros a partir de millones de observaciones pertenecientes a treinta y cinco satélites. De esta forma se determinan con una precisión notable los detalles del campo gravitatorio a grandes y medianas longitudes de onda. Éstos se visualizan en forma de una superficie equipotencial llamada "geoide terrestre" la cual se define como la superficie normal en todos sus puntos a la dirección de la gravedad y coincidente con el nivel medio de los mares. Por tanto el geoide difiere del elipsoide de referencia por protuberancias y hondonadas.

Encontramos además, a lo largo de distancias de algunos miles de kilómetros, ondulaciones que pueden alcanzar 100 m. de amplitud. Dos grandes protuberancias, en las antípodas una de la otra, son particularmente notables, la primera y más importante está situada en Nueva Guinea, la segunda, de menor amplitud (aprox. 40 m.), engloba el Atlántico y África. Estas oscilaciones nos hablan de las grandes profundidades de la Tierra (aprox. 3.000 km.) relacionándose actualmente con el fenómeno de la convección térmica del manto terrestre.

Por otra parte, la tomografía sísmica nos proporciona una cartografía de las zonas del manto en las que la velocidad de las ondas sísmicas es anormalmente lenta o rápida. Estas anomalías negativas y positivas se encuentran en términos de regiones calientes y frías. Cuando se compara el geoide con los mapas tomográficos se observa una correlación entre posiciones de las grandes hondonadas y las protuberancias del geoide y las zonas frías y calientes del manto inferior. Como las zonas calientes son menos densas, tendrían que originar hondonadas en el geoide debido al déficit de masa, sin embargo se observa lo contrario. ¿Qué pasa?. En realidad, los ascensos de materia debidos a la convección y asociados a estas zonas calientes deforman las interfases del manto y la superficie de la Tierra, estas deformaciones topográficas crean excesos de masa, y esto es lo que se denomina la señal.

Por tanto el resultado es un saliente en el geoide en vez del entrante esperado, por lo que las ondulaciones del geoide atestiguan los grandes movimientos en el interior del manto terrestre. Así por tanto los dos amplios abombamientos del Pacífico occidental y del Atlántico corresponden a las zonas calientes del manto inferior y a las regiones de concentración de puntos calientes. La mayoría de estas grandes anomalías gravimétricas no están relacionadas con la topografía de la superficie, salvo en el caso de las zonas de subducción. Allí donde la materia fría se hunde, como a nivel de la fosa del Perú, el geoide atestigua la presencia de este material más denso a través de una anomalía positiva. A menor escala, entre 300 y 500 km., las anomalías reflejan la estructura más superficial de la Tierra, en particular de las placas litosféricas.

El carácter planetario y permanente de las observaciones espaciales sigue aportando una información cada vez más precisa sobre las formas de la Tierra, actualmente también permite medir sus variaciones con el tiempo, dicho de otro modo, más que una forma de equilibrio,

la geodesia espacial describe ahora los cambios de la superficie de la Tierra. Actualmente existen técnicas que detectan las deformaciones verticales y horizontales de la superficie terrestre, como los movimientos debidos a la tectónica de placas. Estas deformaciones varían desde 1-2 cm./año hasta los 15-20 cm./año. Con el sistema espacial DORIS (Determinación Precisa de Órbita y Radioposicionamiento Integrados por Satélite) se dispone de una red de estaciones en Tierra que cubre la casi totalidad de las grandes placas, los desplazamientos horizontales de las balizas DORIS, obtenidas con una precisión de algunos milímetros al año, muestran que los movimientos actuales de las placas son similares a los estimados a partir de las observaciones geológicas durante los últimos tres millones de años.

En cuanto a los cambios de la forma global de la Tierra, se miden por las variaciones significativas del campo gravitatorio con el paso del tiempo y, en particular, por la evolución del achatamiento terrestre. La observación precisa de la órbita de los satélites geodésicos durante al menos diez años indica una disminución de este achatamiento (del orden de 10-11 al año en valor relativo), fenómeno que está relacionado con la fusión del casquete glaciar que cubría el hemisferio norte hace 20.000 años durante la última glaciación. Al fundirse, hace unos 8.000 años, cambió la distribución de las masas en la superficie de la Tierra y produjo una descompresión viscosa del manto terrestre (que había sido fuertemente comprimida por la carga de hielo). Esta descompresión va unida de una elevación lenta de los escudos escandinavos y canadienses que todavía prosigue hoy en día y provoca una variación del achatamiento terrestre. La medida de esta disminución secular por medio de los satélites geodésicos permite observar la relajación del manto y determinar su viscosidad además de la actividad dinámica de la Tierra.