

RESPUESTA GRAVIMÉTRICA REGIONAL DE LA PLUMA MANTELAR HAWAIIANA

Emilio Padrino¹; Mariano Arnaiz-Rodríguez¹; Alexsay Rodríguez¹; Harnorl Alberto¹

Forma de citar: Padrino, E., Arnaiz-Rodríguez, M., Rodríguez, A., y Alberti H. 2015. Respuesta gravimétrica regional de la pluma mantelar hawaiana. Boletín de Geología, 37 (2): 17-23.

RESUMEN

Se presenta una interpretación gravimétrica regional en el Pacífico Norte con particular énfasis en las zonas adyacentes a la cadena de islas de Hawaii-Emperador. El propósito es verificar la ubicación de la pluma mantelar que se encuentra bajo la cadena de las islas hawaianas, así como una caracterización gravimétrica de otras estructuras importantes en la zona. Los datos utilizados en la investigación fueron extraídos de la base de datos de SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY, UC SAN DIEGO. Se construyó el mapa de Anomalia de Bouguer y se aplicó el filtro de continuación analítica hacia arriba con diferentes distancias para poder observar el comportamiento regional de la zona. Los mapas regionales muestran que la pluma mantelar se encuentra al suroeste debajo de Isla Grande, contrario a la creencia general de que se encuentra bajo ésta. La cresta de Necker y Las Montañas del Pacífico, así como las zonas de fractura de Clarion, Molokai y Murray presentan interesantes respuestas gravimétricas que podrían ser estudiadas en posteriores estudios ya que no han sido caracterizadas apropiadamente en estudios anteriores del área.

Palabras clave: gravimetría, campo gravimétrico regional, punto caliente, pluma mantelar, Hawaii

REGIONAL GRAVIMETRIC RESPONSE OF THE HAWAIIAN MANTLE PLUME

ABSTRACT

An interpretation of the regional gravimetric field of the Northern Pacific Ocean is presented, with particular emphasis on the region adjacent to the Hawaii-Emperor islands. The goal is to verify the location of the mantle plume that inhabits the mantle under the area. The data used in this research were extracted from the database of the SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY, UC SAN DIEGO. The Total Bouguer Anomaly was computed and Upward Continuation filter was applied to different heights to observe the regional behavior of the anomaly. The regional maps show that the mantle plume sits at the southwest of the Hawaii Big Island, in contradiction to the general believe that it is located underneath it. The Necker crest, the Pacific Ocean Mountains and the Clarion, Molokai and Murray Fracture Zones present interesting gravimetric response and are not properly characterized in previous studies.

Keywords: Gravimetry, regional gravimetric field, hot spot, mantle plume, Hawaii

¹ Departamento de Geofísica, Escuela de Geología Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, marianoarnaiz@gmail.com

INTRODUCCIÓN Y MARCO GEODINÁMICO GENERAL

Un punto caliente es una región anómala de gran actividad volcánica y deformación estructural en la litósfera (particularmente la corteza) que no puede ser asociada directamente con los procesos de la tectónica de placas (Turcotte and Schubert, 2001). Morgan (1971) atribuyó la existencia de estas zonas volcánicas a un grupo de estructuras cuasi-cilíndricas de material caliente y flotante que se eleva desde la base del manto hasta la base de la litósfera a las cuales denominó plumas mantelares. En tal sentido, una pluma mantelar representa una anomalía termal asociada a nucleación de rocas calientes en el límite núcleo-manto que

se eleva a través del manto de la Tierra y que eventualmente se transforma en una diapiri al tocar la corteza (Turcotte and Schubert, 2001). La cadena de islas volcánicas y de montes submarinos de Hawaii-Emperador que se extiende por el norte de la placa del Pacífico, representa el arquetipo de la interacción de una pluma mantelar con la litósfera oceánica. Dentro de este sistema, el conjunto de montes submarinos constituyen el *hotspot track*, un conjunto de edificios submarinos ubicados sobre una línea recta que son evidencia de la actividad de la pluma mantelar sobre la litósfera mientras la segunda deriva sobre la primera. Las islas recientes, cómo Isla Grande (FIGURA 1), representan la afectación actual de la pluma sobre la litósfera (Turcotte and Schubert, 2001).

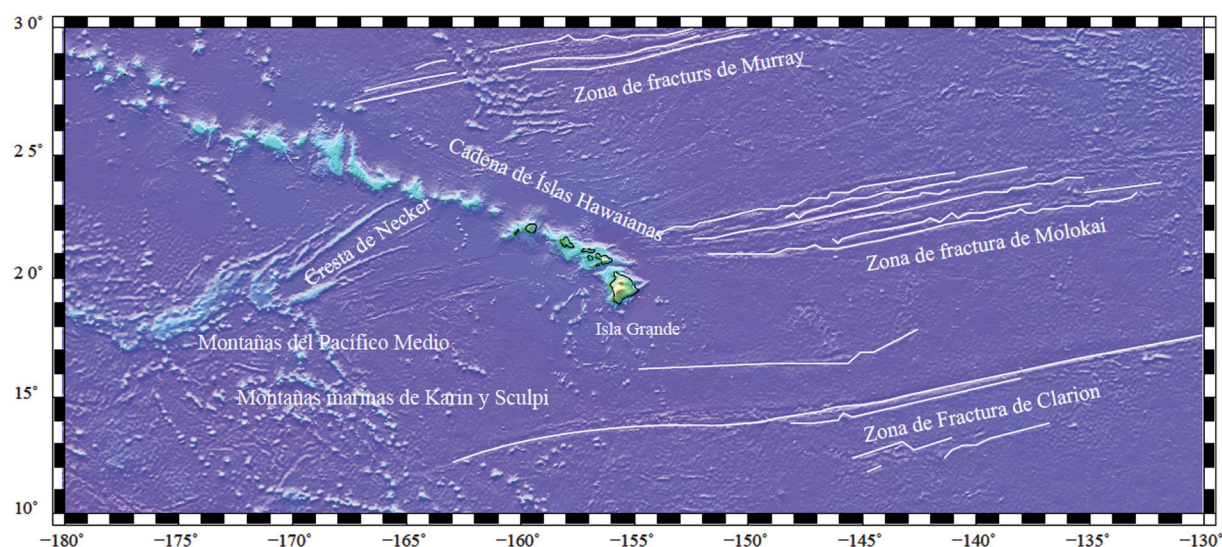


FIGURA 1. Mapa topográfico y estructuras tectónicas representativas en la zona de estudio.

A pesar de que persiste el debate sobre la existencia de estas estructuras, la observación de diversas anomalías geofísicas soporta su presencia en el manto de La Tierra. En general, anomalías termales, sísmicas, geodésicas y gravimétricas han sido ampliamente utilizadas para el estudios de estas estructuras, así como de las zonas de puntos calientes. La cadena de islas Hawaii-Emperador ha sido generosamente estudiada con distintos tipos de datos. En general se ha concluido que: (a) la afectación de la pluma mantelar sobre la litósfera genera gran cantidad de vulcanismo que da pie a la generación de la cadena de islas de Hawaii-Emperador, la cual a la vez fuerza a la litósfera oceánica a flexionarse bajo su peso (e.g Watts and Cochran, 1974; Watts, 1978); (b) la convención mantelar y la dinámica mantelar producto de la presencia de la pluma genera un alto topográfico y geoidal en la zona de cercana a las islas hawaianas

(e.g Watts, 1978; Zhong and Watts, 2002); y (c) existe una serie de anomalías de bajas velocidades asociadas a la composición química y temperatura del material de la pluma mantelar (Masters *et al.*, 2000; Lei and Zhao, 2006).

En tal sentido nos proponemos estudiar la respuesta regional de las anomalías gravimétricas en el centro-norte del Océano Pacífico, en las inmediaciones de la cadena islas volcánicas y de montes submarinos Hawaii-Emperador, localizadas entre las coordenadas 10° a 30° de latitud norte y 180° a 210° de longitud (FIGURA 1). Nuestro principal objetivo es caracterizar la respuesta gravimétrica de la pluma mantelar localizada en esta zona, cuya posición relativa con respecto a la cadena de islas ha sido ampliamente debatida en trabajos sismológicos (e.g. Masters *et al.*, 2000; Lei and Zhao, 2006).

METODOLOGÍA

Los datos gravimétricos utilizados fueron extraídos de la compilación publicada periódicamente por el Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California, San Diego (UC San Diego, EEUU; Sandwell and Smith, 2009). Se trata de un mallado de estaciones gravimétricas con espaciamiento de un minuto de arco y limitado entre las latitudes 80,738N y 80,738S. Para cada una de estas estaciones, se proporcionan las coordenadas en grados, con una resolución de 0,0167 (referenciadas al geoide WGS84), y el dato de gravedad en forma de

anomalía de aire libre, con una precisión de 0,1mGal ($1 \times 10^{-3} \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$). El instituto provee además un mallado de topografía con una precisión de 1 min de arco, cuyas localizaciones coinciden con las estaciones gravimétricas. Un total de 2.661.778 puntos de mediciones se localizan dentro de la ventana de estudio seleccionada. Con estos se construyó el mapa de Anomalía de Aire Libre (FIGURA 2) para observar los cambios de gravedad debido a variaciones en la elevación presentes en el lugar, interpretar la localización de las masas más importantes que cargan la litósfera oceánica y así verificar las características de los datos.

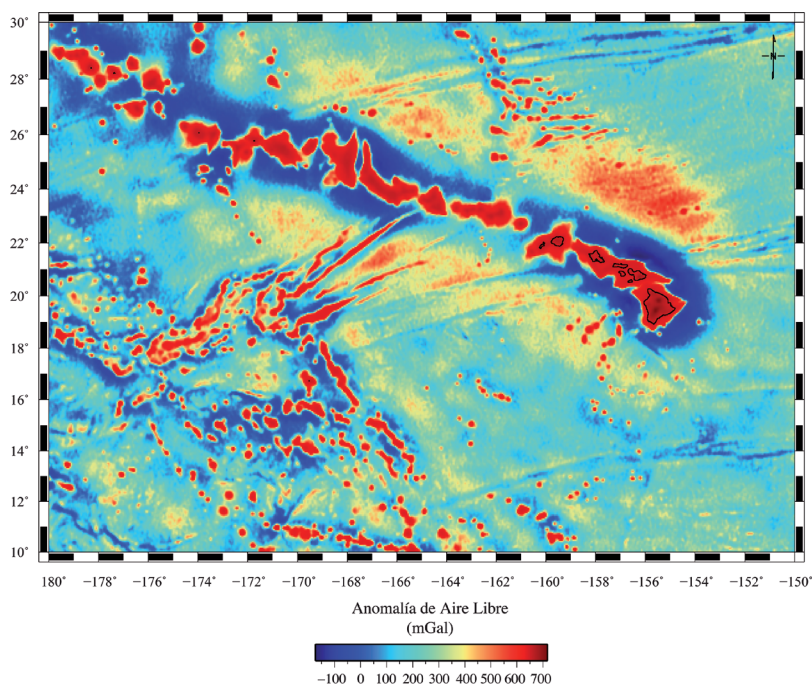


FIGURA 2. Mapa de Anomalía de Aire Libre de la cadena de islas Hawaii-Emperador.

Seguidamente, se calculó el valor de la corrección de Bouguer y la corrección topográfica bajo los lineamientos propuestos para este tipo de datos por Arnaiz-Rodríguez y Garzón (2012). De tal manera se consideró como nivel de referencia el nivel medio del mar (0 m.s.n.m.) y se emplearon como densidades de reducción: $2.670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ para la corteza continental y $1.030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ para el agua del mar (FIGURA 3). La corrección topográfica fue calculada haciendo uso de los algoritmos incorporados en el programa Oasis Montaj v.7.1 (Geosoft Inc., 2007). Estos algoritmos se basan en las soluciones expuestas por Hammer (1939), Bible (1962), Kane (1962), Nagy (1966) y LaFehr (1991). Es necesario destacar que debido al carácter regional del estudio, los llamados “nuevos estándares de gravimetría” (Hinze *et al.*, 2005) fueron descartados por no generar aportes significativos a las anomalías de Bouguer en la escala utilizada (e.g. Argast *et al.*, 2009; Arnaiz-Rodríguez y Garzón, 2012).

Para estimar la profundidad máxima a la que se pueden hacer interpretaciones, se estimaron las profundidades de las fuentes gravimétricas más representativas, utilizando un modelo de prismas rectangulares (FIGURA 4; Spector and Grand, 1970). Con el fin de aislar progresivamente la respuesta regional y de esa manera identificar apropiadamente la anomalía gravimétrica que debe producir la pluma mantelar, se utilizó el método de la continuación del campo gravimétrico hacia arriba para generar una serie de mapas regionales del área de estudio. Esta técnica permite proyectar un campo potencial (ya sea gravimétrico o magnético) a un nivel más alto de observación, filtrando de forma eficiente los datos para obtener información regional (Jacobsen, 1987). En tal sentido se proyectó el campo gravimétrico a 440, 550, 670, 780, 890 y 1.000 km de altura (FIGURA 5).

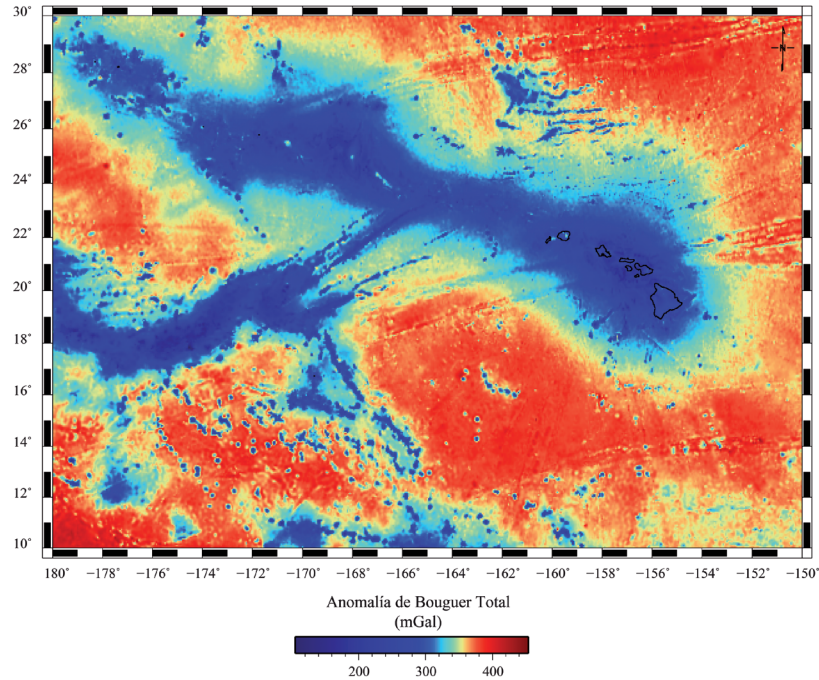


FIGURA 3. Mapa de Anomalia de Bouguer de la cadena de islas Hawaii-Emperador con densidad de reducción 2.670 kg/m^3 y nivel de referencia 0 m.s.n.m.

Finalmente, proceso de mallado y las imágenes de los datos (mapas de anomalías) fueron generados utilizando el software GMT (Generic Mapping Tool; Wessel and Smith, 1991). El algoritmo seleccionado para la interpolación de los datos de Anomalías de Aire Libre (FIGURA 2) y Anomalías de Bouguer (FIGURA 3) fue el de mínima curvatura, el cual es ampliamente usado en las ciencias de La Tierra, pues genera la superficie más suave.

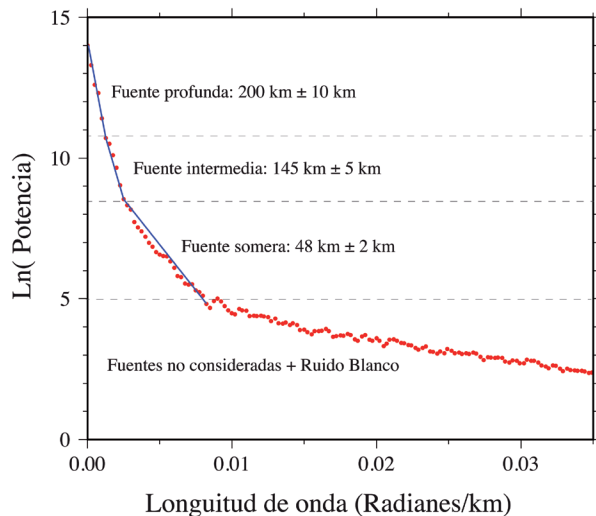


FIGURA 4. Espectro de potencia de la Anomalia de Bouguer y las profundidades asociadas a las distintas fuentes gravimétricas según un modelo de prismas horizontales

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El mapa de Anomalías de Aire libre (FIGURA 2) permite constatar que alrededor de la cadena de islas yace un conjunto de cuencas flexurales (de ante-país), con una familia continua de nodos de flexión asociados a esta. La presencia de estas estructuras es evidencia de la importante carga que representa la cadena de islas sobre una litósfera termalmente afectada como la de la Placa del Pacífico (*e.g* Watts and ten Brink, 1989). Adicionalmente el mapa revela que existe una complejidad estructural significativa en la Cresta de Necker, en las montañas del Pacífico Medio y en las montañas marinas de Katrin y Sculpi (FIGURA 1), en general poco consideradas en los estudios de esta zona.

El mapa de Anomalia de Bouguer (FIGURA 3), evidencia los importantes contrastes de densidades existentes en la zona. Los valores de Anomalia de Bouguer oscilan desde 230 mGal hasta 390 mGal aproximadamente (valores típicos para corteza oceánica normal), donde los valores máximos están claramente relacionados a la corteza oceánica delgada de la placa pacífica, mientras que los valores mínimos se relacionan particularmente con la raíz generada por la flexión de la placa pacífica bajo la carga de las islas hawaianas. En éste mapa, se evidencia la continuidad de las islas hawaianas en el subsuelo, que

la evidencia como una estructura que ha sido cubierta por sedimentos, más que un conjunto independiente de islas como son usualmente representados los *hotspot tracks*. Conjuntamente, se observa que la distribución de las anomalías negativas bajo las islas y a su alrededor respaldan la existencia de un sistema de compensación regional de la litósfera donde, posiblemente, existen dos puntos donde la raíz isostática (flexural) se profundiza más que en el resto de la cadena bajo la isla de Lanai (-156.5° de longitud y 21° de latitud) y en un punto intermedio dentro del *hotspot track* (-168° de longitud y 25° de latitud). El primero de ellos se encuentra estrechamente relacionado, de acuerdo a Nataf (2000), con el punto caliente que genera la actividad volcánica de la cadena de islas.

En el mapa de Anomalías de Bouguer también se observa la respuesta gravimétrica de las zonas de fallas que se encuentran alrededor de la cadena de las islas hawaianas, las cuales fueron descritas como fallas transcurrentes por Rubin *et al.* (1999), entre 25° y -30°

de latitud norte, y -200° y -210° de longitud; 15°-25° de latitud norte y 185°-195° grados de longitud oeste. La cresta de Necker y las islas del Pacífico Medio presentan el mínimo gravimétrico más importante, relacionado a su comportamiento isostático. La relación Anomalia de Aire Libre positiva y la localizada Anomalia de Bouguer negativa revelan un sistema compensado en su totalidad por isostasia local. Como la corteza en la zona es al menos 2,5 veces más gruesa que la del resto del Pacífico, se puede suponer que el sistema de compensación es tipo Airy, respaldando así los resultados obtenidos por Kellogg and Ogujiofor (1985).

El análisis en frecuencia de los datos gravimétricos nos permite estimar la máxima profundidad de observación de la información disponible. El gráfico del espectro de potencia radialmente ponderado (FIGURA 4) nos provee la información que nuestro límite de observación es de unos 200 km de profundidad. En consecuencia nuestros datos responden a la distribución de densidades dentro de la litósfera y de la astenósfera.

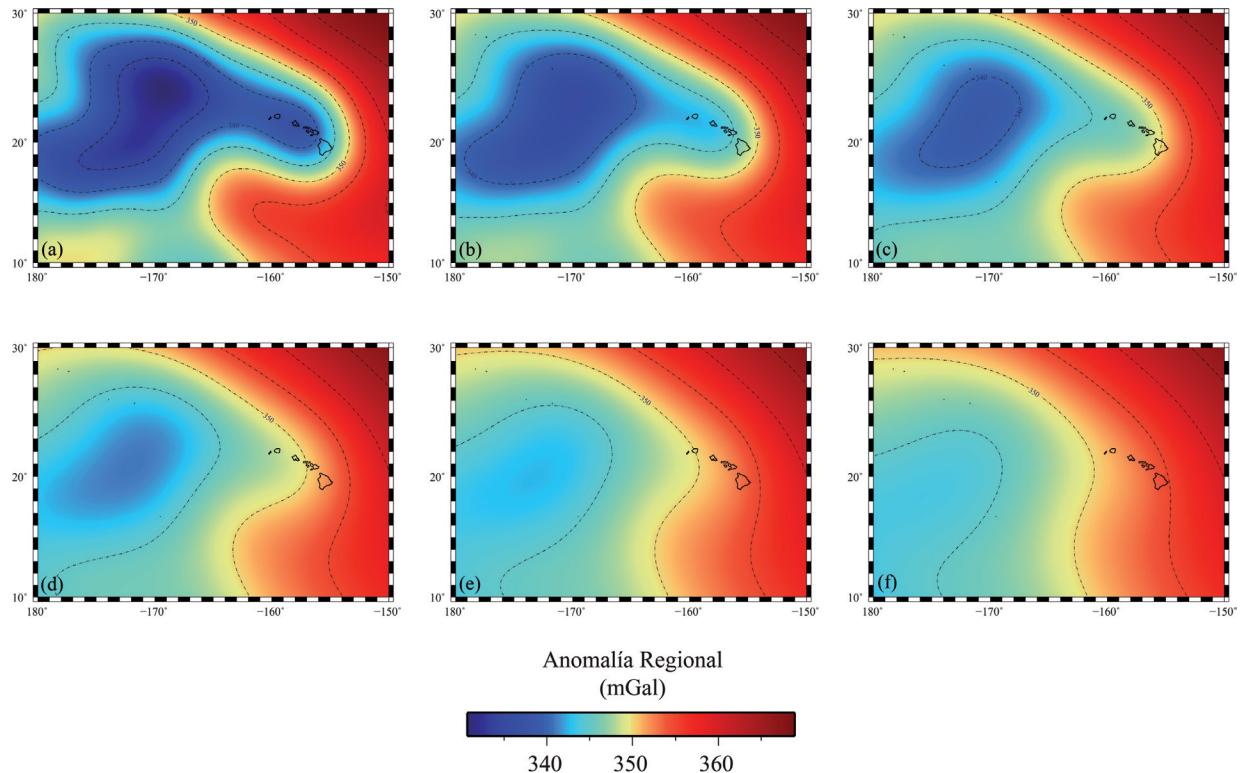


FIGURA 5. Continuaciones analíticas del campo hacia arriba en la zona de estudio: (a) 440, (b) 550, (c) 670, (d) 780, (e) 890 y (f) 1.000 km, respectivamente.

Como se ha expresado con anterioridad, para el estudio del comportamiento regional de la zona se construyeron seis mapas de continuación analítica del

campo hacia arriba a 440, 550, 670, 780, 890 y 1.000 km de altura. La FIGURA 5 muestra, para una mejor visualización, los mapas de continuación analítica

hacia arriba en un mosaico de mapas donde se puede observar la presencia de una anomalía negativa de larga longitud de onda que se relaciona a la respuesta combinada de la isostasia de las islas hawaianas, de las cadenas montañosas, y de la pluma mantelar. A medida que se aumenta la altura, la respuesta gravimétrica-isostática de las cargas corticales se ve atenuada poco a poco. Finalmente, a 890 y a 1.000 km, la respuesta de las estructuras no mantelares se ve completamente filtrada, dejando así la respuesta gravimétrica asociada a la presencia de la pluma mantelar que alimenta al punto caliente de las islas hawaianas.

Se puede observar entonces que los datos gravimétricos parecen indicar que la “chimenea” de la pluma mantelar se encuentra desplazada ligeramente hacia el suroeste con respecto a la posición actual de Isla Grande, la cual es considerada usualmente como la ubicación inequívoca de ésta. Estos resultados se encuentran respaldados por datos tomográficos de ondas corpóreas entre 200 y 900 km de profundidad (FIGURA 6), en donde se muestra una anomalía de bajas velocidades al oeste de las islas hawaianas asociadas a la posición de la pluma mantelar (Masters *et al.* 2000; Ritsema *et al.*, 2004; Lei and Zhao, 2006).

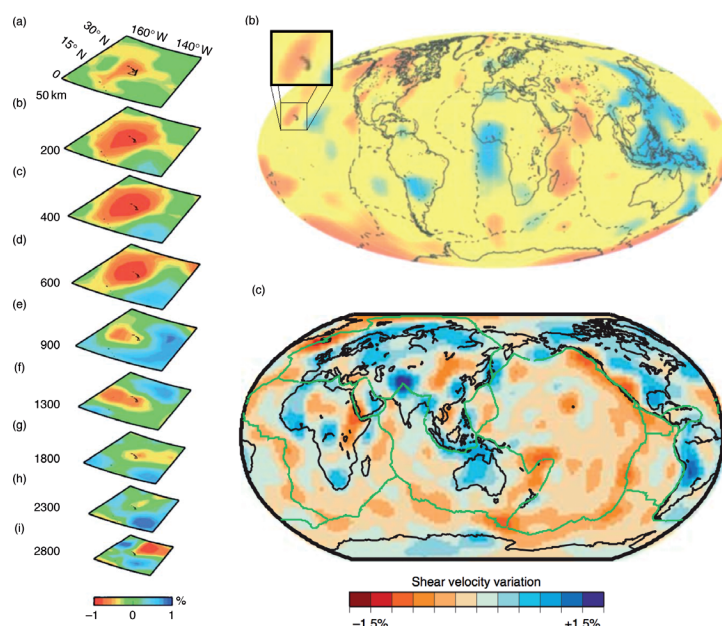


FIGURA 6. Imágenes tomográficas que respaldan nuestros resultados. (a) Tomografía de ondas P a diferentes niveles (Lei and Zhao, 2006). (b) Tomografía de ondas S a 600 km de profundidad (modificado de Masters *et al.* 2000). (c) Tomografía de ondas S a 120 km de profundidad (Ritsema *et al.*, 2004). Todas las imágenes tomográficas favorecen nuestra interpretación sobre la localización de la pluma mantelar.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego del estudio gravimétrico de la cadena de islas hawaianas, se puede concluir:

Existe un gran número de fallas transformantes en el área de estudio, las cuales poseen claras respuestas gravimétricas. Se observa que la cadena de islas hawaianas se encuentra fallada en la zona central.

La compensación isostática de las islas hawaianas es de tipo regional generando un sistema de cuencas flexurales alrededor de éstas.

La compensación isostática de la cresta de Necker y las montañas del Pacífico Medio es local y de tipo Airy.

La pluma mantelar que genera la actividad volcánica de las islas hawaianas, se encuentra en la zona oeste de éstas (180°-195° de longitud y 15°-25° de latitud norte), contrariamente a lo descrito en investigaciones realizadas anteriormente en el área, donde se ubica la pluma mantelar justo debajo del punto caliente de la parte más al sur de Isla Grande. Otros resultados sismológicos apoyan nuestras conclusiones.

REFERENCIAS

Argast, D., Bacchin, M., and Tracey, R. 2009. An extension of the closed-form solution for the gravity curvature (Bullard B) correction in the marine and airborne cases. ASEG Extended Abstracts 2009 (1): 1–6.

- Arnaiz-Rodríguez, M.S., y Garzón, Y. 2012. Anomalías gravimétricas del Caribe. *Inter ciencias*, 37(3): 172–182.
- Bible, J. 1962. Terrain correction tables for gravity. *Geophysics*, 27: 715-718.
- Hammer, S. 1939. Terrain corrections for gravimeter surveys. *Geophysics*, 9: 184-194.
- Geosoft Inc. 2007. Oasis Montaj. En <http://www.geosoft.com/products/oasis-montaj>
- Hinze, W.J., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B., Dater, D., Flanagan, G., Forsberg, R., Hilden-Brand, T., Keller, G.R., Kellogg, J., Kucks, R., Li, X., Mainville, A., Morin, R., Pilkington, M., Plouff, D., Ravat, D., Roman, D., Urrutia-Fucugauchi, J., Véronneau, M., Webring, M., and Winchester, D. 2005. New standards for reducing gravity data: the North American gravity database. *Geophysics*, 70: J25-J32.
- Jacobsen, B.H. 1987. A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps: *Geophysics*, 52: 1138–1148.
- Kane, M.F. 1962. A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics*, 27: 455-462.
- Kellogg, J.N., and Ogujiofor, I.J. 1985. Gravity field analysis of SioGuyot: An isostatically compensated seamount in the Mid-Pacific Mountains. *Geo-Marine Letters* 5(2): 91-97, doi: 10.1007/BF02233933.
- LaFehr, T. 1991. An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction. *Geophysics*, 56: 1179-1184.
- Lei, J., and Zhao, D. 2006. A new insight into the Hawaiian plume, *Earth and Planetary Science Letters*, 241: 438-453.
- Masters, G., Johnson, S., Laske, G., and Bolton, H. 2000. A shear velocity model of the mantle, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A354: 1385-1411.
- Morgan, W. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230: 42 – 43.
- Nagy, D. 1966. The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, 31: 362-371.
- Nataf, H. 2000. Seismic imaging of mantle plumes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 391–417.
- Ritsema, J., Van Heijst, H.J., and Woodhouse, J.H. 2004. Global transition zone tomography. *Journal of Geophysical Research*, 109: B02302, doi:10.1029/2003JB002610.
- Rubin, A., Gillard, D., and Got, J. 1999. Streaks of microearthquakes along creeping faults. *Nature*, 400: 635–641.
- Sandwell, D.T., and Smith, W.H.F. 2009. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge Segmentation versus spreading rate. *Journal of Geophysical Research*: 114: B01411, doi:10.1029/2008JB006008.
- Spector, A., and Grant, F.S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35: 293–302.
- Turcotte, D.L., and Schubert, G. 2001. *Geodynamics*, 2nd ed. Cambridge University Press, New York, 456p.
- Watts, A.B., and Ten Brink, U.S. 1989. Crustal structure, flexure, and subsidence history of the Hawaiian islands, *Journal of Geophysical Research*, 94: 10473-10500.
- Watts, A.B. 1978. An analysis of isostasy in the world's oceans: 1. Hawaiian-Emperor Seamount Chain. *Journal of Geophysical Research*, 83: 5989-6004.
- Watts, A.B., and J.R. Cochran. 1974. Gravity anomalies and flexure of the lithosphere along the Hawaiian-Emperor seamount chain, *Geophys. J. Roy. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 38: 119-141.
- Wessel, P., and Smith, W.H.F. 1991. Free software helps map and display data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 72: 441–446.
- Zhong, S., and Watts, A.B. 2002. Constraints on the dynamics of mantle plumes from uplift of the Hawaiian Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 105-116.

Trabajo recibido: mayo 29 de 2012
Trabajo aceptado: agosto 29 de 2014