

GEOFISICA

INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Director: Ismael Herrera

Subdirector: Manuel Maldonado-Koerdell

Vol. 8

México, D. F., Abril-Diciembre 1968

Núms. 2-4

SIMPOSIO PANAMERICANO DEL MANTO SUPERIOR PAN-AMERICAN SYMPOSIUM ON THE UPPER MANTLE

(MÉXICO, D. F., MARZO 18-21, 1968)
MARCH

GRUPO III-GRAVIMETRÍA Y MAREAS TERRESTRES GROUP III-GRAVIMETRY AND EARTH TIDES

*SOBRE RELACIONES DE LA VARIACION DE ONDA LARGA EN LA GRAVEDAD RESPECTO A CORTEZA Y MANTO SUPERIOR **

WILLIAM M. KAULA **

RESUMEN

Las correlaciones más evidentes de campo de gravedad con la actividad geológica parecen ser:

- 1) anomalías positivas sobre toda la fosa Circum-Pacífica y cordones de arcos isleños, a la vez que en áreas de reciente extrusión.
- 2) anomalías muy pequeñas sobre altos oceánicos de velocidad de dispersión relativamente rápida y sobre áreas quietas cuya actividad geológica cesó recientemente.
- 3) anomalías negativas sobre cordilleras de plegamiento y compresión y sobre áreas de glaciación reciente.

Las anomalías principales que parecen difíciles de explicar son las pronunciadas áreas negativas en el Atlántico Oeste y el Océano Indico Norte y Suroeste y la gran área positiva del Océano Indico Sur.

A pesar de que las grandes variaciones en la gravedad deben provenir en gran parte de pequeños desequilibrios en el manto, parece más factible relacionarlas con otros fenómenos superficiales a medida que se puedan obtener mejores medidas en los últimos.

Este trabajo es esencialmente continuación de un trabajo de implicación geofísica del campo de gravedad determi-

*ON THE RELATION OF LONG WAVE VARIATIONS IN GRAVITY TO THE CRUST AND UPPER MANTLE **

WILLIAM M. KAULA **

ABSTRACT

The most evident correlations of the gravity field with geological activity appear to be:

- 1) positive anomalies over all the Circum-Pacific trench and island arc belts, as well as other areas of recent extrusions;
- 2) very small anomalies over ocean rises of relatively rapid spreading rate and over areas quiescent in recent geologic time; and
- 3) negative anomalies over purely folding & compression mountain belts and over areas of recent glaciation.

The principal anomalies which appear difficult to explain are the pronounced negative areas in the Western Atlantic and the Northern and Southeast Indian Ocean, and the large positive area in the Southwest Indian Ocean.

Although the broad variations in gravity must in large part arise from small imbalances in the mantle, it does appear feasible to relate them better with other surface phenomena as improved measurements of the latter are obtained.

This paper is essentially a continuation of a paper on the geophysical implications of the gravitational field as deter-

* Publicación No. 692. Instituto de Geofísica y Física Planetaria, Universidad de California, Los Angeles, California.

** Departamento de Ciencias Planetarias y del Espacio, Instituto de Geofísica y Física Planetaria, Universidad de California. Los Angeles.

* Publication No. 692, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, California.

** Department of Planetary and Space Science, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles.

nado por satélites (Kaula, 1967). Los puntos principales enfatizados en ese artículo fueron:

1) La mayor desviación del equilibrio hidrostático por un factor de dos es el achatamiento, que requiere una explicación especial tal como el tiempo de retardo en la forma terrestre por desaceleración de marea por viscosidad.

mined by satellites (Kaula, 1967). The principal points emphasized in that paper were:

1) The largest departure from hydrostatic equilibrium by a factor of two is the oblateness, indicating a special explanation such as a viscous time lag of the earth's shape behind tidal deceleration.

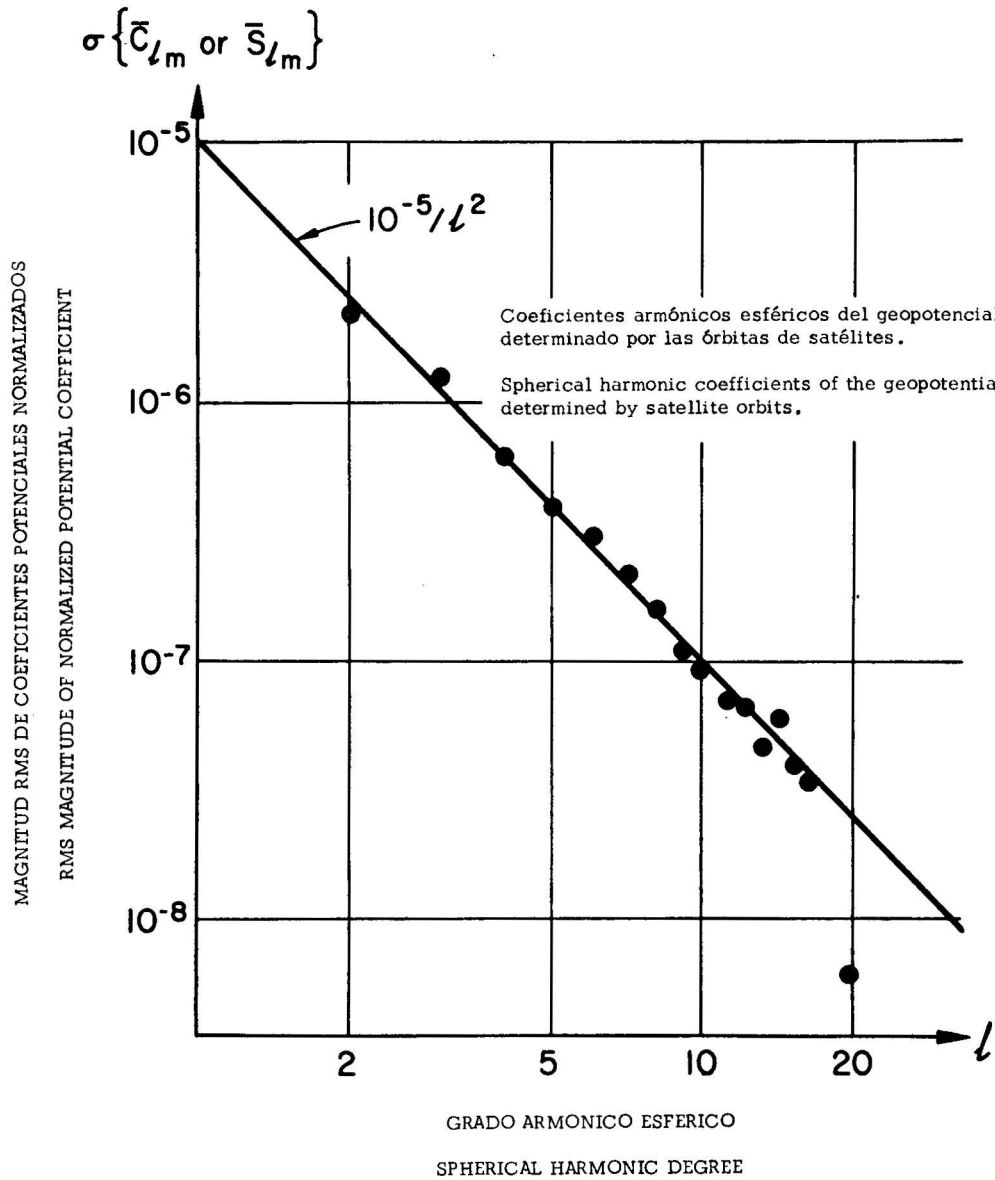


Fig. 1 - Magnitud radical de mínimo cuadrado de los coeficientes armónicos esféricos normalizados \bar{C}_{lm} , \bar{S}_{lm} del geopotencial como función de grado

Fig. 1 - Root-mean-square magnitude of normalized spherical harmonic coefficients \bar{C}_{lm} , \bar{S}_{lm} of the geopotential as a function of degree. Based on Anderle & Smith 1968.

2) Las otras variaciones en el campo decaen rápidamente con el incremento en el grado del armónico esférico (que corresponde a una disminución en la longitud de onda).

3) La correlación del campo de gravedad con la topografía para los grados armónicos bajos es despreciable, pero es positiva para grados sobre cinco.

2) The other variations in the field drop off sharply with increase in spherical harmonic degree (corresponding to decrease in wavelength).

3) The correlation of the gravity field with topography is negligible for the lower harmonic degrees, but positive for degrees above five.

4) La magnitud de las variaciones es tal que debe atribuirse principalmente a variaciones de la densidad en el manto.

5) La correlación incierta de la gravedad con otros indicadores geofísicos de la actividad del manto superior sugiere que las variaciones correspondientes de la densidad son consecuencia de desequilibrios relativamente pequeños entre efectos de perturbación dinámica y efectos compensadores de restitución.

Acerca del punto 1), se ha sugerido una explicación nueva por Goldreich y Toomre (1968) que no implica un manto altamente viscoso: la desviación puede ser debida a la tendencia de todas las irregularidades de densidad a tomar una orientación tal que la Tierra gire sobre un eje de momento de inercia máximo.

Acerca del punto 2), la cercanía de la magnitud de las variaciones a la ley sistemática " $10^{-5}/r^2$ " para los coeficientes de potencial C_{lm} , S_{lm} se puede enfatizar mayormente como se hace en la Fig. 1 de este trabajo.

Sin embargo quisiéramos proponer aquí algunas correlaciones más cualitativas para convertir el campo de gravedad en una herramienta más útil para estudiar el manto superior que las propuestas por el punto 5).

Para destacar efectos relativamente someros, tal vez sea mejor utilizar la anomalía de gravedad que el geoido. La Fig. 2 es el diagrama de anomalías gravitacionales en una escala de 10° o de 1,100 Km, valores cuadrados medios. Para resaltar sus implicaciones físicas, estas anomalías se refieren a la figura de equilibrio hidrostático con achatamiento $1/299.8$.

La Fig. 3 es una adaptación de Le Pigeon (1968) que muestra el lugar geométrico principal de la formación y destrucción de la corteza. Le Pigeon sugiere tres tipos principales de frontera entre bloques rígidos: tipo uno de surgimiento, las cordilleras meso-oceánicas y dos tipos hundimiento: 1) fosas y 2) cordones de plegamiento y compresión. De estos tres tipos el único que muestra una clara correlación con la gravedad es el sistema de fosas, a través de su extensión (Malvinas, (Malvinas, Chile, México, Alaska, Aleutianas, Japón, Nueva Guinea, Tonga, Nueva Zelandia más la rama Nueva Guinea-Sumatra) está asociado continuamente con anomalías de gravedad positivas. (Esta contradicción de la asociación común de fosas con fajas de anomalías negativas es consecuencia de promediar sobre cuadrados de 10°). Por otro lado, la principal banda de compresión y plegamiento, el cordón Alpino-Himalayo se asocia con anomalías de gravedad positivas sólo en una porción mínima de su extensión. Las crestas meso-oceánicas parecen cortar a través de anomalías positivas y negativas indiscriminadamente. Sin embargo, *todas* las secciones de relativamente alto valor de distribución, digamos más de 1.5 cm/año velocidad media, están asociadas con áreas de anomalías gravitacionales pequeñas, menos de 10 miligal es en valor absoluto (con la excepción de la cresta sobre los 50° de latitud al sur de Australia para la cual sólo hay un valor aproximado dado por Le Pigeon).

4) The magnitude of the variations is such that they must be accounted for mainly by density variations in the mantle.

5) The uncertain correlation of gravity with other geophysical indicators of upper mantle activity suggests that the corresponding density variations are the consequence of relatively small imbalances between dynamic disturbing effects and compensating restorative effects.

In regard to point 1), a new explanation has been suggested by Goldreich & Toomre (1968) which does not entail a highly viscous mantle: the bulge may be the consequence of the tendency of all density irregularities to turn to an orientation such that the earth is rotating about an axis of maximum moment-of-inertia. In regard to point 2), the closeness of the magnitude of the variations to the systematic " $10^{-5}/r^2$ law" for potential coefficients C_{lm} , S_{lm} could have been more strongly emphasized, as it is by Figure 1 of this paper.

However, we wish here to attempt some more qualitative correlations in order to make the gravity field a more useful tool in studying the upper mantle than suggested by point 5). To emphasize relatively shallow effects it is probably better to utilize the gravity anomaly rather than the geoid. Fig. 2 is a plot of the gravity anomalies on the scale of 10° , or 1100 Km square mean values.

To emphasize their physical implications, these anomalies are referred to the figure of hydrostatic equilibrium, with flattening $1/299.8$.

Figure 3 is an adaptation from Le Pigeon (1938, which emphasizes the principal loci of crustal formation and destruction. Le Pigeon suggests three main types of boundaries between rigid blocks: one source-type, the mid-ocean ridges; and two sink-type: 1) trenches, and 2) folding & compression belts. Of these three types, the only one which shows a clear correlation with gravity is the trench system: throughout its length (Falklands, Chile, Mexico, Alaska, Aleutians, Japan, New Guinea Tonga, New Zealand plus the branch New Guinea Sumatra) it is continuously associated with positive gravity anomalies. (This contradiction of the usual association of trenches with bands of negative anomalies is a consequence of the averaging over 10° squares). On the other hand, the principal belt of folding and compression, the Alpine-Himalayan belt, is associated with positive gravity anomalies only over a minor portion of its extent. The mid-ocean ridges appear to cut through positive and negative anomalies indifferently. However, *all* sections of relatively high spreading rate—say more than 1.5 cm/year half-velocity—are associated with areas of small gravity anomalies, less than 10 milligals in absolute value (with the exception of the ridge along 50° latitude south of Australia, for which only a calculated rate is given by Le Pigeon).

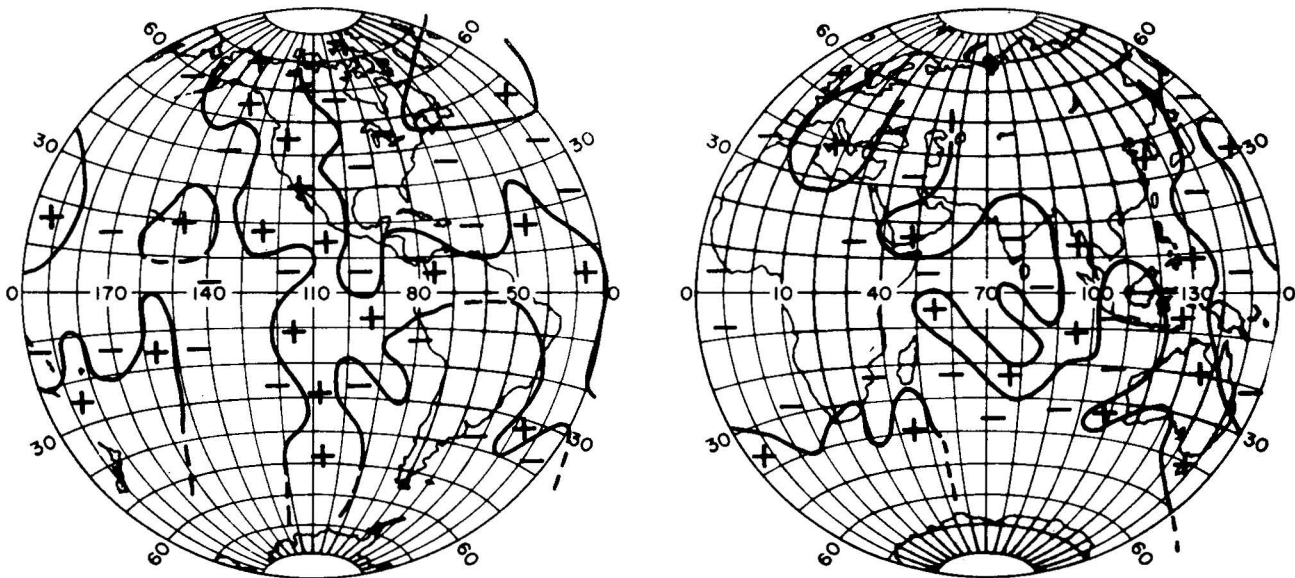


Fig. 4 - Flujo térmico superficial. Áreas positivas (+): flujo más de $1.4 \text{ ucal/cm}^2/\text{seg}$;
 Áreas negativas (-): flujo menor de $1.4 \text{ ucal/cm}^2/\text{seg}$;
 para mínimos cuadrados de 5° . Los símbolos se localizan generalmente en
 áreas donde existen mediciones adecuadas.
 Basado en Lee y Uyeda 1965.

Fig. 4 - Surface heat flow. Plus (+) areas: flow more than $1.4 \text{ ucal/cm}^2/\text{sec}$;
 minus (-) areas: flow less than $1.4 \text{ ucal/cm}^2/\text{sec}$,
 for 5° square means. Symbols are located generally in areas where
 adequate measurements exist.
 Based on Lee & Uyeda 1965.

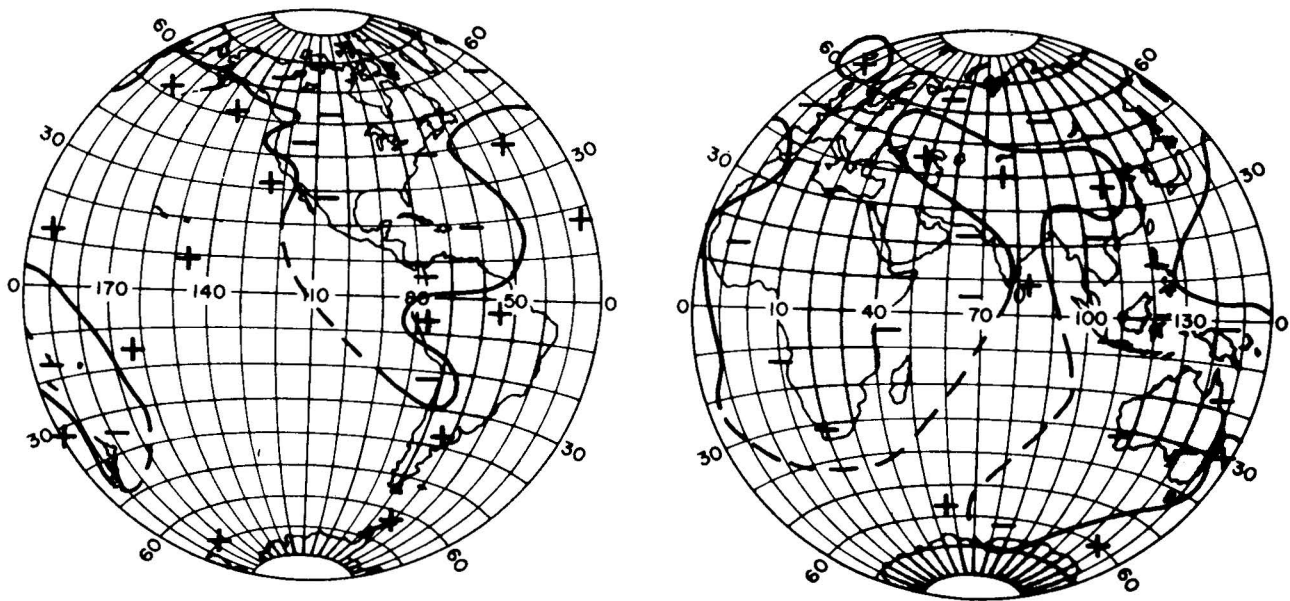


Fig. 5 - Residuos de tiempos de traslado sísmico. Áreas positivas (+) más, áreas
 negativas (-), menos que el modelo de Jeffreys-Bullen. Los símbolos se
 localizan generalmente en áreas donde se han hecho estimaciones.
 Basado en Toksöz y Arkani-Hamed 1967.

Fig. 5 - Seismic travel-time residuals. Plus (+) areas: more, minus (-) areas: less,
 than Jeffreys-Bullen model. Symbols are located generally in areas where
 estimates have been made.
 Based on Toksöz & Arkani-Hamed 1967.

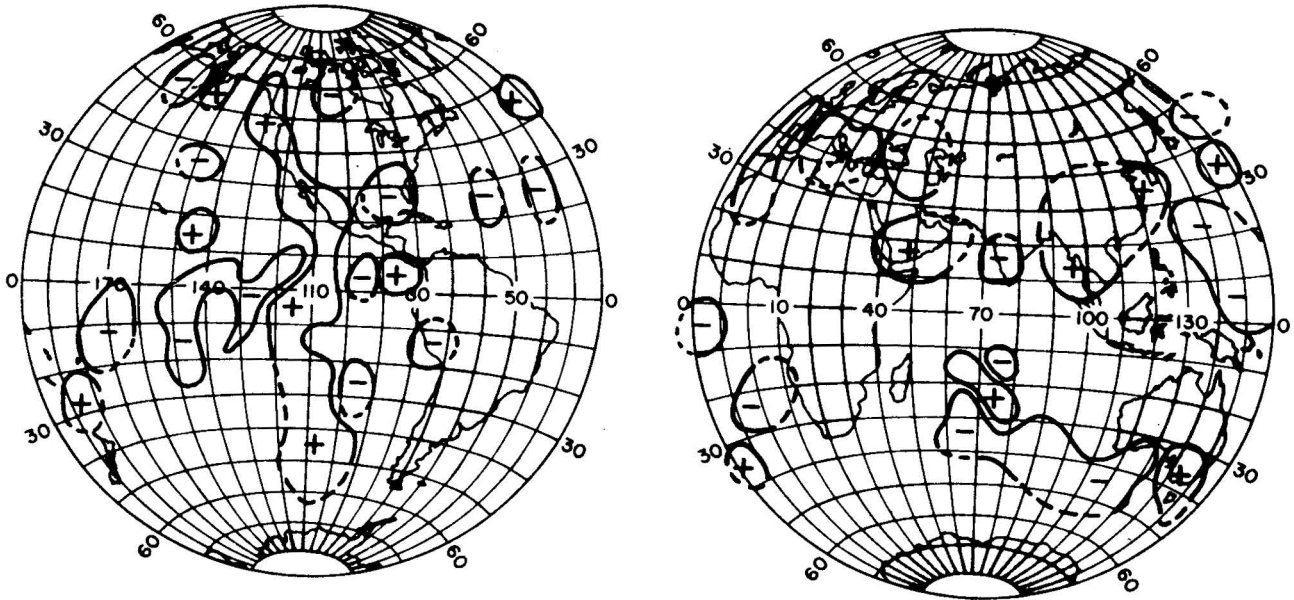


Fig. 6 - Áreas de flujo térmico extremo. Áreas positivas (+) más de $2.0 \text{ ucal/cm}^2/\text{seg}$;
Áreas negativas (-) menos de $0.9 \text{ ucal/cm}^2/\text{seg}$.
Basado en Lee y Uyeda 1965.

Fig. 6 - Areas of extreme heat flow. Plus (+) areas: flow more than $2.0 \text{ ucal/cm}^2/\text{sec}$;
minus (-) areas: flow less than $0.9 \text{ ucal/cm}^2/\text{sec}$.
Based on Lee & Uyeda 1965.

En un análisis de correlación cruzada de los coeficientes gravitacionales con los coeficientes tectónicos armónicos de Coode (1966) se obtiene un resultado consistente con el cuadro anterior: contando los factores compresivos como funciones delta negativas y los tensionales como positivos, los grados de los coeficientes de correlación son -0.22 para r_3 , -0.664 para r_1 , -0.29 para r_5 , y 0.06 para r_6 .

Se muestra en la Fig. 4, el flujo superficial de calor como exceso de (+) o deficiencias de (-) 5° medios con respecto al valor medio de $1.4 \text{ } \mu\text{cal/cm}^2/\text{seg}$. Como se discutió previamente (Kaula, 1967), la correlación negativa prevista para anomalías de gravedad existe principalmente en pequeña escala, no en una escala global, aparentemente como consecuencia de variaciones de corteza de fuentes de calor de poca relación con las amplias variaciones en la gravedad. Tal vez la contradicción más marcada sea una banda de alto flujo de calor sobre la orilla oeste del Pacífico, precisamente del lado continental del sistema de fosas, coincidiendo con una faja de anomalías gravitacionales positivas.

Residuos de tiempos sísmicos, que supuestamente reflejan temperaturas a grandes profundidades a través de su efecto en los parámetros elásticos, se muestran en la Fig. 5. El tiempo de traslado señala mucho más la correlación negativa ya prevista. En particular la orilla oeste del Pacífico es ahora una faja negativa y el área Asia Central-Océano Indico es más consistentemente positiva.

Hemos mencionado repetidas veces que la dificultad de explicar las variaciones de gravedad surge esencialmente de su dependencia de desequilibrios relativamente pequeños

Across correlation analysis of the gravity coefficients with the tectonic harmonic coefficients of Coode (1961) obtains a result consistent with the above picture: counting compressive features as negative delta functions and tensional as positive, the degree correlation coefficients are -0.22 for r_3 , -0.64 for r_1 , -0.29 for r_5 , and -0.06 for r_6 .

The surface heat flow is shown in Figure 4 as excesses (+) or deficiencies (-) or 5° means with respect to a mean value of $1.4 \text{ } \mu\text{cal/cm}^2/\text{sec}$. As previously discussed [Kaula, 1967], the anticipated negative correlation with gravity anomalies exists mainly on a small scale, not on a global scale apparently as a consequence of crustal variations in heat source of little relation to the broad variations in gravity. Perhaps the most marked contradictions is a band of high heat flow along the west Pacific margin, just to the landward side of the trench system, coinciding with a band of positive gravity anomalies.

Seismic travel-time residuals, which presumably reflect temperatures at greater depth through their effect on the elastic parameters, are shown in Figure 5. The travel times show much more the anticipated negative correlation. In particular, the west Pacific margin is now a negative band, and the central Asia-Indian Ocean area is more consistently positive.

We have mentioned repeatedly that the difficulty of explaining gravity variations arises essentially from their dependence on relatively small imbalances between distur-

entre efectos de perturbación y de restitución. Vale la pena enumerar estos efectos y considerar luego cómo se pueden combinar en distintas situaciones.

1. Un exceso de calor causará una elevación de temperatura, de lo cual resultará una expansión térmica originando bajas densidades y anomalías de gravedad negativa.

2. Pero si el exceso de calor es suficientemente grande para causar convección habrá un exceso de material dirigido sobre la superficie, que dará como resultado anomalías gravitacionales positivas (cf. McKenzie, 1968).

3. Si una masa superficial en exceso está sobre el nivel del mar será erosionada dando origen a mayores anomalías negativas.

4. El material erosionado se depositará en cualquier sitio como sedimento de baja densidad, pero de todas maneras será un exceso de masa que producirá más anomalías positivas.

5. Mientras tanto, la isostacia actuará continuamente (supuestamente por relajación sobre el manto superior) para compensar todo exceso superficial de masa a la Fenoscandia: eventualmente cualquier anomalía de gravedad restante dependerá esencialmente de diferencias en profundidad de la densidad y sus compensaciones.

6. Un exceso de calor actuará a manera de incrementar las velocidades de relajamiento y por lo tanto las velocidades de ajuste isostático.

7. Un exceso de calor puede originar también fracciones y por lo tanto diferencias verticales en la densidad.

8. Entre más tiempo han estado en la superficie las rocas mayor probabilidad han tenido de enfriarse.

9-12. Una deficiencia de calor causará los efectos contrarios en 1, 2, 6 y 7 respectivamente.

13. El vulcanismo reciente y flujo extrusivo, tenderá a causar anomalías de gravedad positiva.

14. Una glaciación reciente tenderá a causar anomalías de gravedad negativas.

Puesto que algunos de los efectos enumerados se agravan cuando la temperatura está marcadamente por encima o por abajo del promedio, incluimos aquí como Fig. 6 un mapa que muestra áreas de corrientes de calor que difieren en más de $0.5 \mu\text{cal}/\text{cm}/\text{seg}$ del promedio: bastante para que sea difícil explicarlas por efectos meramente corticales (véase, por ejemplo, McKenzie y Sclater, 1968).

Esta lista de catorce causas nos señala suficientes mecanismos para explicar cualquier combinación de flujo de calor, topografía y anomalía de gravedad. Clasificaremos la superficie terrestre en seis regiones fisiográficas principales, sobre las líneas de Menard y Smith (1966) o Lee y Uyeda (1965), y para cada región se enumerarán sus características principales así como los puntos mayores 1-14 actuando como incremento o decremento de la anomalía gravitacional.

Como se indica en la Tabla I, las únicas provincias para las cuales los distintos efectos parecen actuar predominantemente en una dirección en su efecto en la gravedad, son los cordones de compresión: anomalías positivas para las fosas y arcos isleños, anomalías negativas para los cordones montañosos de plegamiento. Las fosas y arcos isleños son sin

bing and restorative effects. It may be worthwhile to enumerate these effects and then consider how they might combine in different situations.

1. An excess of heat will cause a temperature rise, and hence result in thermal expansion leading to lower densities and negative gravity anomalies.

2. But if the heat excess is great enough to cause convection, there will be an excess of matter pushed toward the surface, resulting in positive gravity anomalies (cf. McKenzie, (1968)).

3. If a surface mass excess is above sea level, it will be eroded away, resulting in more negative anomalies.

4. Eroded matter will be deposited elsewhere as sediments of lower density, but still a mass excess making the anomaly more positive.

5. Meanwhile, isostasy will continually act (presumably by creep in the upper mantle) to compensate all superficial mass excess à la Fenoscandia: in the long run, any gravity anomalies remaining would depend essentially on differences in depth of density anomalies and their compensation.

6. An excess of heat will act to increase creep rates, and hence the rates of isostatic adjustment.

7. An excess of heat will also provoke fractionation and hence vertical differentiation in density.

8. The longer rocks have been at the surface, the more chance they have had to cool.

9, 12. A deficiency of heat will cause the effect of reverse of effects 1, 2, 6, and 7 respectively.

13. Recent volcanism and extrusive flow will tend to cause positive gravity anomalies.

14. Recent glaciation will tend to cause negative gravity anomalies.

Since some of the effects enumerated are enhanced by the temperature being markedly above or below average, we include here as Figure 6 a map showing areas of heat flow differing by more than $0.5 \mu\text{cal}/\text{cm}^2/\text{sec}$ from average: enough to be difficult to explain by purely crustal effects (see, e. g., McKenzie & Sclater, (1968)).

The list of fourteen items furnishes enough mechanisms to account for almost any combination of heat flow, topography, and gravity anomaly. Let us classify the surface of the earth into about six principal physiographic provinces, along the lines of Menard & Smith (1966) or Lee & Uyeda (1965), and for each province list its principal characteristics plus the principal points 1-14 acting to increase or decrease the gravity anomaly.

As indicated by Table I. The only provinces for which the various effects appear to act predominantly in one direction in their effect on gravity are the compressive belts: positive anomalies for the trench and island arcs, negative anomalies for the folded mountain belts. The trench & island arcs are indeed predominantly positive; in fact, the highest

TABLA 1

TABLE 1

PROVINCE	PROVINCIAS FISIOGRAFICAS PHYSIOGRAPHIC PROVINCES						
	CARACTERISTICAS --- CHARACTERISTICS						
	MOVIM. CORTIC. Motion ¹	TOPO- GRAFÍA ² Topogra- phy ²	FLUJO TERM. Heat Flow ²	RETAR- DO Sís- MICO ² Seismic Delay ²	ANOM. GRA. VIM. Anoma- li ²	INCREMENTO GRAVITACIONAL Increase	DECREMENTO GRAVITACIONAL Decrease
1) Altos Océánicos	+	0	+	+	0	2.7	1,5.6
1) Ocean Rises							
2) Cuencas Océánicas	0	—	0	0	—	4.8	5
2) Ocean Basins							
3) Fosas Océánicas y áreas de Arcos Isleños	—	±	±	—	+	4.9.11.13	10
3) Ocean Trench & Island Arc areas							
4) Areas de Plegamiento y Compresión	—	+	+	+	±	2	1,3.5.6,7
4) Folding & Compression areas							
5) Areas del post-Precámbrico no orogénicas y Plataformas Continetales	0	0	0	—	0	4	5
5) Post-Precambrian Non- Orogenic areas & Con- tinental Shelves							
6) Escudos Precámbricos y áreas orogénicas Paleozoicas.	0	0	—	—	0	8.9.12	3,5
6) Precambrian Shield & Paleozoic Orogenic Areas							

Nota — Note:

- + tensional, — compresional (en general);
- + tensional, — compressive (currently);
- 2: + por arriba del promedio — por abajo del promedio, 0 variable moderadamente alrededor del promedio.
- ± extremadamente variable.
- + above average, — below average, 0 moderately variable about average,
- ± extremely variable.

embargo, predominantemente positivos; de hecho, el punto más alto del geoidé caé en una saliente entre las Fosas de Java y Filipinas. Pero cordones montañosos de plegamiento pueden ser tanto positivos como negativos en su anomalía, el único que es predominantemente negativo es el más alto: el Himalaya. Sin embargo, el Himalaya puede ser la única área importante que casi es solamente una montaña de

point of the geoid falls in the salient between the Java and Philippine trenches. But folded mountain belts are as much positive as negative in anomaly; the only one predominantly negative is the biggest, the Himalayas. However, the Himalaya may be the only major area which is almost purely a folded-mountain compressive feature: there is no fore-deep (except perhaps the Ganges syncline), there are no

plegamiento con características compresionales: no tiene antifosa (exceptuando quizá el sinclinal del Ganges), sólo hay una fosa sísmica mayor de 250 Km con poco o casi nada de vulcanismo (Gutenberg y Richter, 1954).

Parece que hay un grado razonable de correlación de la gravedad con actividad superficial reciente (puntos 13 y 14). Areas de coladas lávicas Cuaternarias —como el Cáucaso, Hawaii, las Azores, Islandia, así como el cinturón Circum-Pacífico todos están asociados con anomalías positivas. Los escudos de glaciación Cuaternaria, como Canadá, Eurasia norte, la Antártida— están generalmente asociadas con anomalías negativas: una excepción es Groenlandia, a un lado del alto de Islandia.

De las características principales en la Fig. 2, el mayor enigma es probablemente el Océano Indico, ¿por qué existe ese cordón fuertemente negativo del noroeste al sureste? ¿por qué existe esa grande área positiva hacia el suroeste? Tampoco el mecanismo que se sugiere en este artículo explica el mínimo en el Atlántico oeste. Tal vez consideraciones de otro carácter, tales como irregularidades del fondo o engrosamiento de sedimentos puedan sugerir otras explicaciones. (Heezen y Tharp, 1965).

CONCLUSIONES. A pesar de que las variaciones de las ondas largas en el campo de gravedad deben ser originadas en gran parte por irregularidades en la densidad en el manto por las razones que se deducen en el trabajo de Kaula (1967), no se concluye necesariamente que las variaciones en la gravedad carezcan de conexión con otros fenómenos superficiales. Por lo contrario, parece que hay suficientes evidencias de correlación con movimiento superficial, etc. y por lo tanto vale la pena establecer una explicación más detallada y precisa de una parte apreciable del campo de gravedad por una actividad geológica actual.

Agradecimientos: Este trabajo fue auspiciado por la NASA, Contrato No. NSG-216.

earthquake foci deeper than 250 km. and there is little or no volcanism (Gutenberg & Richter, 1954).

There seems to be a fair degree of correlation of gravity with recent superficial activity (points 13 and 14). Areas or Quaternary lava flow-caucasus, Hawaii, the Azores, Iceland, as well as the circum-Pacific belt are all associated with positive anomalies. Shield areas of Quaternary glaciation Canada, northern Eurasia, Antarctica are generally associated with negative anomalies: an exception is Greenland, on the shoulder of the Icelandic high.

Of the principal features in Figure 2 the biggest puzzle is probably the Indian Ocean: why the strongly negative belt from northwest to southeast: why the large positive area to the southwest? Also the mechanisms suggested in this paper do not explain the minimum in the west Atlantic. Perhaps consideration of some other properties, such as sea floor roughness or thickness of sediments (Heezen & Tharp, 1965) may suggest explanations.

CONCLUSIONS. Although the long-wave variations in the earth's gravity field must in large part be caused by density irregularities in the mantle for the reasons deduced in Kaula (1967), it does not necessarily follow that the gravity variations have no close connection with other surface phenomena. On the contrary, there appear to be enough correlations with evidences of surface motion, etc. that it is well worth pursuing in a more quantitative and detailed manner the explanation of an appreciable part of the gravity field by current geologic activity.

Acknowledgment. This work was supported by NASA grant NSG-216.

BIBLIOGRAFIA

- ANDERLE, R. J. & S. J. SMITH. 1968. Observation of Twenty-seventh and Twenty-eighth Order Gravity Coefficients Based on Doppler Observations. *Jour. Astronaut. Sci.*, 15: 1-4.
- COODE, A. M. 1966. An Analysis of Major Tectonic Features. *Geophys. Jour. Royal Astron. Soc.*, 12: 55-66.
- GOLDRESCH, P. & A. TOOMRE. 1968. Some Remarks on Polar Wandering. *Jour. Geophys. Res.*, 73 (en prensa - in press).
- GUTENBERG, B. & C. F. RICHTER. 1951. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena* (2nd. Ed.) 1 vol.
- HEEZEN, B. C. & M. THARP. 1965. Tectonic Fabric of the Atlantic and Indian Oceans and Continental Drift. *Phil. Trans. Royal Soc., London*, No. 1088, pp. 90-106.
- KAULA, W. M. 1967. Geophysical Implications of Satellite Determinations of the Earth's Gravitational Field. *Spatial Sci. Revs.*, 7:769-791.
- LEE, W. H. K. & S. UYEDA. 1965. Review of Heat Flow Data. *American Geophys. Union Monogr.*, No. 8, pp. 87-190.

BIBLIOGRAPHY

- LE PIGEON, X. 1968. Sea Floor Spreading and Continental Drift. *Jour. Geophys. Res.*, 73:3661-3697.
- McKENZIE, D. P. 1968. The Influence of the Boundary Conditions and Rotation on Convection in the Earth's Mantle. *Jour. Geophys. Res.*, 73 (en prensa-in press).
- McKENZIE, D. P. & J. G. SCLATER. 1968. Heat Flow inside the Island Arcs of the Northwestern Pacific. *Jour. Geophys. Res.*, 73:3173-3179.
- MENARD, H. W. & S. M. SMITH. 1966. Hypsometry of Ocean Basin Provinces. *Jour Geophys. Res.*, 71:4305-4325.
- TOKSOZ, M. N. & J. ARKANI-HAMMED. 1967. Seismic Delay Times: Correlation with other Data. *Science*, 158:783-785.