

GRAVEDAD, GEOLOGIA REGIONAL Y ESTRUCTURA  
CORTICAL EN MEXICO \*

Por

G. P. Woollard\*\* y J. Monges Caldera

## RESUMEN

*A network of gravity observations based on airports and road traverses covering Mexico plus the results of detailed surveys in the Gulf Coastal Plain area and the National pendulum network of gravity bases, have been used to construct a gravity anomaly map of Mexico.*

*An analysis of the results from the standpoint of isostasy indicates that a compensation depth of 96.6 kms gives minimum anomaly values and that isostatic compensation is approximated regionally except for a strip extending from Guatemala through the Balsas Basin in western Mexico to Arizona. This area is characterized by marked negative anomalies. As the area involved crosscuts several geologic and physiographic provinces, it appears to be related to an intrabasement change in lithology which may or may not be associated with the Sierra Madre Occidental or*

\* Presentado en el XX Congreso Geológico Internacional, celebrado en México en 1956.

\*\* Profesor de la Universidad de Wisconsin. Profesor huésped en la Universidad Nacional Autónoma de México, durante Junio y Julio de 1956.

more likely a former orogenic belt.

Using seismic results obtained in the Gulf of Mexico and off the West Coast of Mexico delineating crustal structure above the Mohorovičić discontinuity, along with off shore gravity data in both areas, an analysis is made as to crustal structure beneath Mexico along a traverse from Acapulco to Tuxpan. Working from the Mohorovičić surface as determined seismically at -17.2 km in the Gulf of Mexico as datum and using Bouguer gravity anomalies, crustal thickening taking place in two stages is suggested in crossing onto the continent with the Mohorovičić discontinuity at -46 km beneath the central Plateau region. Working from the Pacific Ocean side with the Mohorovičić discontinuity at -12 km, crustal thickening taking place in three stages is suggested with the same depth to the Mohorovičić discontinuity beneath the central Plateau as determined from the Gulf of Mexico. However, it should be noted that seismic measurements in the Colorado Plateau region of the United States, which is characterized by similar Bouguer anomaly values as noted in the Plateau of Mexico show no deepening of the Mohorovičić discontinuity and suggest volumetric expansion of the crust in these areas as the mode of achieving isostatic balance and explaining the Bouguer anomaly values.

Studies of residual anomalies and their relation to surficial geologic features along the same traverse indicate a direct correlation between geologic structural units and gravity except in connection with the Golden Lane Reef in the Gulf Coastal Plain and the Chicontepec foredeep paralleling the Sierra Madre Oriental. No obvious gravity effect is noted for either structure. On an areal basis most tectonic structural units appear to have a direct gravity counterpart. There are, however, several gravity structures for which there are no known geologic counterparts and these are presumably related to charges in intrabasement lithology.

#### Carácter de la Investigación.

El presente estudio comenzó en 1949, como parte de una serie de medidas de gravedad de amplitud mundial para fines geodésicos y se continuó durante los años subsiguientes, como medio para estudiar la estructura tectónica de México y sus relaciones con los elementos geológicos estructurales, hacia el norte en los Estados Unidos y hacia el este, en Cuba. Aunque no se tratará de discutir el significado

geodésico de los resultados, se presenta un análisis en términos tanto de la estructura cortical como de la geología superficial.

### *Consideraciones Generales.*

En contraste con lo que sucede en Estados Unidos y en Europa, donde se han realizado similares estudios de carácter general de la gravedad para la investigación de la geología regional y la estructura cortical, México, debido a su juventud geológica, ofrece una situación tectónica hasta cierto punto más simple y por lo tanto, es una área más favorable para separar los efectos de gravedad relacionados con la estructura cortical de los relacionados con la geología superficial. En general, las provincias fisiográficas están asociadas con unidades geológicas tectónicas específicas, cuyos linderos son netos y están bien definidos. El conocimiento geológico, aunque no completo, está bastante avanzado, como lo demuestra el mapa geológico de México preparado para el Congreso Internacional de 1956. La compensación isostática, para cambios en altura, en su mayor parte parece ser bastante aproximada. Complicaciones en la estructura cortical, causadas por los sistemas de antiguas "raíces" de montañas del Pre-Cámbrico o comienzos del Paleozoico, son aparentemente muy pocas.

### *Medidas de Gravedad.*

Las medidas pueden dividirse como sigue:

- 1) Medidas Pendulares: (a) las realizadas bajo la dirección de Woollard por el Dr. J.C. Rose, de la Universidad de Wisconsin, entre Laredo y Paso de Cortés, con péndulo compuesto de cuarzo Gulf, como parte de una línea internacional de calibración gravimétrica que se extiende desde México hasta Fairbanks, Alaska; (b) la red nacional mexicana de 91 estaciones de péndulo, cuya distribución regional cubre la mayor parte del país.
- 2) Una red de bases de control gravimétrico en los principales aeropuertos que cubre el país, establecida por los autores y el Sr. W.A. Black, de la Universidad de Wisconsin, como suplemento a la red nacional de bases pendulares.
- 3) Medidas gravimétricas de caminamiento en todas las carreteras principales, con observaciones a intervalos que varían desde 2 kms. en el Istmo de Tehuan-

tepec hasta 15 o 20 kms. a lo largo de la carretera Cd. Juárez-México, D.F. En general, las observaciones hechas al cruzar una estructura geológica están menos espaciadas que las hechas paralelamente al rumbo regional de la estructura geológica.

4) Medidas gravimétricas aisladas hechas en aeropuertos privados o secundarios, usando un avión ligero en áreas poco accesibles, particularmente en los Estados de Sonora y Chihuahua y las reportadas por de la O Carreño (1949).

5) Los datos de gravedad pendular del U.S. Coast and Geodetic Survey en el área fronteriza del norte de México, en Cuba y en las Islas Bahamas.

6) Los mapas gravimétricos regionales del área del Golfo (de México) en los Estados Unidos, preparados por Woollard con datos disponibles para estudios científicos de la Humble Oil Company, de Houston, Texas, por conducto del Comité Especial para el Estudio Geológico y Geofísico de los Continentes, de la American Geophysical Union.

7) Los mapas gravimétricos regionales de la Llanura Costera del Golfo de México, preparados por Petróleos Mexicanos, los cuales fueron prestados a los autores para este estudio.

8) Las medidas de gravedad en aguas adyacentes del Golfo de México y en el Océano Pacífico realizadas por F. Vening Meinesz (1934).

La Fig. Núm. 1 muestra la ubicación de las estaciones de gravedad usadas, con excepción de áreas de la Llanura Costera donde se trató la región por medio de mapas regionales de anomalías. Los instrumentos usados por los autores, además del péndulo compuesto de cuarzo de la Gulf Research and Development Company empleado para las medidas de calibración, fueron gravímetros Worden de tipo geodésico con amplio alcance y un gravímetro North American, usado junto con el gravímetro Worden en la mayoría de las medidas de los caminamientos en las carreteras.

## SUMARIO DE LA GEOLOGIA DE MEXICO

### *Descripción General.*

Básicamente, México está compuesto por una meseta central, elevada

originalmente durante la Revolución Laramídica en el período Cretácico, afectando principalmente rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas que cubren un complejo cristalino, erosionada hasta su base en el Terciario Inferior, vuelta a elevar durante el Mioceno y subsecuentemente cubierta por una variedad de derrames volcánicos con espesor variable. El bloque de la meseta central está limitado al este por una faja de rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas plegadas, con la Sierra Madre Oriental, que baja bruscamente a la región de la Llanura Costera de sedimentos mesozoicos y terciarios relativamente no deformados. Una cadena similar de montañas, la Sierra Madre Occidental, forma el lindero occidental de la Meseta Central, creyéndose que el núcleo de esta cadena corresponde a un geanticlinal que existió antes de la Revolución Laramídica. Como sucede al este, dichas montañas bajan bruscamente al área costera. Al sur, la Meseta Central está limitada por una serie de montañas volcánicas terciarias que dan lugar a una área de elevación intermedia caracterizada por rocas paleozoicas con cuencas locales que contienen sedimentos jurásicos y cretácicos, las cuales han sufrido una considerable deformación estructural. Al sur de esta área de cuencas intermontanas se encuentra la Sierra Madre del Sur, compuesta por rocas paleozoicas alteradas por intrusiones ígneas. Esta provincia geológica se extiende a lo largo de la costa occidental desde Guatemala hasta más o menos la latitud  $20^{\circ}\text{N}$ , como una faja costera de macizos bajos. Al norte de la latitud  $20^{\circ}\text{N}$  existe una faja de llanuras costeras con sedimentos terciarios y recientes. La Baja California es una entidad tectónica separada de México por el Golfo de California, el cual parece ser un graben. En su mayor parte, Baja California es una área montañosa formada por intrusiones batolíticas durante la Orogenia Nevadiana. Localmente se ha desarrollado una faja de llanuras costeras con sedimentos terciarios y recientes.

La provincia de la Llanura Costera del Golfo de México, en contraste con la costa occidental, está mucho más ampliamente desarrollada y tiene más de 3,000 metros de sedimentos en una serie de cuencas que se extienden desde la frontera con Estados Unidos hasta la Península de Yucatán. La geología del subsuelo de esta área es probablemente mejor conocida que cualquier otra en México, puesto que en ella los sedimentos contienen las principales reservas petroleras de este país (Gúzmán et al. 1953).

En el Istmo de Tehuantepec los continentes están casi unidos por tierras bajas, a pesar de lo cual están representadas allí tres provincias geológicas:

- 1) Sedimentos mesozoicos y terciarios no deformados al norte,
- 2) sedimentos mesozoicos plegados en el centro y
- 3) rocas paleozoicas alteradas con intrusiones ígneas al sur.

Al este de dicha área y extendiéndose hasta Guatemala están las montañas de Chiapas, prolongación de la faja de pliegues y del complejo de rocas metamórficas y cristalinas. Consecuentemente, aunque en lo general las provincias geológicas coinciden con las provincias fisiográficas, ello no siempre es cierto. Desde el punto de vista del presente estudio tal caso es afortunado, puesto que ayuda a definir la contribución de los diferentes componentes geológicos al campo de la gravedad. La Fig. No. 2 muestra el relieve fisiográfico de México.

#### *Area Submarina.*

Las áreas submarinas adyacentes son de igual importancia para el presente estudio. Como se indica en la Fig. 2 en el Golfo de México, al este, existe una plataforma bien desarrollada que alcanza su mayor amplitud frente a la Península de Yucatán para formar el Banco de Campeche. Las medidas sísmicas de Ewing, Worzel et al. (1955), indican que esta área es una porción someramente inundada de la Llanura Costera de Yucatán cuya sección sedimentaria alcanza poco espesor sobre el complejo cristalino. Sólo unos 2,000 metros de sedimentos parecen existir cerca del límite exterior de la plataforma y de ellos más de la mitad parecen ser de calizas. La porción central profunda del Golfo de México (fosa de Sigsbee) parece ser un ancho graben limitado por escarpas de falla (Gealy, 1955; Ewing et al. 1955). Esta área, en contraste con la que resta de México, la cercana Llanura Costera del Golfo en los Estados Unidos, el Océano Atlántico adyacente y el área del Océano Pacífico más allá de la trinchera de Acapulco, está fuera de equilibrio isostático. Dicha área está caracterizada por anomalías isostáticas positivas que sugieren una corteza terrestre extra-delgada, pero ello no ha sido comprobado por las medidas sísmicas. Frente a la costa occidental de México no existe prácticamente plataforma continental y el fondo se hunde rápidamente para formar la trinchera Acapulco-Guatemala (Meso-Americana) (Heacock y Worzel, 1955) cuya profundidad media es de

2,500 brazas. Esta trinchera de origen tectónico es un rasgo más o menos continuo desde Nicaragua hasta las Islas Marías, frente a San Blas, México. Una trinchera similar, pero menos bien definida, existe mar adentro frente a la Península de Baja California. Se ha postulado por Gunn (1947) que dicha trinchera es el resultado del cabalgamiento de la capa continental por encima de la capa cortical oceánica. Los estudios de Menard (1955) muestran que la trinchera está limitada al norte por una zona de fractura mayor de este a oeste (Clarión), la cual se extiende por 1,000 o más millas dentro del Océano Pacífico. Además, el mismo autor sugiere que la trinchera puede ser el equivalente del sistema de fallas de San Andrés en California.

### *Actividad Sísmica.*

Tiene posible significado para el presente estudio la distribución de la actividad sísmica en México. En la Fig. 3 puede verse que los sismos están confinados a una área que se extiende desde la Península de Jalisco hacia el sur hasta Guatemala, con dos regiones de extraordinaria actividad. Una se localiza sobre el área de la trinchera submarina frente a Manzanillo y la otra, que está más extensamente desarrollada, se extiende sobre el área de la trinchera entre Acapulco y Puerto Angel. Aunque ambas regiones y la intermedia se caracterizan por sismos que tienen sus focos pocos profundos (20 a 60 kms), existe tierra adentro una zona paralela de sismos de profundidad intermedia, que tienen sus focos a una profundidad entre 60 y 300 kms y cuya distribución describe un plano de actividad sísmica que se extiende con un ángulo de cerca de  $35^\circ$  por debajo del continente a partir de la vecindad de la trinchera submarina. Esta distribución sugiere un desalojamiento estructural de la corteza, de la cual la trinchera de Acapulco es la expresión superficial. Que existe probablemente una relación genética entre la presente actividad sísmica, el vulcanismo reciente y la zona de fractura, puesta en evidencia por las profundidades focales de los sismos, también es sugerido por el hecho de que la zona de montañas volcánicas están superpuestas al área de los sismos de focos más profundos. Un ensayo cuantitativo para explicar todas las relaciones anteriormente indicadas como resultado del cabalgamiento de la capa continental por encima de la capa cortical oceánica, ha sido presentado por Gunn (1937), cuya teoría es análoga al rom-

pimiento ocasionado por la expansión de una capa de hielo sobre un lago. Como resultado de la expansión, la capa se rompe por compresión desarrollando una zona periférica de fractura y montándose el hielo central sobre el hielo del borde, lo que deprime al hielo inferior, produciéndose un engrosamiento local y una inundación superficial del área deprimida frente a la capa superpuesta. El equilibrio isobárico es mantenido, pero no la compensación local isostática, ya que la carga está distribuida fuera del área del engrosamiento por la flexión de la capa de hielo adyacente. Esta flexión produce compresión en la superficie de la capa superpuesta y tensión a lo largo de su base. En la capa subyacente los esfuerzos tensionales son contrarios.

Gunn cree que la costa occidental de México presenta todas las características anteriormente expresadas. Existen:

- 1) Una área bordeante deprimida en la costa (la trinchera de Acapulco);
- 2) una zona de fractura delineada por las profundidades focales de los sismos que van siendo progresivamente más profundos por debajo;
- 3) una cadena geoanticlinal de montañas plegadas como a 50 kms atrás de la costa, que sugiere la existencia de fuerzas de compresión superficiales en la postulada capa continental superpuesta y
- 4) una área de marcado vulcanismo como a 150 kms atrás de la costa sobre la zona de focos sísmicos profundos, que sugiere una condición de esfuerzos tensionales en el fondo de la corteza continental y por consiguiente, causante de fracturas que proporcionan caminos para la migración del magma hacia arriba.

Una implicación de la anterior es que debe existir también una faja de anomalías negativas de la gravedad de Bouguer paralela a la costa sobre la zona del engrosamiento cortical. También debe existir una baja paralela de anomalías positivas de la gravedad de Bouguer en el lado continental de la zona del engrosamiento cortical, producida por el levantamiento mecánico y como consecuencia de la erosión superficial que originó un adelgazamiento cortical local. Una de las finalidades del presente estudio fué de encontrar la evidencia gravitacional de esta supuesta estructura cortical.

### *Unidades Tectónicas de México.*

En general, puesto que las anomalías de la gravedad pueden correlacionarse mejor con elementos estructurales geo-tectónicos que con las unidades formacionales de la superficie, ha sido preparado un mapa, Fig. 4, que muestra las características tectónicas en México y en las áreas adyacentes consideradas en este estudio. La porción mexicana de este mapa está basada en los mapas tectónicos de Alvarez (1948) y King (1942) y en el mapa geológico de México preparado para el XX Congreso Geológico Internacional. Para la Costa del Golfo en los Estados Unidos y en el área inmediatamente contigua a México ha sido usado el mapa tectónico que fué preparado bajo los auspicios de la Asociación Americana de Geólogos Petroleros.

## ANOMALIAS DE LA GRAVEDAD Y SU SIGNIFICACION

### *Factores que Influyen en la Gravedad.*

Las variaciones en los valores de la gravedad resultan primordialmente de:

- 1) La divergencia entre la forma del geoide y la de una esfera achatada en sus polos,
- 2) la disminución progresiva de la fuerza centrífuga desde el ecuador hacia el eje de rotación en los polos,
- 3) la altura del punto de observación con relación a la superficie media del geoide (nivel del mar),
- 4) la masa incluida entre el punto de observación y el datum del nivel del mar,
- 5) el cambio en la densidad de las formaciones de rocas superficiales y sub-superficiales en tierra y el espesor de la columna de agua en los lagos y en el mar,
- 6) una distribución compensadora de masa en la profundidad, cuyo efecto gravitacional iguala o neutraliza aproximadamente a la masa situada entre el nivel del mar y la superficie de observación. Esta última observación implica una condición análoga al equilibrio hidrostático, pues a cierta profundidad por debajo de la tierra, todas las columnas corticales deben ejercer igual presión (isostasia). Para

los rasgos del relieve superficial en áreas de extensión limitada (menores de 100 kms en anchura) es dudoso que exista compensación isostática local y realmente prevalece una compensación isobárica, como lo afirma Gunn (1937). Bajo tales condiciones, la carga impuesta para cualquier desigualdad de masa superficial está tan compensada como cuando una persona se para sobre una capa de hielo. Existe una flexión regional de la corteza tal que mientras la condición de equilibrio hidrostático se mantiene, el desplazamiento está distribuido sobre una área de dimensiones regionales en lugar de estar inmediatamente confinada por debajo de los rasgos superficiales, como lo requiere la teoría de la compensación (isostática) local. También debe reconocerse que las deficiencias superficiales en masa asociadas con una columna gruesa de sedimentos de poca densidad a una columna de agua en el mar, bajo la teoría isostática, implica una masa compensadora correspondiente más densa en la profundidad. En el mar, cuando menos, esta condición parece ser apoyada por estudios sísmicos que muestran que la discontinuidad de Mohorovicic y probablemente, las rocas inferiores más densas están mucho más cerca de la superficie que debajo de los continentes. Los factores de menor importancia que contribuyen en la gravedad son:

- 1) Los efectos de irregularidades locales del terreno,
- 2) las variaciones diurnas asociadas con la posición del sol y de luna,
- 3) los efectos barométricos de pequeña magnitud y
- 4) los posibles cambios seculares no revelados sino por largos períodos de tiempo.

#### **Anomalías de la Gravedad.**

Para utilizar eficazmente las observaciones de gravedad es necesario calcular las anomalías que representan la diferencia entre el valor observado de la gravedad y el calculado, teniendo en cuenta los diferentes factores que se sabe influyen en la gravedad y que pueden ser realmente evaluados. Para hacerlo, se usa un modelo matemático definido (esferoide) que tiene más o menos la misma forma que la tierra, para que pueda tenerse en cuenta el efecto gravitacional debido a los cambios en latitud, incorporando el efecto de la variación tanto del radio de la tierra

como de la fuerza centrífuga.

Para el presente estudio, la forma usada es la descrita por la fórmula de gravedad internacional de 1930,  $g = 978.049 (1 + 0.0052884 \text{ sen}^2 \phi - 0.0000059 \text{ sen}^2 2\phi)$  donde  $\phi =$  la latitud del punto de observación.

El efecto de la altura del punto de observación por encima de la superficie esferoidal, tomada como el nivel del mar, se calcula tomando como base el gradiente vertical de la gravedad, que puede ser  $-0.3086$  mgals por metro. El efecto gravitacional de la masa incluida entre el nivel de observación y el nivel del mar se calcula del mismo modo que para una capa de material que tenga ese espesor o sea,  $g = 2\pi\gamma\sigma h$  ó  $0.04185 \sigma$  mgals por metro donde  $\sigma =$  a la densidad de las rocas incluidas. El efecto de las irregularidades topográficas puede evaluarse directamente en los mapas topográficos en términos de diferencias en altura y distancia desde el punto de observación. El efecto de cambios locales conocidos en la densidad de las rocas a cualquier profundidad puede evaluarse usando una técnica análoga. El efecto de las variaciones en la marca debido a la atracción del sol y de la luna también puede ser calculado directamente usando tablas especialmente preparadas. Los valores observados de la gravedad fueron determinados con relación a la base de gravedad de la Universidad de Wisconsin, que tiene un valor absoluto de  $980.3689$  mgals en el sistema Potsdam.

Las anomalías resultantes de diferencias entre los valores observados de gravedad referidos a una base absoluta y los valores teóricos de la gravedad, calculados sobre la base anteriormente indicada, se conocen por anomalías de Bouguer. En tales anomalías no se hizo el intento de tomar en cuenta el efecto de la distribución de masa en la profundidad para la compensación isostática. Aunque se reconoce el efecto isostático como cierto, cualquier corrección debe implicar necesariamente interpretaciones geológicas referentes a la propia corteza con materiales y resistencia de naturaleza hipotética. Debido a estas dudas, las anomalías residuales (isostáticas e isobáricas) pueden o no jugar un papel considerable en relación con las diferencias entre las verdaderas condiciones corticales y las supuestas, así como representar los efectos de condiciones geológicas superficiales o sub-superficiales desconocidas que no se consideraron. Por eso, para estudios cuan-

titativos, es mejor usar los valores de anomalías de Bouguer, pues aún cuando estas anomalías incorporan los efectos de varias distribuciones desconocidas de masa, no están basadas en una serie de falsos supuestos. Para separar los efectos relacionados con la estructura cortical y otras distribuciones profundas de masa, tales como los causados por variaciones litológicas en el basamento y los causados por factores geológicos superficiales, es mejor usar métodos empíricos como se hace comúnmente en los estudios de exploración petrolera.

A pesar de las reservas anteriores sobre las limitaciones cuantitativas de las anomalías isostáticas e isobáricas, dichas anomalías tienen considerable valor cualitativo y por medio de un estudio combinado, basado tanto en anomalías de tipo Bouguer como isostáticas, puede obtenerse información de gran valor geológico. Por ejemplo, ya que con anomalías de Bouguer pueden definirse las dimensiones físicas de la probable estructura actual de la corteza terrestre, las anomalías de tipo isostático servirán para indicar el grado de equilibrio isostático que existe en la referida área; esto es, cuando que la profundidad de la masa compensadora resulte casi correcta, muy pequeña o muy grande para la distribución de la masa topográfica superficial. Esta información tiene significado tectónico, particularmente en lo que concierne a la estabilidad cortical tectónica. Las anomalías de Aire Libre, que solamente incluyen la corrección por alturas, no serán consideradas en el presente estudio pues su valor geológico está restringido a áreas que sólo tienen pequeñas irregularidades topográficas. En terrenos de condiciones ideales (llanuras y mesetas) la anomalía de Aire Libre iguala aproximadamente a la anomalía isostática.

#### *Procedimientos usados para la Reducción.*

Para hacer las reducciones de la anomalía, se usó una densidad  $2.67 \text{ gm/cm}^3$  para todas las estaciones en tierra, excepto en la Llanura Costera, donde fueron reducidas usando un valor de  $2.4 \text{ gm/cm}^3$ . En las estaciones marinas, los valores de la anomalía de Aire Libre (de hecho valores de Bouguer, ya que la masa de agua sobre el aparato de gravedad sumergido en un submarino se tuvo en cuenta) fueron posteriormente corregidos para la deficiencia de masa de la columna de agua inferior, teniendo en cuenta la diferencia en densidad entre la masa de la tierra

( $2.67 \text{ gm/cm}^3$ ) y del agua del mar ( $1.03 \text{ gm/cm}^3$ ). Esto último puede ser considerado como una corrección geológica. Si la profundidad hasta el basamento fuera conocida en todas partes de la tierra, así como la densidad verdadera de los sedimentos, podría hacerse una corrección similar para las estaciones de tierra. Debido al aumento en los valores de la densidad en las rocas sedimentarias con la profundidad, resultante de la consolidación causada por el peso estático y la cementación que es mayor en rocas profundas y más antiguas aún en cuencas sedimentarias muy profundas (5 a 6 kms), la corrección geológica raras veces excederá de 25 a 30 mgals. Sin embargo, para una estación marina, con una profundidad similar de agua, la corrección será 300 o más mgals. Por lo tanto, es esencial para los estudios de la corteza que las llamadas anomalías de Bouguer modificadas se empleen cuando se trata de estaciones marinas, debido a la gran deficiencia en masa cercana a la superficie respecto a la columna de agua.

#### METODO DE ANALISIS

En vista de que el nudo en que se presentan las anomalías de Bouguer está controlado por la distribución compensadora de masa en la profundidad por cambios en el relieve superficial, efectos "heredados" de raíces aún existentes de antiguos sistemas de montañas ya desaparecidos y variaciones en densidad de las masas de rocas superficiales y cercanas a la superficie, es necesario usar algún procedimiento para separar los efectos de la gravedad debidos a los diversos componentes. Esto comunmente se hace por medio de un proceso empírico de alisamiento basado en perfiles seccionales o de una promediación analítica del tipo de rejilla, para determinar el efecto llamado "regional" que puede substraerse de las anomalías de Bouguer para obtener efectos residuales. El grado de alisamiento usado determina el orden de control representado en estos residuos. Ya que la compensación isostática parece ser razonablemente aproximada en México, el efecto compensador por la topografía actual puede determinarse directamente de la corrección isostática basada en la teoría isostática de Pratt. Esta teoría admite menor número de suposiciones con relación a la estratificación cortical y su litología

asociada y sólo implica igual presión a determinada profundidad. Con apoyo en estudios estadísticos de la gravedad hechos por el U.S. Coast and Geodetic Survey por Bowie (1917), referentes a la más posible profundidad de compensación en los Estados Unidos, se encuentra que varía con las diferentes provincias fisiográficas. Para áreas de baja altura, la profundidad de compensación a 56 kms dá el mínimo de residuos y para áreas de gran altura parece mejor un valor de 113.7 kms y este valor ha sido adaptado para el estudio preliminar en México. Los datos fueron tomados de las principales observaciones hechas en la red pendular de México, usados por de la O Carreño (1949). Para el área fronteriza con Estados Unidos se usaron las tablas preparadas por Duerksen (1949) y sus valores se aprovecharon para formar el mapa (Fig. 5) de las anomalías teóricas de Bouguer. Aunque el valor de la densidad cortical de  $2.67 \text{ gm/cm}^3$ , que se usó al calcular la corrección isostática tal vez sea más próximo a  $2.85 \text{ gm/cm}^3$ , los valores en la parte central de México tienen un error no mayor de 7% a causa de esta incertidumbre. Si la densidad media de la columna sobre el nivel del mar es realmente de  $2.67 \text{ gm/cm}^3$ , no habrá diferencia en los valores de anomalías. La mayor o menor concordancia entre el mapa de anomalías reales de Bouguer y el de las anomalías teóricas, basadas en la corrección isostática, muestra tanto lo completo de la compensación isostática como el grado en que puede ser conocida la estructura cortical.

Aunque fué posible hacer una apreciación general de las condiciones corticales en México sobre la base anteriormente indicada, debido al limitado número de datos que existen para todo el territorio, sólo fué posible hacer una apreciación detallada de la estructura cortical en el caminamiento de Acapulco-Tuxpan a lo largo del cual se hicieron observaciones en intervalos de 3 a 5 kms.

## RESULTADOS OBTENIDOS

### *Relaciones Regionales.*

El mapa regional de la Fig. 6 se construyó a base de los valores de anomalías de Bouguer observados y en contraste con la Fig. 5, no está limitado a México incluyendo toda el área que rodea al Golfo de México y pudiendo reconocerse la continuidad de los rumbos hacia el norte y el este. El rasgo más notable del mapa de anomalías es el amplio y pronunciado mínimo de anomalías de la gravedad asociado con la región de la Meseta Central, sugiriendo que la deficiencia de masa cortical a la profundidad requerida para el equilibrio isostático tiene una influencia dominante sobre dichas anomalías. Una comparación con el mapa de anomalías teóricas de la Fig. 5 muestra que ambos mapas concuerdan fundamentalmente tanto en la distribución como en la magnitud de las anomalías, aunque existen algunas excepciones. La distribución de las variaciones locales indica una influencia geológica local que será considerada posteriormente con mayor detalle. La circunstancia de que casi en todas partes los verdaderos valores de las anomalías de Bouguer son más negativos de lo que se requiere para el equilibrio isostático tiene probable significación para la interpretación de la corteza, indicando que posiblemente en todo el país existen dichas anomalías isostáticas negativas y que la profundidad de compensación es menor de 113.7 kms o que los materiales cercanos a la superficie tienen una densidad menor de  $2.67 \text{ gm/cm}^3$ .

### *Valores de las anomalías isostáticas.*

La Fig. 7 es un mapa de anomalías isostáticas basado en los valores de las estaciones mexicanas de péndulo con una profundidad de compensación de 113.7 kms, pudiendo verse que el promedio de anomalías isostáticas en la Meseta Central es de unos -20 mgals. Aunque esta divergencia de promedio dependa más o menos de la incertidumbre relativa al valor de la densidad cortical, otros datos posteriores indican que la anomalía está relacionada tal vez con la profundidad de compensación usada, existiendo dos áreas donde las divergencias de la isostasia son mayores (en promedio -40 mgals). Dichas áreas aparecen como fajas alargadas,

una paralela a la Sierra Madre Occidental y la otra paralela a la Costa del Golfo (de México), que cruzan unidades estructurales superficiales y la topografía, extendiéndose una desde el Istmo de Tehuantepec hasta la frontera con Arizona y otra desde las cercanías de Nuevo Laredo a través de Monterrey hasta la Meseta de México. Otras áreas anómalas tienen naturaleza más local.

Aunque se acostumbra atribuir las divergencias del equilibrio isostático a efectos de masa subcortical anormales o a geología superficial, no debe olvidarse que también las anomalías pueden relacionarse con las cifras supuestas al hacerse la corrección isostática cuando no son aplicables, por ejemplo, la profundidad de compensación usada con la teoría de la isostasia de Pratt, el modelo cortical usado con la teoría de Airy (raíces montañosas) o la cifra de compensación (isostática) local en áreas donde realmente existe compensación isobárica.

En el presente estudio, para no atribuir significación geológica a las divergencias aparentes del equilibrio isostático, se realizó un análisis previo para definir la parte de anomalías que podría conferirse a mala selección en la profundidad de compensación empleada.

Usando los datos recientemente calculados y aún no publicados de Medina (1956), que bondadosamente fueron facilitados para el presente estudio, las anomalías isostáticas para profundidades de compensación de 56.6 kms, 96 kms y 113.6 kms fueron examinadas estadísticamente para precisar la profundidad que proporciona valores mínimos. A base de tal análisis estadístico, se encontró que una profundidad de compensación de 96.6 kms daba anomalías más cercanas a cero y que usando 113.7 kms para compensación había tendencia a anomalías negativas o bien, si eran 56.7 kms a anomalías positivas. También se realizó un análisis gráfico usando valores de anomalías en función de la altura y aunque la variabilidad de valores para cualquier altura era amplia, se estableció que tenían una tendencia definida a relacionarse sistemáticamente con la altura. Otra prueba más consistió en promediar valores de anomalías para incrementos en altura que se calcularon y dibujaron en función de este dato. La gráfica resultante (Fig. 8) casi era sorprendente, pues todas las profundidades de compensación podían representarse por una figura que se asemeja a una curva sinusoidal en expansión y cuya amplitud aumentase con la altura, siendo imposible determinar de inmediato la signifi-

cación que pudiera darse a la forma de dichas curvas. Sin embargo, si se recuerda que en gran parte las provincias fisiográficas de México están caracterizadas por secuencias definidas de rocas que tienen notables diferencias en valores de su densidad, entonces la ondulación de aquellas curvas ya adquiere significación. Las áreas con rocas de la más alta densidad corresponden a la cima de las curvas y las áreas con rocas de la más baja densidad a la depresión. Si se examinan dichas relaciones en detalle, puede verse que las anomalías isostáticas negativas más notables se obtienen para todas las profundidades de compensación en altura mayores a 3,500 metros, sitios que corresponden a picos volcánicos. Si bien la densidad total de rocas de ese material probablemente está por encima de  $2.75 \text{ gm/cm}^3$ , la presencia de cenizas, estructura vesicular y otros materiales huecos probablemente indican una roca cuya densidad general puede o no ser mayor de  $2.3 \text{ gm/cm}^3$ . Puesto que al calcular la reducción de masa se había usado una densidad de  $2.67 \text{ gm/cm}^3$ , existiría una ficticia anomalía local de unos  $-15 \text{ mgals}$ , como si la verdadera densidad fuese de  $2.3 \text{ gm/cm}^3$  y el sitio estuviese a una altura de más de 1,000 metros sobre el área circundante. Otra causa de anomalías negativas en tales sitios podría ser la existencia de una cámara de lava subterránea, donde al disminuir la presión se ayudase a subir bajo la superficie a una masa interior cuya densidad fuera menor de la densidad normal de la corteza.

Para una elevación de unos 2,700 metros correspondiente al área de la Meseta Central, los valores máximos aparecen en todas las curvas y la anomalía casi llega a cero para una profundidad de compensación de 96.6 kms. En tal caso se piensa que la densidad media se aproxima a  $2.67 \text{ gm/cm}^3$ , valor usado en la reducción de masa. Para una profundidad de compensación de 113.7 kms la anomalía es cercana a  $-10 \text{ mgals}$  y para 56.7 kms se aproxima a  $+25 \text{ mgals}$ .

En las curvas, las depresiones adyacentes indican estaciones situadas casi siempre en el área occidental de cuencas intermontanas y en las laderas que limitan a la Meseta. Las rocas superficiales de baja densidad no explican las anomalías negativas observadas, pues dentro del área de cuencas los sedimentos casi siempre son de caliza cuya densidad es de unos  $2.7 \text{ gm/cm}^3$  y fuera de dicha área, a la misma altura las rocas casi siempre son sedimentos paleozoicos alterados cuyos valores en densidad posiblemente no tienen mayor significación. Consecuente-

mente, los valores negativos de anomalías isostáticas deben relacionarse con una distribución de masa a mayor profundidad, situación análoga a la observada en las Cuencas de Wind River, Bighorn y otras en las Montañas Rocosas de los Estados Unidos, caracterizadas todas ellas por valores locales de anomalías negativas bien marcados e inexplicables cuantitativamente por la densidad de sus sedimentos. La relación entre anomalías negativas y estructuras de cuencas parece ser bastante común en todo el mundo, como lo ha demostrado el estudio de Skeels (1940).

Una interpretación alterna que comprendiese tanto las áreas de rocas paleozoicas como mesozoicas sería que dichas áreas, por coincidencia, correspondiesen al sitio de un antiguo sistema montañoso cuyo efecto "de raíz" aún persistiese o bien, que fueran la zona de engrosamiento cortical postulada por Gunn. Esto último no parece posible, pues no hay pruebas de una faja paralela de anomalías positivas.

El "alto" en la curva de alturas menores corresponde a los macizos apalachianos de tipo *piedmont*, compuestos en gran parte de rocas cristalinas cuya densidad se aproxima a  $2.8 \text{ gm/cm}^3$ .

La depresión en las curvas de alturas situadas en la región de la Llanura Costera posiblemente reflejan el espesor de los sedimentos terciarios, cuya densidad es de  $2.4 \text{ gm/cm}^3$  o menos.

La cima de valores de anomalías (cero) en la costa se cree que está relacionada, a lo menos parcialmente, con la transición de la estructura cortical de tipo continental a la estructura de tipo oceánico.

Excepto para el área de la línea de costas y regiones internontanas, la explicación de las anomalías isostáticas parece estar relacionada con factores geológicos observables y de acuerdo con cálculos casi cuantitativos en relación con estos efectos, como se esperaba.

Las conclusiones derivadas tanto del análisis estadístico como del estudio gráfico mencionado son:

- 1) Una profundidad de compensación de 96.6 kms., que es casi la correcta para la totalidad de México,
- 2) el equilibrio isostático para la actual topografía casi es aproximado y

3) las divergencias de la isostasia en su mayor parte están relacionadas con factores geológicos superficiales o cercanos a la superficie. Únicamente en el área occidental, como lo demuestra el mapa de anomalías isostáticas (Fig. 7), existe una posibilidad de variaciones sistemáticas indicando estructura cortical y litología anormales.

#### *Anomalías en las Areas Marinas Adyacentes*

Si se examinan las anomalías de Bouguer en las áreas marinas adyacentes, ya corregidas para las columnas de agua, se ve que las mayores de +255 mgals son características tanto de las áreas próximas del Océano Pacífico como del Golfo de México. Aunque no hay datos para el Golfo de California, las observaciones en tierra y la escasa anchura de esa estructura sugieren que dicha área también puede presentar anomalías positivas de Bouguer. Por cuanto a la medida sísmica de la profundidad de la discontinuidad de Mohorovičić, por Ewing, Worzel et al. (1955), en el Golfo de México y por Fisher y Shor (1956) frente a la costa del sur de California y de México, así como a las medidas en el continente por Totel y Tuve (1955) en el sur de Arizona y de Shor (1953) en el sur de California, todas confirman que las marcadas anomalías negativas de Bouguer en el continente y las fuertes anomalías positivas de Bouguer modificadas en el mar son como se esperaba, ya que existe un desplazamiento estructural de la corteza de unos 25 kms. en la discontinuidad de Mohorovičić. Sobre la base de estas observaciones y de razonables deducciones de las velocidades sísmicas (Fig. 9) respecto al posible contraste de la densidad en la discontinuidad de Mohorovičić, parecería que en gran parte la compensación isostática tiene lugar en el nivel más profundo de la discontinuidad de Mohorovičić y que actúa un mecanismo análogo al postulado en la teoría de la isostasia de Airy. Dicha teoría no elimina la posibilidad de profundas desigualdades de masa que contribuyen al equilibrio isostático, lo cual había sugerido ya el análisis de los valores de anomalías isostáticas en el Golfo de México, aunque proporciona una base de trabajo para estudios analíticos cuantitativos (a lo menos en términos generales) para determinar la estructura cortical cercana a la superficie.

### *Correlaciones entre las Anomalías de Bouguer y la Geología.*

En general, puede relacionarse el efecto de las anomalías positivas de Bouguer locales sobre el continente con las masas de rocas ultrabásicas, como sucede en Cuba o con elementos positivos similares tectónicamente a la plataforma de la Meseta del Colorado, del Alto de Amarillo-Wichita, del Alto de Sabinas o del Alto de Llano, en los Estados Unidos. En algunas áreas, a base de anomalías magnéticas, es probable que tanto los elementos estructurales como la litología contribuyan a las anomalías, como es el caso del Alto de Amarillo-Wichita. Anomalías negativas de Bouguer locales, similares a las observadas en las Cuencas de Delaware y Guadalupe, la Cuenca de Arkansas y la Fosa de Salton, etc., en los Estados Unidos, son también probablemente efectos combinados de origen tectónico y litología asociada. En muchas cuencas los sedimentos pueden tener una densidad media de no más de  $2.4 \text{ gm/cm}^3$  aún después de calcularse los efectos de compactación y cementación. Sin embargo, existen cuencas como la de Cudapah, en la India, donde los sedimentos tienen una densidad tan alta o mucho más alta que las rocas circundantes y en tales condiciones, los sedimentos interiores pueden llegar a neutralizar el efecto gravitacional relacionado con la estructura. En el Gran Desierto Salado de Utah se cree que la anhidrita presente tiene ese efecto, notándose también que así como las áreas de rocas básicas están caracterizadas por anomalías positivas, las áreas de rocas graníticas están frecuentemente caracterizadas por anomalías negativas. Teniendo en cuenta tales correlaciones, se examinaron en México las áreas de anomalías locales para averiguar sus causas probables.

Si se coloca el mapa de anomalías de Bouguer sobre el mapa tectónico (Fig. 10), podrá verse que en su mayoría las áreas de anomalías locales en México que dan identificadas por rasgos tectónicos o litológicos conocidos. Comenzando en la parte central del norte de México, se observa que algunos centros estructurales de anomalías positivas locales se sitúan cerca de Ciudad Juárez, Chihuahua, sobre lo que parece ser un "horst" en los Estados Unidos con rumbo norte-sur, el cual pasa a través de El Paso, Texas. Como faltan datos detallados para dicha área, no se sabe si la anomalía verdaderamente es tan ancha o como lo muestra el mapa no y en vista de la dimensión tan angosta del "horst," en comparación con el cercano Alto de Sacramento, también caracterizado por una anomalía positiva local del mismo

tamaño aproximado, es probable que la anchura de la anomalía sea demasiado grande.

Al sur-este de la anterior, otra marcada anomalía positiva se muestra en la frontera con Texas cerca de Ojinaga, Coahuila, la cual parece estar asociada con el área volcánica de Mount Davis. Sin embargo, no se ha aclarado si dicha anomalía está relacionada con la litología o con el "horst" estructural que coincide con el área del derrame, creyéndose que la estructura tiene influencia dominante.

Un poco más al este, siguiendo la frontera internacional, puede verse que el rumbo estructural positivo del área del Alto de El Burro-Picachos, en Nuevo León, que se extiende hasta el Alto de San Carlos, en Tamaulipas, se refleja en las anomalías de la gravedad por una serie bien definida de "altos", de los cuales la anomalía máxima tiene lugar precisamente al norte de González, Tamaulipas. En contraste con la expresión superficial de este rumbo positivo que termina más o menos en la latitud de Tampico, se conserva la misma expresión de gravedad hacia el sur hasta cerca de Poza Rica, Veracruz.

Al norte de las mencionadas áreas de anomalías positivas y con centro en la Cuenca de Burgos, existe un pronunciado mínimo de gravedad local cuyo contorno coincide muy estrechamente con los límites estructurales señalados por la zona de fallas de Cerralvo al oeste y por el Alto de San Carlos al sur.

Aparece una área similar de anomalías negativas en la Cuenca de Sabinas cerca de Ocampo, Coahuila, donde la anomalía estructural indica ser mucho mayor que los límites estructurales observables de la cuenca y quedar colocada, en parte bajo la faja de pliegues de la Sierra Madre Oriental. Esta situación es muy similar a la observada en la Cuenca de Arkansas y la faja de pliegues superpuesta de los Montes Ouachita, en los Estados Unidos, donde las anomalías de la gravedad muestran un amplio mínimo que sugieren que los Montes Ouachita plegados no son sino un efecto superficial que cubre una cuenca estructural mucho mayor de lo directamente observable.

Existe una bien definida anomalía negativa local superpuesta al fuerte gradiente regional asociado con el frente de la Sierra Madre Oriental con centro en Ciudad Victoria, Tamaulipas. Sin embargo, no se conoce el efecto geológico para esta característica tan obvia cercana a la superficie y de manera similar, la anomalía

negativa local en la costa cercana a Tecolutla, Ver., no está asociada de manera cierta con algún rasgo definido tectónico o litológico.

Un poco al sur de dicha área, por otra parte, el Alto de Teziutlán apenas aparece indicado en los valores de anomalías y en contraste, la cercana Cuenca de Veracruz aparenta estar bien reflejada en las anomalías cuyo cierre local está sobre 40 mgals.

La anomalía positiva local de más de 70 mgals, asociada con el Macizo de San Andrés en la costa de la Cuenca de Veracruz indica que por debajo del material lávico superficial existe una masa considerable de rocas ultrabásicas. Es el área de anomalías positivas más grande conocida en México.

Al sur de la Cuenca de Veracruz, en el Istmo de Tehuantepec, existe cerca de Juchitán otra área de marcadas anomalías positivas que cubren en parte una cuenca superficial. Probablemente, dicha anomalía está relacionada con el emplazamiento de una fase más básica de la gran masa de rocas intrusivas graníticas de proporciones batolíticas dentro del basamento, la cual aflora precisamente al oeste del área de anomalías entre el Istmo de Tehuantepec y Guatemala.

En la parte norte del Istmo de Tehuantepec, los elementos estructurales de la Cuenca Salina al oeste del Macizo de San Andrés, de la Cuenca de Tabasco y de la división intermedia, parecen estar reflejados en la combinación de anomalías de la gravedad. La significación geológica del área de anomalías positivas situada justamente al oeste de la Laguna de Términos, en la Cuenca de Campeche, no se conoce bien y de manera semejante, la significación geológica del bien definido mínimo de gravedad que se extiende entre Mérida y Hopelchen, en la Península de Yucatán, tampoco es conocida. El fuerte gradiente de anomalías positivas que caracteriza la mitad occidental de la Península de Yucatán parece concordar en su distribución con las anomalías de la gravedad observadas en el occidente de Cuba, sugiriendo una relación tectónica entre ambas áreas. También la distribución y los valores de anomalías indican un adelgazamiento cortical en la parte oriental de Yucatán, que no se conoce en otras partes de México.

A lo largo de la costa occidental de México la escasez de datos apenas permite reconocer las características más generales de las anomalías, destacando el

mínimo de gravedad local asociado con la Cuenca del Balsas. Sin embargo, como se ha mencionado previamente en relación con la distribución de las anomalías isostáticas, puede ser completa o parcialmente fortuita esa correlación. Las anomalías isostáticas indican que esta área es una faja de anomalías negativas locales que cruzan varios elementos estructurales, lo cual sugiere una causa dentro del basamento.

Se desconoce la causa de las anomalías negativas locales en las cercanías y al oeste de Morelia, Michoacán, aunque están colocadas en un eje de anomalías negativas locales con rumbo paralelo a la línea de costa, a la cual cruza en Puerto Vallarta, Jalisco. Puede tener alguna significación tectónica y estar relacionada con la zona de fractura Clarión en el Océano Pacífico, postulada por Menard (1955), que corta al continente en dicha región. Ese alineamiento, si existe realmente, parecería cortar el área de la Cuenca del Balsas en el mínimo, cerca de Ameca, Jalisco. Alrededor de Durango, el mínimo de gravedad no tiene control geológico superficial que sea conocido y es una de las fajas de anomalías de ese tipo que se han mencionado en relación con algunas características del interior del basamento.

Entre los elementos tectónicos conocidos que no muestran pronunciados efectos de gravedad están los pliegues estructurales de los flancos de la Sierra Madre Oriental, la Antefosa de Chicontepec que se localiza a lo largo de la faja de pliegues de esa misma cadena y el arrecife de la Faja de Oro en la Llanura Costera del Golfo de México.

Para estudiar las correlaciones locales con la geología en mayor detalle así como los rasgos de la estructura cortical, fué realizado un estudio del perfil seccional entre Acapulco y Tuxpan.

#### *Sección Acapulco-Tuxpan.*

**Estructura Cortical.** La Fig. 11 muestra la línea del caminamiento entre Acapulco y Tuxpan, con las extensiones marinas a través de la Trinchera de Acapulco y dentro de la Fosa de Sigsbee, en el Golfo de México, así como el perfil de alturas y las anomalías de Bouguer observadas. Para mostrar que los valores de anomalías están relacionados principalmente con las distribuciones de masa subsuperficiales requeridas para el equilibrio isostático, también se han dibujado para

tres profundidades de compensación las correcciones isostáticas y como se ha dicho antes, parecen más adecuados para las anomalías de Bouguer observadas los valores para una profundidad de compensación de 96.6 kms. Como dato suplementario también se muestran los valores de las anomalías isostáticas para estaciones de péndulo a lo largo del caminamiento.

Antes de entrar en la consideración de tales datos debe recordarse que si bien tanto el Océano Pacífico oriental como el Océano Atlántico occidental se caracterizan por anomalías isostáticas cuyo promedio es cero, a pesar de la profundidad del agua, el Golfo de México está caracterizado por anomalías isostáticas que se hacen mas positivas con la profundidad del agua, alcanzando un máximo de +80 mgals en la Fosa de Sigsbee. El exceso de masa que da origen a dicha anomalía se debe a las rocas internas subyacentes a la estructura cortical, que se revela por la discontinuidad de Mohorovičić, como lo indican estudios de datos sísmicos obtenidos por Ewing, Worzel et al (1955). Aunque las observaciones sísmicas denuncian un extraordinario espesor de material cortical en el Golfo de México, con una discontinuidad de Mohorovičić situada a una profundidad de unos - 17 kms, en contraste con cerca de - 11 kms observados en los Océanos Atlántico y Pacífico, lo cual podría interpretarse como explicación de la anomalía, esa conclusión no está probada cuantitativamente.

Si se calcula y compara la presión de una columna unitaria hasta el nivel de - 17.2 kms (discontinuidad de Mohorovičić) en el Golfo de México con la presión al mismo nivel en el Océano Atlántico, podrá verse que la masa en el Golfo de México es realmente menor que por encima del mismo nivel en el Océano Atlántico, donde la isostasia es casi aproximada. Para hacer las anteriores comparaciones se usó una curva derivada empíricamente que relaciona los equivalentes de la densidad de las rocas para valores de las velocidades de ondas de compresión con las secciones corticales determinadas sísmicamente en las dos áreas. La Fig. 9 muestra la curva empleada que se basó en valores para densidad y velocidad sísmica de los mismos tipos de rocas en la lista del *Hand-book of Physical Constants* editado por Birch y Spicer (1942) y en datos no publicados que ha compilado Woollard. Los datos corticales oceánicos que se usaron son los establecidos para el área del Atlántico Norte por Ewing, Sutton y Officer (1954). Seguidamente se tabulan los datos y resultados pertinentes.

### Golfo de México

(Promedio de anomalías isostáticas + 80 mgals)

Columna cortical	(1) Espesor	(2) Profundidad	(3) Velocidad	(4) Densidad	Presión por columna unitaria 1 x 4
Agua	3.5 km	3.5 km		1.03	3.6
Sedimento (1)	1.5	5.0	1.9 km/s	2.30	3.4
Sedimento (2)	3.0	8.0	3.0	2.34	7.0
Sedimento (3)	3.9	11.9	5.0	2.60	10.2
Basamento	5.3	17.2	6.9	2.85	15.8
Discontinuidad de Mohorovičić					
Subcorteza			8.0	3.27	
Presión a - 17.2 km .....					40.0

### Océano Atlántico del Noreste

(Promedio de anomalías isostáticas 0 mgals)

Columna cortical	(1) Espesor	(2) Profundidad	(3) Velocidad	(4) Densidad	Presión por columna unitaria 1 x 4
Agua	5.0 km	5.0 km		1.03	5.15
Sedimento	1.0	6.0	1.8 k/s	2.30	2.30
Basamento	4.5	10.5	6.5	2.85	12.80
Discontinuidad de Mohorovičić					
Subcorteza	6.7	17.2	7.98	3.27	21.9
Presión a - 17.2 km .....					42.15

Puede concluirse del anterior análisis que:

- 1) La estructura cortical representada por la configuración de la superficie de la discontinuidad de Mohorovičić es solo una indicación parcial de la distribución de masa en la profundidad que controla los valores de la gravedad y en conse-

cuencia, resulta una falacia asumir que la compensación isostática se realiza por encima del nivel más bajo de la discontinuidad de Mohorovičić;

2) las interpretaciones estructurales de la corteza deducidas de los análisis cuantitativos de los datos de la gravedad usando las llamadas columnas corticales "standard" oceánica y continental solo pueden considerarse como representando una posible interpretación entre varias de dichos datos.

La segunda conclusión se expone más como una precaución que como una condenación de los métodos a que se ha hecho referencia y que fueron empleados tan ampliamente por Worzel y Shurbet (1955). Dichos métodos realmente son aplicables *con ciertas limitaciones* siempre que las anomalías de la gravedad de Bouguer parezcan originarse en la distribución de masa por encima de la discontinuidad de Mohorovičić y aunque sólo existen muy pocos datos para comprobar realmente la hipótesis, se considera razonable a base de la información disponible postular lo siguiente:

1) Donde el equilibrio isostático es aproximado, después de tomarse en cuenta el efecto de las variaciones anormales de masa conocidas, tales como el espesor de sedimentos de baja densidad, la columna acuática oceánica o las rocas intrusivas de alta densidad, las anomalías de Bouguer están relacionadas principalmente con la distribución de masa cortical por encima de la discontinuidad de Mohorovičić;

2) Donde existen grandes anomalías positivas isostáticas, cuya causa no puede relacionarse con obvios factores geológicos superficiales no tomados en cuenta en las reducciones o con una condición de la compensación isobárica clara más que una compensación isostática local, no podrá definirse si la masa que causa la anomalía está por encima o por debajo de la discontinuidad de Mohorovičić;

3) donde existen grandes anomalías isostáticas negativas parece probable a base de consideraciones geológicas, que su origen está por encima de la discontinuidad de Mohorovičić. Sin embargo, aún no puede establecerse si una anomalía isostática negativa está relacionada con unidades litológicas en el interior del basamento, por ejemplo, el granito que está universalmente caracterizado por anomalías negativas o con la configuración de la discontinuidad de Mohorovičić. El

tamaño, la distribución y las condiciones geológicas de las áreas de anomalías deben considerarse como significantes al estudiarse las condiciones reales, como ilustra la faja de marcadas anomalías isostáticas negativas que promedian - 40 mgals, asociada con el sistema de las Montañas Appalaches e indudablemente relacionada con dicha unidad tectónica. La más probable explicación geológica es que existe una relación con las "raíces" no compensadas de tales elevaciones como huella de etapas anteriores de su historia cuando eran mucho más altas que ahora. Tales "raíces" producirían un desplazamiento local hacia abajo de la discontinuidad de Mohorovičić y esta conclusión ha sido comprobada por los resultados de estudios de explosiones sísmicas realizados por Tatel y Tuve (1955) que comprueban un desplazamiento local de la discontinuidad de Mohorovičić de diez kilómetros en una área donde la anomalía de la gravedad de Bouguer es de unos - 100 mgals. Cálculos casi cuantitativos indican que esta anomalía es compatible con los datos sísmicos tanto por la extensión de las "raíces" de las montañas como por su material probable.

Deben corregirse los valores de las anomalías de Bouguer para el total de anomalías isostáticas cuando dichas anomalías puedan relacionarse con variaciones litológicas superficiales o cercanas a la superficie o con masas inferiores a la discontinuidad de Mohorovičić, antes de realizarse el análisis de la configuración de la superficie de dicha discontinuidad.

Para establecer los casos en que una cifra supuesta para compensación isostática local no es aplicable siéndolo la compensación isobárica, pueden seguirse dos caminos:

- 1) Si las áreas en que los rasgos topográficos superficiales tienen acusado relieve y son menores de 100 kms en anchura y
- 2) si la aplicación de una corrección isostática aumenta más que disminuye la anomalía de la gravedad local que la caracteriza. Prácticamente todas las unidades estructurales de la porción media de las Montañas Rocosas, tales como los Montes Bighorn, Laramide y la Cuenca Bighorn, etc., en los Estados Unidos, caen dentro de esta categoría al igual que los picos montañosos, islas y profundidades oceánicas.

En tales áreas, puesto que faltan conocimientos relativos al espesor y a la estructura de la corteza, es necesario separar empíricamente las influencias locales y regionales sobre los valores de anomalías de Bouguer observados usando métodos empleados frecuentemente en las exploraciones geofísicas. El efecto regional puede considerarse en tales áreas como relacionado principalmente con la estructura cortical en particular, situado por encima de la discontinuidad de Mohorovičić.

Aunque lo anterior parece tener aplicación general, aún existen dudas sobre lo que pueda deducirse acerca de las irregularidades de masa corticales por encima de la discontinuidad de Mohorovičić y su relación con su configuración más que con los cambios en densidad cortical, por ejemplo, en la Meseta del Colorado donde existe una anomalía isostática con promedio de 17 mgals sin causa suficiente y por lo tanto, esencialmente en equilibrio y donde las observaciones de Tatel y Tuve (1955) indican que la masa subsuperficial compensadora representada por la anomalía de Bouguer (cerca de -200 mgals) no está relacionada con la configuración de la discontinuidad de Mohorovičić como podría asumirse si se aceptan los postulados anteriores, pues parece que la compensación se realiza por cambios en la densidad del material cortical suprayacente. Condiciones similares parecen existir también en la meseta del Africa del Sur como lo indican las mediciones sísmicas de Willmore (1952) y los datos de gravedad obtenidos por varios grupos, entre ellos el de Woollard. Consecuentemente, las áreas que han sufrido en épocas relativamente recientes algún levantamiento parecen diferir de otras áreas en su mecanismo real de compensación y la causa de esta diferencia aparente solo puede explicarse en términos de un mecanismo diverso de levantamiento tectónico en tales áreas. El mecanismo más lógico y que estaría de acuerdo con las observaciones geológicas es un levantamiento pasivo y regional por expansión volumétrica del material cortical por encima de la discontinuidad de Mohorovičić, aunque se ignora si las relaciones observadas en la Meseta del Colorado y en el Africa del Sur son aplicables a México. En el presente estudio se realizó dicho análisis tanto considerando el engrosamiento cortical como su expansión volumétrica por debajo del área de la Meseta de México.

### **Condiciones Corticales al asumirse una Expansión Volumétrica para la Isostasia.**

Para determinar el efecto de una posible expansión volumétrica, se asumió que la discontinuidad de Mohorovičić en México está a una profundidad próxima a la que se ha observado sísmicamente en otras áreas continentales y se adoptó una profundidad de - 33 kms. La Meseta de México tiene una altura media de unos -2.1 kms sobre el nivel del mar y se caracteriza por una anomalía de Bouguer media de -220 mgals y en la costa, donde la altura es cero, la anomalía de Bouguer es también cero. Usando tales datos, la deficiencia en densidad requerida en la corteza para el equilibrio isostático por debajo de la meseta respecto a la columna de la costa puede calcularse aproximadamente usando la ecuación de la atracción gravitacional de la cubierta, encontrándose que dicha deficiencia es de  $0.16 \text{ gm/cm}^3$ . Si la densidad media en la costa, donde la anomalía es cero, equivale a  $2.84 \text{ gm/cm}^3$ , según lo indican Worzel y Shurbet (1955), para una sección tipo continental la densidad media por debajo de la meseta es de  $2.68 \text{ gm/cm}^3$ , asumiéndose que no existe deformación en la discontinuidad de Mohorovičić mientras el valor volumétrico sea de 4.6 %.

### **Estructura Cortical al asumirse un Engrosamiento para la Isostasia.**

Puede también determinarse aproximadamente usando los mismos datos anteriores, aunque asumiendo ahora una densidad cortical constante de  $2.84 \text{ gm/cm}^3$  y una flexión interior de la discontinuidad de Mohorovičić por debajo del área de la meseta, para tener un material de la cubierta capaz de desplazar las "raíces". En consecuencia, si en la misma ecuación se substituye la diferencia entre la densidad cortical y el material de la cubierta por  $0.43 \text{ gm/cm}^3$ , resulta que el engrosamiento cortical es de unos 12.2 kms, lo cual colocaría a la discontinuidad de Mohorovičić a una profundidad de - 45.2 kms por debajo de la meseta.

Aunque faltan datos sísmicos que confirmen una interpretación más que otra, la presencia de materiales del Terciario y del Reciente en extensos derrames sobre el área puede considerarse en apoyo de la idea de que las anomalías están relacionadas con una disminución en el promedio de densidad cortical por debajo del área de la meseta.

Si bien los autores tienden a considerar la expansión cortical como probable explicación de las grandes anomalías negativas de Bouguer en dicha área, hay razones para dudar que ese mecanismo también sea el responsable de la situación de otras unidades tectónicas continentales. El engrosamiento de la corteza por debajo de los Montes Appalaches y el levantamiento del área del escudo de Wisconsin determinados sísmicamente coinciden de manera estrecha con cálculos basados en las anomalías de la gravedad.

Para determinar la posible deformación cortical en el área baja próxima a la meseta se llevó a cabo un análisis cuantitativo de las anomalías de Bouguer observadas, asumiéndose un engrosamiento cortical a lo largo de una línea entre el Océano Pacífico y el Golfo de México y usando para dicho análisis una curva regional alisada que se calculó cuando se registraron las primeras anomalías. Después, se hicieron las correcciones para las anomalías isostáticas en el Golfo de México conocidas inicialmente en su relación con la distribución de masa por debajo de la discontinuidad de Mohorovičić, así como para una condición geológica desconocida, pero claramente inferior a la superficie, que produjese anomalías isostáticas positivas locales en la región de las laderas occidentales. La curva corregida resultante (ver Fig. 12) muestra una serie transicional de escalones que son característicos de las formas obtenidas en los límites de bloques afallados, de los cuales tres indican la transición entre el Océano Pacífico y la región de la Meseta Central y dos la transición entre el Golfo de México y dicha meseta. Así se calculó inicialmente el desplazamiento de los bloques al asumirse un afallamiento normal de la superficie de la discontinuidad de Mohorovičić y una divergencia en la densidad entre 2.84 y 3.27 gm/cm<sup>3</sup>. Dichos valores, al totalizarse los incrementos de los tres escalones entre el nivel de la discontinuidad de Mohorovičić en el Océano Pacífico a - 12 kms, coinciden casi a 0.1 kms en el área de la Meseta Central con los determinados para los incrementos de los dos escalones entre dicha discontinuidad en el Golfo de México a - 17.2 kms. La profundidad resultante para la discontinuidad de Mohorovičić, por debajo del área de la meseta, es de - 44 kms que está en acuerdo substancialmente con la cifra de 45.2 kms determinada en el párrafo previo al usarse un método menos exacto. La validez de este modelo

estructural fué comprobada determinando el perfil gravimétrico teórico continuo sobre el caminamiento transversal y usando un método graticular de dos dimensiones que se comparó con el perfil de anomalías observado. En general, hubo coincidencia aunque se necesitaron algunos ajustes para lograrla completamente. El modelo final que se acomodaba a los datos se muestra en la Fig. 12 y puede ser descrito en términos de la profundidad de la discontinuidad de Mohorovičić como sigue: Océano Pacífico - 12 kms, área costera del mismo Océano - 28 kms, área de cuencas intermontanas - 38.4 kms, área de la Meseta Central - 46.1 kms, área costera del Golfo de México, 31.4 kms y Golfo de México - 17.2 kms.

Este cuadro de la estructura cortical parecería muy convincente si no fuese por algunas determinaciones sísmicas en la región de mesetas de los Estados Unidos y del Africa del Sur. Puesto que los autores piensan que todas las regiones de mesetas deberían caracterizarse por relaciones similares, el anterior modelo de la estructura cortical a través de México tendrá que modificarse para mantener la profundidad de la discontinuidad de Mohorovičić sin hundirse por debajo del área de la meseta. Si bien los valores costeros de - 28 kms en el Océano Pacífico y - 31.4 en el Golfo de México coinciden más estrechamente entre sí que con el valor de las cuencas intermontanas de - 38.4 kms, parece más aceptable un valor continental de -30 kms, que es el postulado por debajo del área de la meseta, a pesar de lo cual debe considerarse al área de cuencas intermontanas al oeste de la meseta como un área de verdadero engrosamiento cortical. La sección estructural deducida se muestra en la Fig. 13 con algunos rasgos auxiliares como la ubicación de epicentros de temblores y volcanes principales.

### *Significación de las Medidas Sísmicas Corticales.*

Un factor que no se ha considerado en el análisis de la gravedad es el grado de confianza que puede tenerse en las medidas sísmicas continentales que se usaron en las interpretaciones, pues se asumió que la estructura cortical indicada por los estudios sísmicos era correcta. En algunos casos pudieron interpretarse esos datos de manera diferente, en particular al considerarse el número de capas existentes. En todos los casos se asumió que la estratificación era horizontal ,

lo que es muy dudoso y aunque tal incertidumbre indudablemente modificaría las profundidades calculadas para la discontinuidad de Mohorovičić, no se resolvería el problema básico relativo a la ausencia aparente de engrosamiento cortical por debajo de las regiones de mesetas. Si hay relación con las medidas sísmicas, la explicación más bien debe buscarse en el supuesto básico de un aumento consistente en velocidad con la profundidad y si el modelo de estructura cortical postulado por Gutenberg (1955), por ejemplo, es correcto para la reversión de velocidades por encima de la discontinuidad de Mohorovičić, esta condición no sería apreciable por datos de explosiones superficiales y las profundidades calculadas corecerían de significación para dicha discontinuidad. Los cálculos de tiempo de traslación basados en la dirección de los radios en el modelo de Gutenberg con una fuente de energía superficial, proporcionan resultados que sugieren la existencia de dos capas con velocidades de 6.2 kms/sec. y 8.1 kms/sec. Además, en razón de la refracción hacia abajo dentro de la capa cortical, los tiempos de llegada desde la discontinuidad de Mohorovičić tendrían cortas variaciones anormales en relación con los tiempos de traslación que indican las primeras llegadas más allá de unos 110 kms y la zona de sombra debida a la reversión de velocidades no se mostraría claramente.

Los cálculos de profundidad basados en tales datos colocarían a la discontinuidad de Mohorovičić a unos 19 kms y no a 34 kms como se indica en el modelo. Por otra parte, tomando en cuenta la discontinuidad de Conrad intercurrente en el modelo de Gutenberg a 35 kms, las llegadas quedarían ocultas en todas las observaciones puesto que aparecerían solamente como segundas llegadas. Aunque ninguno de los resultados de explosiones observadas se ajustan a dicho cuadro teórico, es significativo que la gráfica de tiempos de traslación calculada según el complejo modelo de Gutenberg para la estructura cortical resulte similar a la que se obtiene al suponerse que existen dos capas. Por ello, es aceptable que con el mismo modelo básico postulado por Gutenberg y con las dimensiones modificadas, los datos de tiempos de traslación puedan calcularse con tanta aproximación como por estudios de explosiones.

La más aceptable prueba sísmica en la Meseta del Colorado, a lo menos, contra la posibilidad de un error grave en la interpretación de las observaciones sísmi-

cas es que la velocidad de las capas superficiales variase entre 5.5 kms/sec y 5.8 kms/sec y no fuese de 6.1 kms/sec, como se ha observado en otras partes de los Estados Unidos, pues ello implicaría una densidad cortical entre  $2.7 \text{ gm/cm}^3$  y  $2.75 \text{ gm/cm}^3$  más que de  $2.84 \text{ gm/cm}^3$ . El efecto de gravedad para esa diferencia en densidad con la profundidad establecida para la discontinuidad de Mohorovičić a 34 kms sería de 160 mgals. Así se conciliarían ampliamente los datos de gravedad y sísmicos en la Meseta del Colorado, lo cual apoya la idea que dicha área se levantó por expansión volumétrica por encima de la discontinuidad de Mohorovičić y si existe una situación general, entonces la densidad cortical media por debajo de la Meseta de México debería ser de unos  $2.7 \text{ gm/cm}^3$ . En caso de que posteriores medidas sísmicas muestren una velocidad de las capas corticales correspondientes de 5.5 kms/sec, como se observa en Utah y a una profundidad somera de la discontinuidad de Mohorovičić, la hipótesis de la expansión volumétrica por debajo de la Meseta de México parecería comprobarse perfectamente.

#### ***Correlaciones con la Geología Superficial.***

En la Fig. 14 se muestra una sección geológica a lo largo del caminamiento Acapulco-Tuxpan, construída a base de los mapas preparados para las excursiones del XX Congreso Geológico Internacional siguiendo la misma ruta y mapas locales geológicos y subsuperficiales facilitados por Petróleos Mexicanos. Aunque resulta difícil por causa de una cubierta intermitente de materiales volcánicos decidir si todas las fallas normales indicadas en la parte occidental de la sección existen realmente o nó, puede indicarse evidentemente que el área está caracterizada por una estructura bastante compleja resultante del plegamiento y del afallamiento. La mayor incertidumbre en la mitad oriental del caminamiento reside en el desarrollo de la Antefosa de Chicontepec a lo largo del frente de la Sierra Madre Oriental y en la verdadera naturaleza de los pliegues y fallas existentes en su mayor parte cubiertos por materiales de los derrames, no existiendo información sobre el verdadero espesor del material volcánico y la naturaleza y posición de las rocas subyacentes en el área central. Sin embargo, existen rocas mesozoicas a unos 85 kms al norte de la Ciudad de México, pero en Pachuca los datos de perforaciones realizadas en

las minas indican que existen unos 3,000 metros de rocas volcánicas y consecuentemente, el perfil geológico debe considerarse como esquemático a lo menos en parte .

Dos tipos de anomalías de gravedad residuales se muestran en la figura 14, uno basado en la presunción de equilibrio isostático y el otro en la eliminación empírica de una curva regional alisada que se obtuvo de los valores de anomalías de Bouguer indicados en la Fig. 6. Puesto que la corrección isostática que se aplicó es solo una aproximación basada en la Fig. 5, puede causar considerable error en la zona de transición entre la meseta y las costas. Ambos tipos de anomalías residuales concuerdan en áreas exteriores caracterizadas por cambios superficiales o subsuperficiales locales en la atracción de masa, a pesar de lo cual las magnitudes generales de ambos tipos de anomalías difieren considerablemente. Las anomalías isostáticas están caracterizadas por valores cuyas magnitudes posiblemente resultan muy grandes para ser atribuidas a factores geológicos superficiales y en las áreas costeras las grandes anomalías pueden ser parcialmente ficticias. El pronunciado "bajo" cercano a Iguala que se observa en ambos perfiles de anomalías es verdadero y está asociado con la región de la Cuenca del Balsas que Arellano (1947) piensa que contiene una gruesa sección de sedimentos mesozoicos. No obstante, como se ha mencionado antes en relación con la distribución de anomalías isostáticas por áreas, esa correlación tal vez solo sea coincidente ya que a lo largo del rumbo dicha anomalía estructural parece cortar diversas provincias fisiográficas y geológicas en toda el área situada entre Guatemala y la frontera con Arizona. Los autores del presente estudio piensan más bien que deben correlacionarse con el efecto de "raíz" de un antiguo sistema montañoso y si la suposición de Arellano fuese correcta, la cuenca implicada debió tener casi 5,000 metros de profundidad para satisfacer los valores de anomalías, de acuerdo con una divergencia en densidad de  $0.2 \text{ gm/cm}^3$  y como el efecto del "horst" de Taxco compuesto por rocas paleozoicas en la porción central de la cuenca solo es de 4 mgals o sea, el 10% de las anomalías de dicha cuenca, es más probable que la divergencia mencionada sea demasiado alta pues ello determinaría que la estructura de la cuenca alcanzase aún mayores profundidades. Pequeñas anomalías asociadas con otros rasgos estructurales

superficiales, tales como pliegues, también existen, por ejemplo, en Taxco. En general, elementos estructurales positivos y negativos están asociados con anomalías locales del mismo signo, destacando dos estructuras notables que tienen escaso o ningún efecto gravitacional, una de ellas el arrecife de la Faja de Oro, compuesto por caliza de El Abra y la otra es la Antefosa de Chicontepec. En el caso del primero es posible que exista una débil anomalía sobre el área de la cima, pero la estructura en su totalidad no está indicada, explicándose la falta de anomalías en términos de consolidación de los sedimentos terciarios circundantes y de la gran porosidad del material arrecifal. Tal situación es muy semejante a la observada sobre la Cuenca de Nemeha, en los Estados Unidos, que es un levantamiento del basamento casi de la misma altura (1,500 metros) sepultado por sedimentos paleozoicos. Si bien existe una débil anomalía sobre el área de la Antefosa de Chicontepec, la ausencia de anomalías mayores también puede relacionarse con la falta de divergencia en densidad significativa entre los sedimentos incluidos y las rocas del basamento circundantes. A pesar de ello, no se sabe si es resultado de metamorfismo, consolidación o cementación de los sedimentos de la depresión, inclusión de materiales de alta densidad, como anhidrita, calizas dolomíticas o materiales volcánicos.

Resulta obvio a base del análisis anterior que el efecto de los rasgos geológicos superficiales sobre los valores de anomalías observados sean muy pequeños y en su mayor parte menores de 5 mgals.

## CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio sugieren lo siguiente:

- 1) La distribución de anomalías regionales de Bouguer se ajusta en términos generales muy bien al relieve topográfico de México, indicando que la mayoría de los valores anómalos de gravedad observados se relacionan con una masa compensadora subsuperficial a la profundidad requerida para el equilibrio isostático;
- 2) el espesor cortical definido para la discontinuidad de Mohorovičić parece ser de unos - 30 kms en México, aunque los valores de la gravedad regionales deben ser interpretados como indicando un engrosamiento cortical por debajo de la

Meseta Central y colocando la discontinuidad de Mohorovičić a - 46 kms, lo cual no parece probable en vista de los resultados de estudios sísmicos en otras áreas de mesetas caracterizadas por anomalías de la gravedad similares. Es más probable pues se haya producido una expansión volumétrica en dichas áreas y en México, para satisfacer la deficiencia de masa indicada por las anomalías de Bouguer, se requeriría una disminución en el promedio de densidad de masa por encima del nivel de 30 kms de  $0.16 \text{ gm/cm}^3$ . Si así fuera, las velocidades sísmicas para la capa cortical deberían ser de casi 5.5 kms/sec, como se ha observado en Utah y no de 6.1 kms/sec como se ha observado en áreas donde existe engrosamiento cortical;

3) en el área de la Cuenca del Balsas, las anomalías de la gravedad indican (a) desplazamiento cortical similar al deducido en otras cuencas sedimentarias en el resto del mundo o (b) un efecto de "raíz" residual de algún antiguo sistema montañoso extendido entre Guatemala y Arizona. Dentro de cualquier hipótesis, el engrosamiento cortical parece haberse realizado por encima de la discontinuidad de Mohorovičić, alcanzando unos 8 kms, lo que colocaría a dicha continuidad casi a - 38 kms en el área;

4) los valores de anomalías isostáticas determinados por las tres profundidades de compensación muestran que una profundidad de 96 kms proporciona anomalías mínimas, mientras que 56 kms proporcionan predominantemente valores positivos y 113 kms predominantemente valores negativos. Puesto que el nivel de la discontinuidad de Mohorovičić es menor de - 46 kms asumiendo un engrosamiento cortical máximo, se deduce que existe una gran masa que influye sobre las anomalías por debajo de la discontinuidad de Mohorovičić en el manto. También se llegó a una conclusión similar en relación con el Golfo de México, donde se obtuvieron anomalías isostáticas de +80 mgals.

5) Pueden conocerse rápidamente los efectos de cambios superficiales y subsuperficiales en la geología de las unidades estructurales y litológicas mayores sobre la distribución de las anomalías de la gravedad en todo México, encontrándose en la mayoría de los casos una correlación directa. Es decir, anomalías de la gravedad positiva locales están asociadas con elementos estructurales positivos

y unidades de rocas básicas y anomalías de la gravedad negativa locales están asociados con unidades estructurales negativas, aunque algunas, como el arrecife de la Faja de Oro y la Antefosa de Chicontepec tienen poco o ningún efecto sobre las anomalías. También existen estructuras locales con gravedad anómala que no tienen efectos geológicos;

6) en su mayoría, las pequeñas unidades geológicas estructurales superficiales parecen afectar a las anomalías de la gravedad de manera semejante a las mayores estructuras de tipo más regional, pero sus anomalías locales resultantes raras veces exceden a 5 mgals.

#### REFERENCIAS

- Alvarez, Manuel Jr., *Tectónica de la República Mexicana*, 1948.
- Arellano, A.R.V., Deducciones estratigráficas de las anomalías de la pesantez observadas en el centro de México, 2º Congreso. *Pan Americano Geol. Ing., Minas*, Rio Janeiro, 1947.
- Birch, Francis, J.P. Schairer y H. Cecil Spicer, Handbook of Physical Constants, Ed. *Geol. Soc. of Am. Spec. Publ. 56*. Pags. 325, 1942.
- Bowie, William, Investigations of gravity and isostasy, *U. S. Coast & Geodetic Survey, Spec. Publ. No. 40*. 1917.
- Duerksen, J.A. , Pendulum gravity data in the United States, *U.S. Coast & Geodetic Survey, Spec. Publ. No. 244*, 1949.
- Ewing, Maurice, G.H. Sutton y C.B. Officer Jr., Seismic refraction measurements in the Atlantic Ocean, Pt. VI: *Seismol. Soc. Am. Bull.*, V. 44, Pags. 21-38, 1954.
- Ewing. Maurice, J.L. Worzel, D.B. Ericson, y Bruce C. Heezen, Geophysical and Geological investigations in the Gulf of México, Pt. 1, *Geophysics*, V. XX, No.1 1955.

- Fisher, Robert L. y George G. Shor Jr., Topography and structure of the Acapulco Trench, Resúmenes de los trabajos presentados, *XX Congreso Geológico Internacional*, México, 1956.
- Gealy, Betty Lee, Topography of the continental slope in northwest Gulf of México, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, V. 66, Pags. 205-228, 1955.
- Gunn, Ross, A quantitative study of mountain building on an unsymmetrical earth, *Jour. of the Franklin Institute*, V. 224, No.1 1937.
- Gutenberg, Beno, Wave Velocities in the Earth's Crust, *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper* 62, Pags. 19-34, 1955,
- Guzmán Jiménez, E.J., La geología económica, una ciencia al servicio de los pueblos. *Petróleos Mexicanos Servicio Inf.* ip. 2, Tomo 1, No. 8, Pags. 627-640, 1953.
- Heacock, John G. Jr., y J. Lamar Worzel, Submarine topography west of México and Central America, *Bul. Seis. Soc. Amer.*, V. 44, Pags. 773-776, 1955.
- King, P.B., Tectonics of northern Mexico, *Proc. 8th Am. Sci. Congr.*, V. 4, Pags. 395-398, 1942.
- Medina Peralta, Manuel., Manuscrito no publicado 1956.
- Meinesz, F.A. Vening, *Gravity Expeditions at Sea*, V. II, Pags. 1-139, 1934.
- Menard, Henry W., Deformation of the Northwestern Pacific Basin and West Coast of North America, *Bul. Geol. Soc. Amer.*, V. 66, Pags. 1149-1198, 1955.
- O'Carreno, Alfonso de la, Cartas de anomalías de la gravedad en la República Mexicana, 1949.
- Skeels, D.D., Gravity in sedimentary basing, *Trans. Amer. Geophys. Union*, Pt. II , Pags. 182-201, 1940.
- Shor, G.G., Observed Mohorovičić reflections in blasts and local earthquakes: S.E. G. Junta programa, Sección de la Costa del Pacífico. Nov. 6, 1953.
- Tatel, Howard E. y Merle A. Tuve, Seismic exploration of a continental crust, *Geol. Soc. Amer., Spec. Paper* 62, Pags. 35-50, 1955.
- Wilmore, P.L., A.L. Hales y P.G. Gane, A seismic investigation of crustal structure in the western transvaal, *Seismol. Soc. Am. Bull.*, V. 42, Pags. 53-80, 1952.
- Worzel, J. Lamar y G. Lynn Shurbet, Gravity Interpretations from Standard Oceanic and Continental Sections, *Geol. Soc. Am., Spec. Paper* 62, Pags. 87-100, 1955.

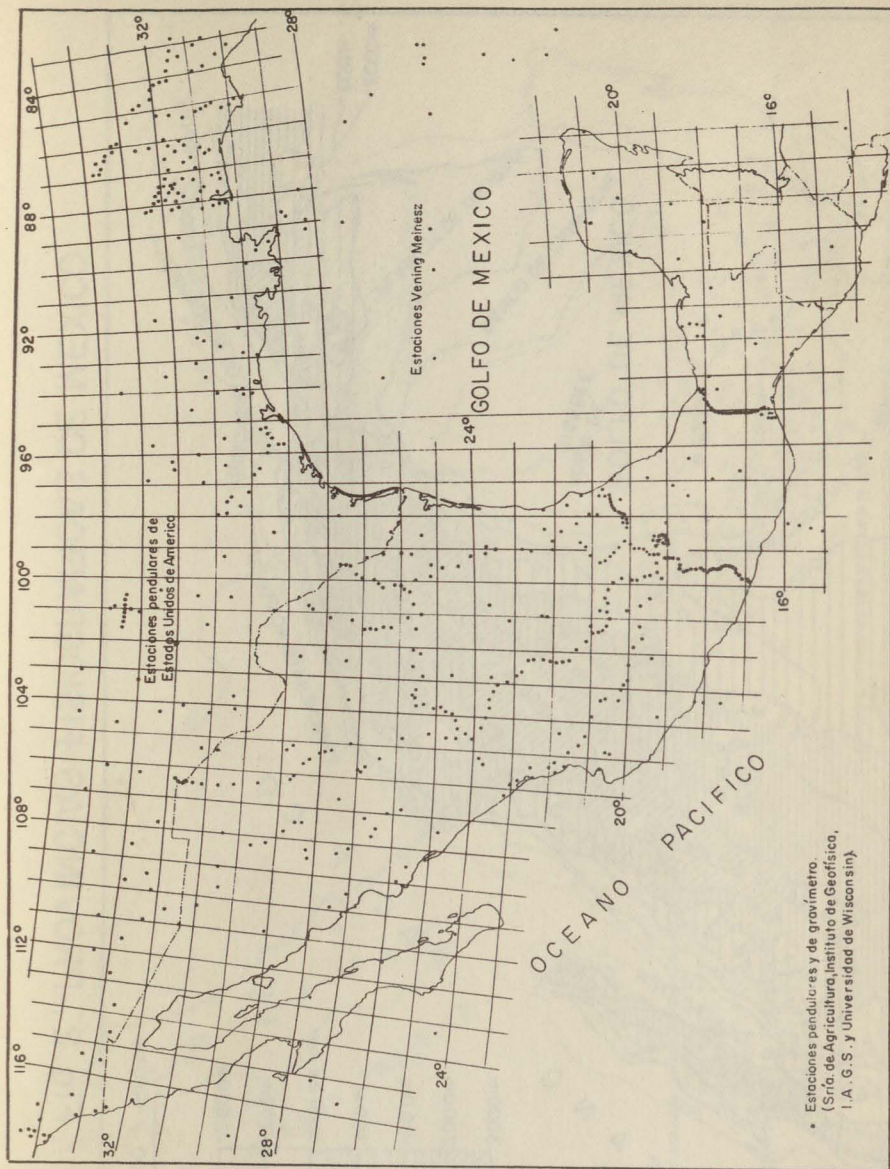


Fig. 1.- ESTACIONES DE GRAVEDAD DE MEXICO

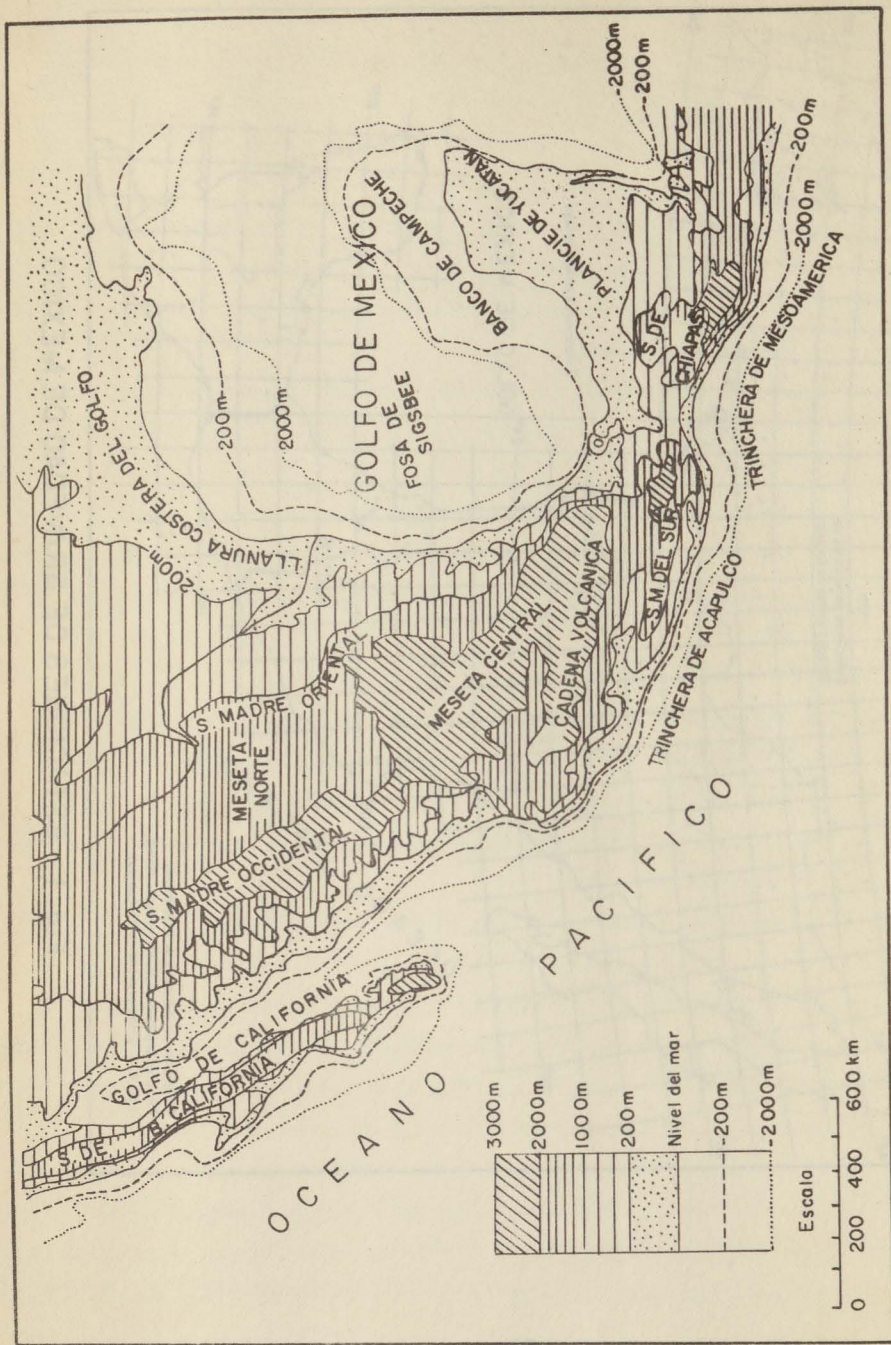


Fig. 2.-PROVINCIAS FISIOGRAFICAS DE MEXICO

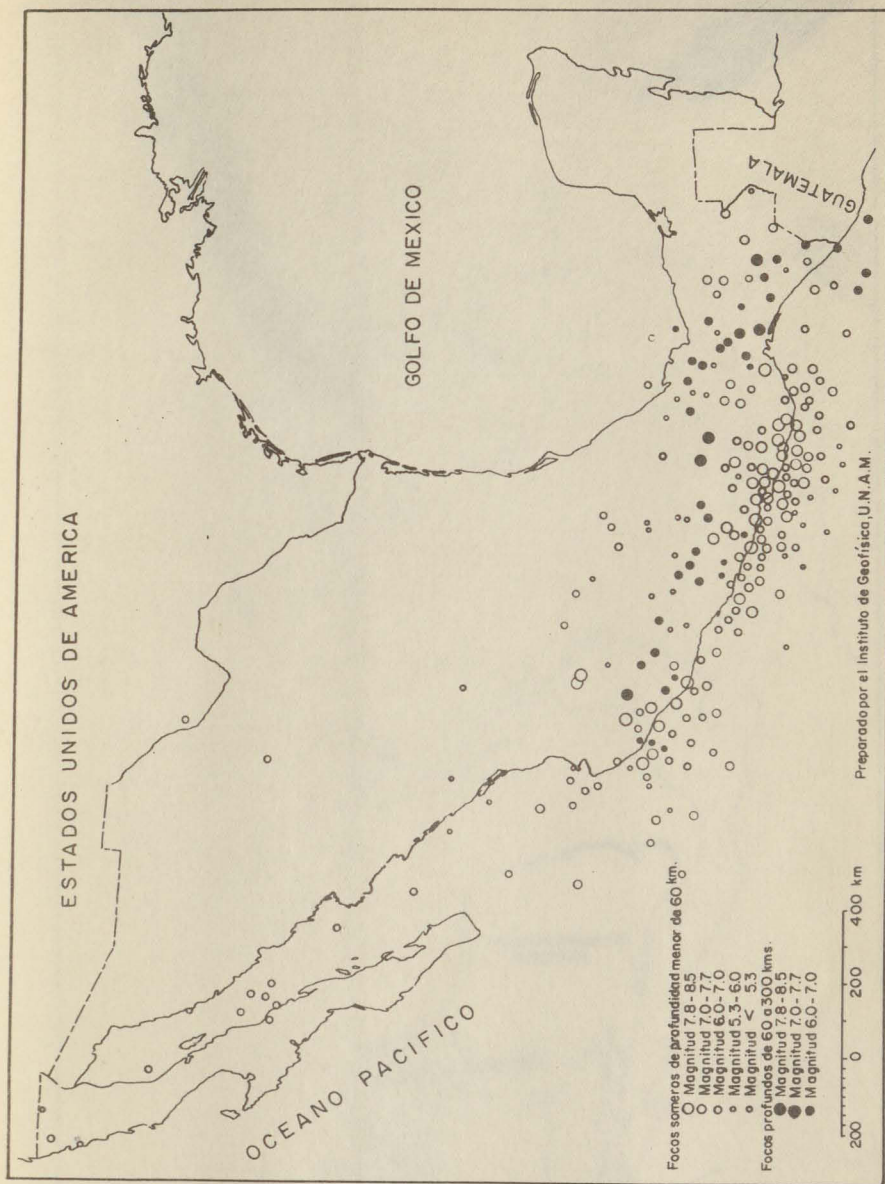


Fig. 3.- FOCOS SIMSICOS DE MEXICO





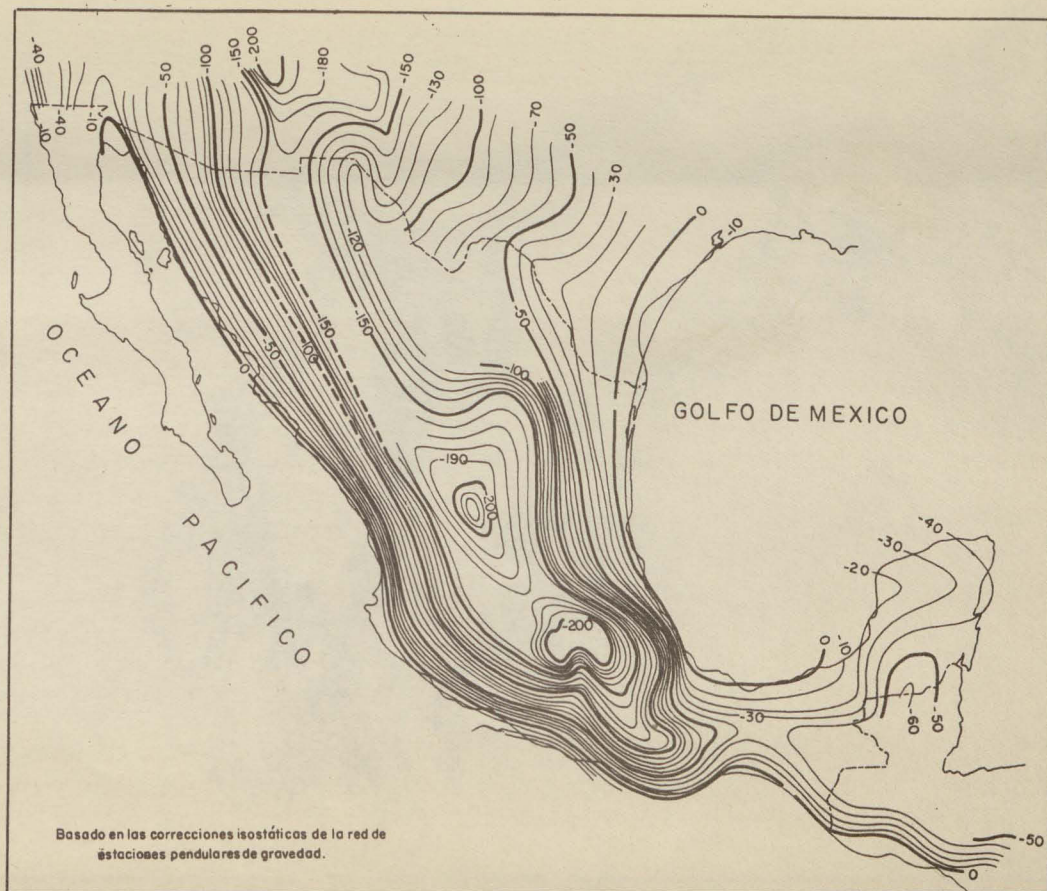


Fig. 5.- MAPA DE ANOMALIAS DE BOUGUER TEORICAS



Fig.6.- MAPA GRAVIMETRICO REGIONAL DEL AREA DEL GOLFO DE MEXICO

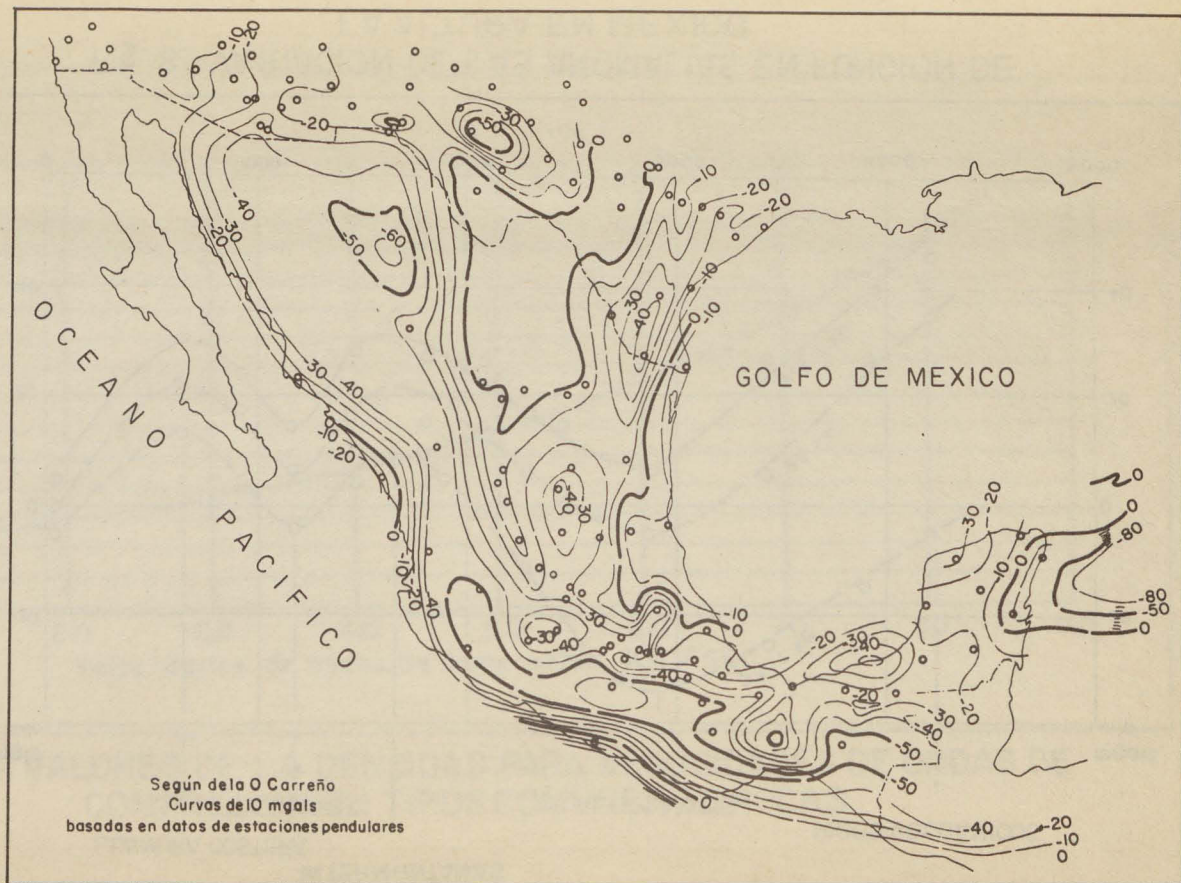


Fig.7. - MAPA DE ANOMALIAS ISOSTATICAS DE MEXICO

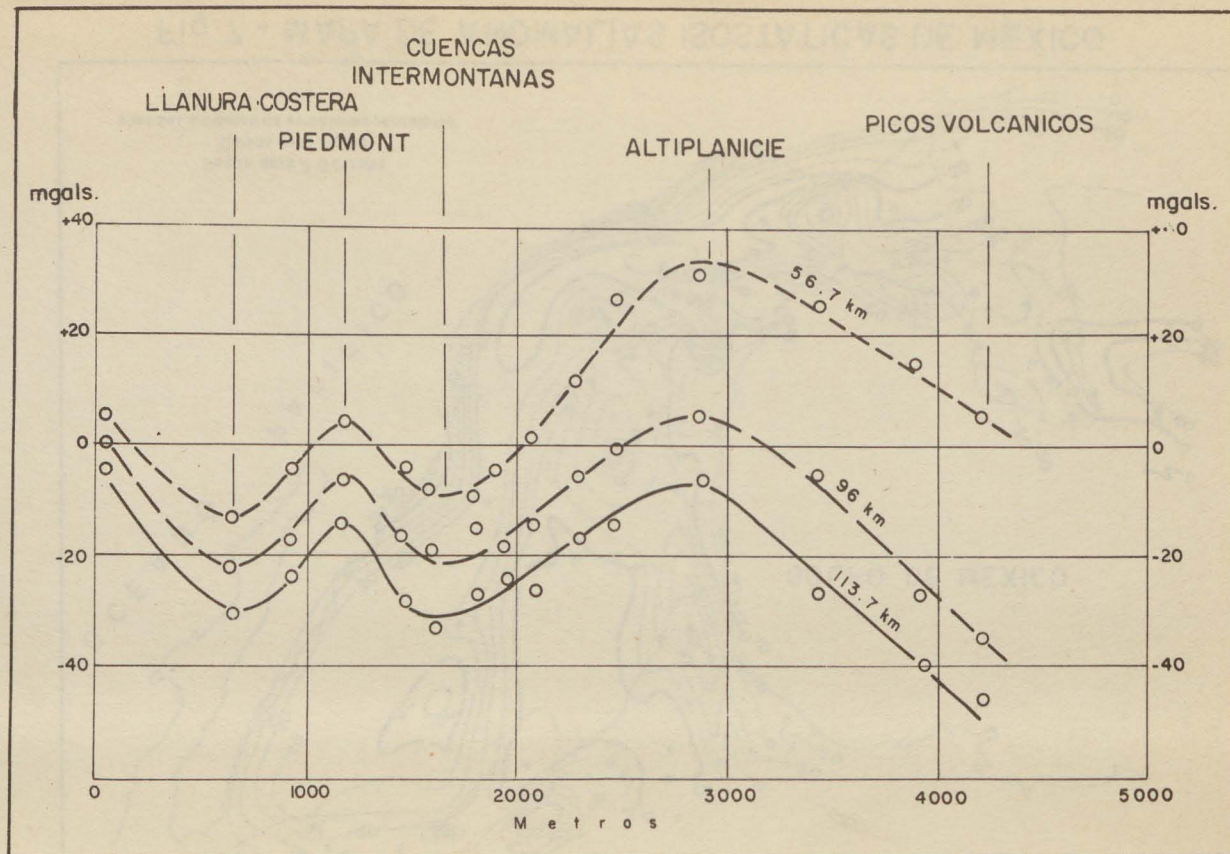


Fig. 8.-VARIACION DE LAS ANOMALIAS EN FUNCION DE  
LA ALTURA EN MEXICO

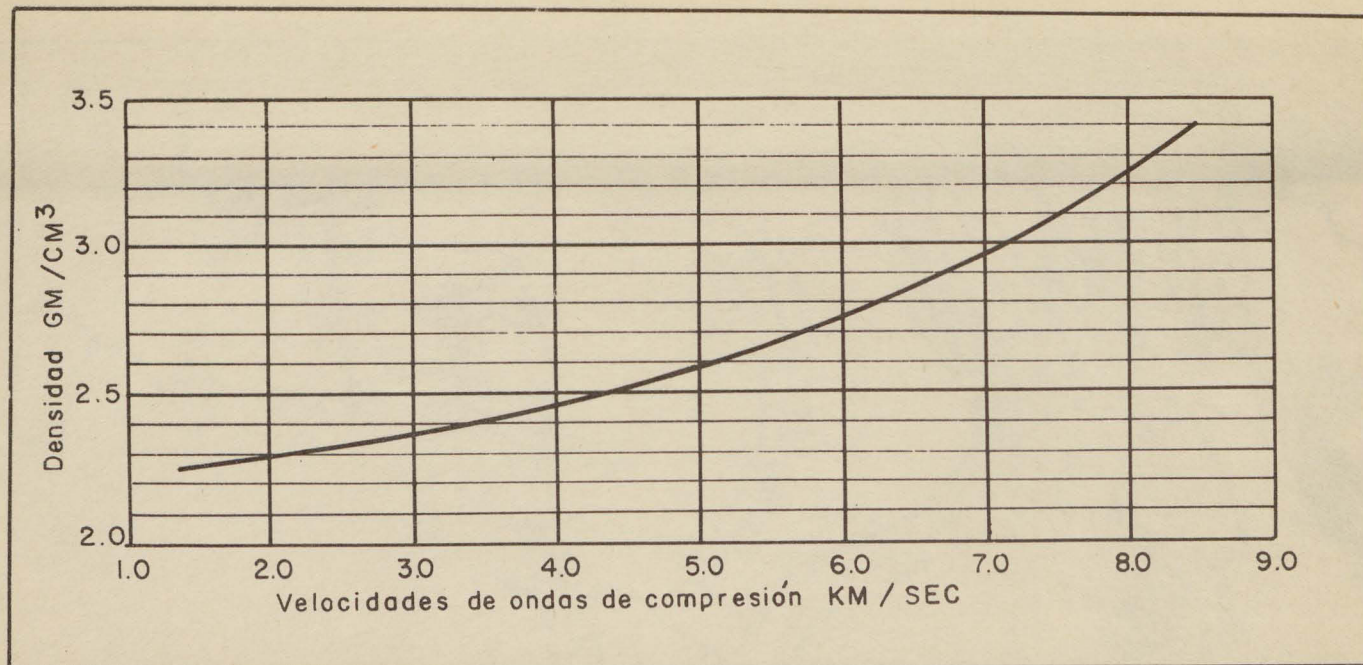


Fig.9.- VALORES DE LA DENSIDAD PARA VELOCIDADES DE ONDAS DE COMPRESION EN TIPOS COMUNES DE ROCAS







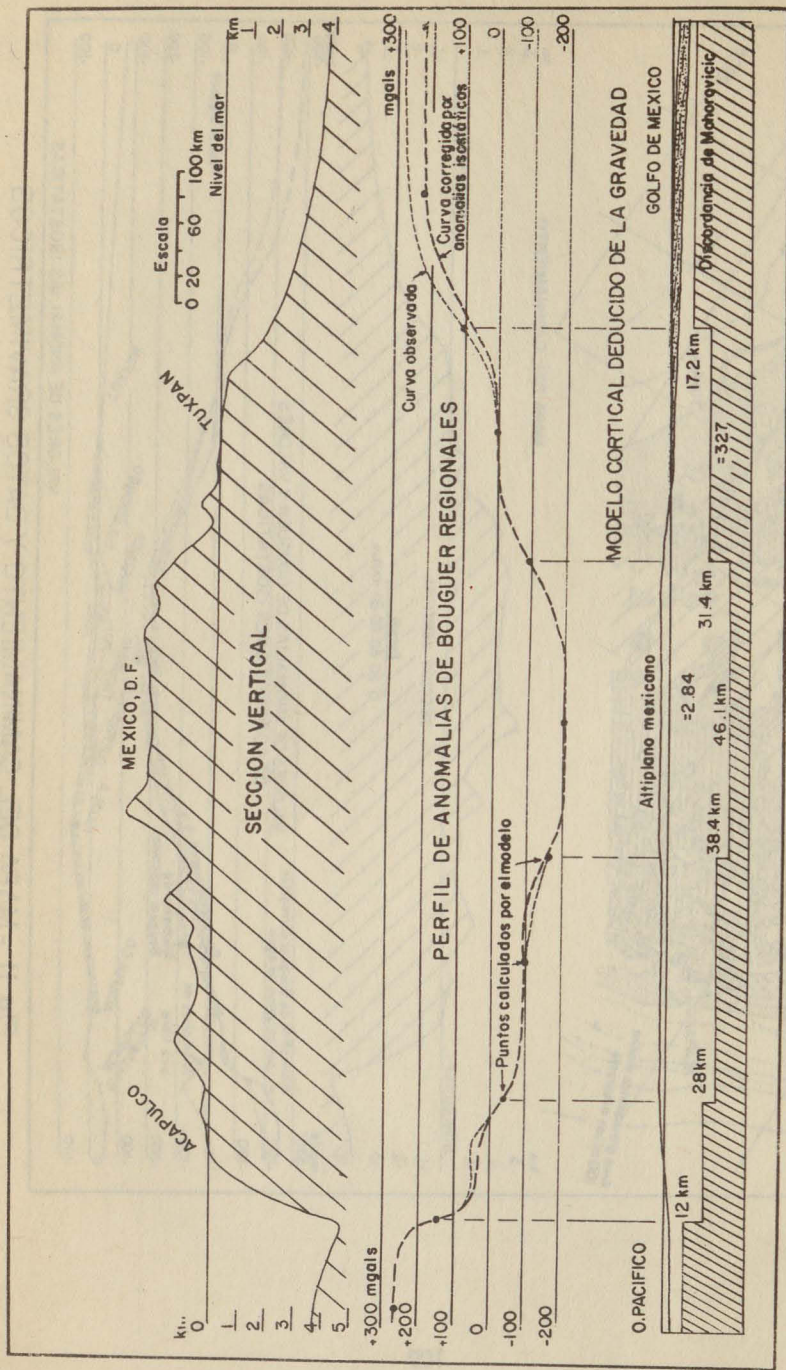


Fig. 12. - ESTRUCTURA CORTICAL ACAPULCO-MEXICO

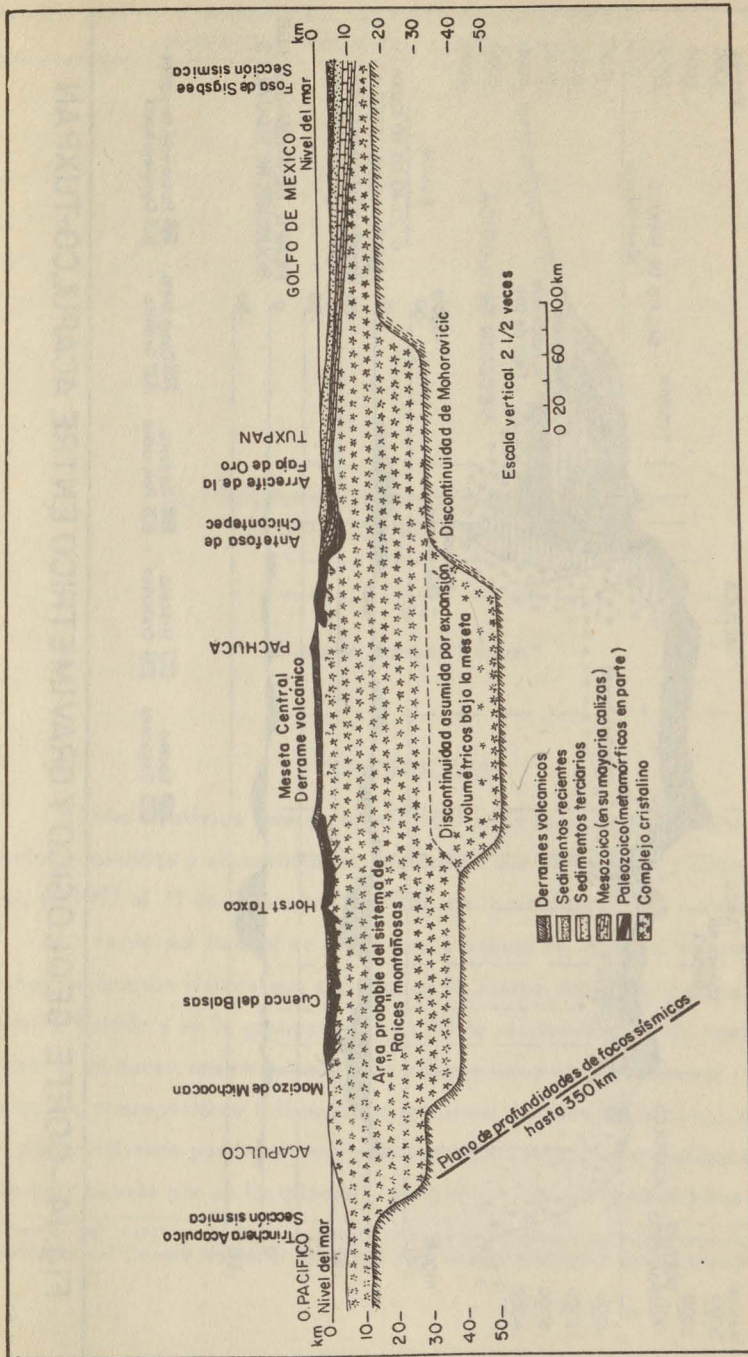


Fig. 13.- SECCION TRANSVERSAL CORTICAL DE MEXICO

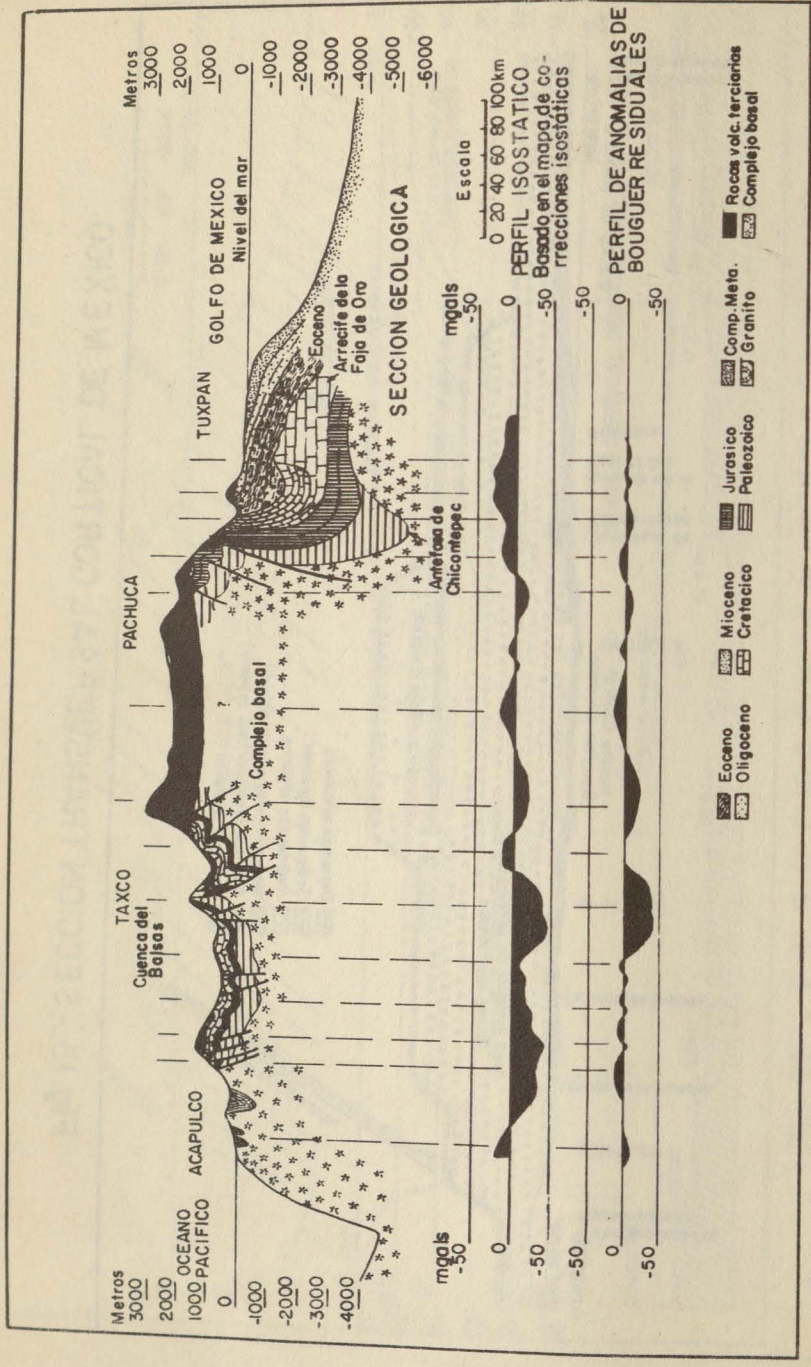


Fig. 14.-CORTE GEOLOGICO Y GRAVIMETRICO ENTRE ACAPULCO-TUXPAN