

03077

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO ²lej

UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONAL Y
POSGRADO DEL COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
INSTITUTO DE GEOFISICA
POSGRADO EN GEOFISICA

FALLA DE ORIGEN

CARACTERIZACION GEOFISICA DE LA REGION DE
TIERRA CALIENTE Y AREAS COLINDANTES,
ESTADOS DE GUERRERO, MEXICO Y MORELOS

TESIS

Que para optar por el grado de
MAESTRO EN SISMOLOGIA Y FISICA DEL INTERIOR DE LA
TIERRA

Presenta
Frank García Pérez

Cd.Universitaria
1995



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria .

Con mucho amor, cariño y respeto para:

Quien representa lo más bello e importante de mí vida: *Mi Hijo.*

Quien comparte los momentos felices y tristes junto a mi: *Mi esposa.*

Quienes han soportado la lejanía de un ser querido: *Mis Padres y Hermanos.*

Agradecimientos

Muy en especial al Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi por su gran interés y en señanza brindada, lo que conllevó a un planteamiento, orientación y posterior culminación satisfactoria del proyecto de tesis. Por su apoyo para la presentación de los resultados preliminares del trabajo en la Unión Geofísica Mexicana, para la salida al área de estudio y para la impresión final del trabajo.

A Petróleos Mexicanos (PEMEX), por facilitarnos la información gravimétrica sobre la cual se basó el trabajo.

A la Secretaría de Relaciones Exteriores por facilitarme la beca para la realización de los estudios de Maestría y por su apoyo para llevar a feliz término la tesis.

Al Dr. Enrique Cabral por sus aportes geológicos al trabajo y por facilitarme la base de datos gravimétrica y topográfica digitalizadas. Además por sus comentarios realizados como parte integrante del comité sinodal.

Al resto del comité sinodal: Dr. Javier Pacheco, Dr. Oscar Campos y Dr. Luis Alva.

Un agradecimiento especial al Dr. José L. Cuevas Ojeda por depositar su amistad y confianza en mí. Por su colaboración en la obtención de la información teórica, así como los programas del método Gradiente Total Normalizado.

A las secretarías del posgrado Norma y Anita, a Anita Pereda y a la coordinadora Dr. Rosa María Prol. A todo el grupo de profesores y alumnos con quienes compartí todo este tiempo, especialmente: Javier Pacheco, David Escobedo, Omar, Liz, María, Gaudencio, Carlos², Jaime, Renato, Monica, Maru, Birgit, Lolita, Juan, Eugenio, Alfredo, Marcos.

A la familia de mi esposa Elizabeth por su cariño y aprecio.

Finalmente deseo agradecer a la Sra. Guadalupe Fuentes por su ayuda incondicional y por considerarme como parte integrante de su familia desde los inicios de mi estancia aquí en México.

A todos muchas gracias.

Indice

Resumen -----	1
I- Introducción -----	2
II- Area de estudio -----	4
II.1- Ubicación -----	4
II.2- Principales características geológicas y tectónicas -----	4
III- Materiales y métodos -----	9
III.1- Mapa gravimétrico (Bouguer Simple y Bouguer Total) -----	9
III.2- Interpretación cualitativa del campo gravimétrico -----	12
III.3- Método del Gradiente Total Normalizado -----	19
III.3.1- Generalidades -----	19
III.3.2- Comparación con otras técnicas de interpretación de los campos potenciales -----	20
III.3.3- Utilización e interpretación del método -----	21
III.4- Modelado bidimensional (2D) -----	23
III.4.1- Generalidades -----	23
III.4.2- Conformación de los modelos -----	25
III.5- Mediciones de densidad -----	33
IV- Resultados y Discusión -----	36
V- Conclusiones -----	52
VI- Bibliografía -----	53

Resumen

La información gravimétrica disponible en la región de Tierra Caliente y sus alrededores, muestran lo complicado de la geología y la tectónica en general. El campo gravimétrico presenta anomalías de interés que son interpretadas cuantitativamente en este trabajo a partir del modelado bidimensional de cuatro perfiles. Se obtuvo como resultado una representación esquemática de las relaciones estructurales de los diferentes paquetes litológicos en la región. Los cuatro modelos abarcan toda la corteza terrestre incluyendo el manto superior, apoyándonos en diferentes estudios geológicos y geofísicos llevados a cabo en la zona.

Como apoyo al modelado en 2D se emplearon otras técnicas gravimétricas, como la Continuación Analítica Ascendente (CAA) y el Gradiente Total Normalizado (GTN). Estas permiten hacer una interpretación detallada y precisa de los resultados tanto en superficie como en profundidad.

El terreno Guerrero puede estar representado por los cuerpos con densidades de 2.60 g/cm^3 y 2.59 g/cm^3 , así como por los de densidad 2.48 g/cm^3 , 2.50 g/cm^3 , 2.53 g/cm^3 y 2.51 g/cm^3 , cuyos límites son interpretados como el Complejo Metamórfico Tierra Caliente. También pueden estar representados en los modelos el Complejo Acatlán (densidad 2.48 g/cm^3 en los perfiles 2, 3 y 4) y la Faja Volcánica Transmexicana, presente en los perfiles 1 y 3, modelado por el cuerpo de 2.42 g/cm^3 . En el modelo del perfil 2 aparece interpretado el intrusivo silíceo de la Mesa Los Caballos, correspondiendo a tres cuerpos con densidades de 2.30 g/cm^3 , 2.63 g/cm^3 y 2.65 g/cm^3 . Otros paquetes litológicos como la formación Morelos, la unidad Pochote, así como los sedimentos recientes son también interpretados en los modelos.

Según los resultados del GTN y la CAA el gradiente anómalo de la Zona A, corresponde a una superposición de características geométricas y estructurales. Es decir, se descarta la posibilidad de que sea el efecto de una estructura tectónica de grandes dimensiones.

Las densidades modeladas para la corteza inferior e intermedia pudieran estar caracterizando composiciones litológicas propias de una corteza continental. De esta forma una corteza inferior formada por rocas metamórfica e intrusiones gabroicas, y una corteza intermedia compuesta principalmente por migmatitas, es sugerida.

1- Introducción

El conocimiento en profundidad de la corteza terrestre es de gran utilidad para analizar en detalle las diferentes hipótesis y criterios que existen sobre cualquier región, acerca de los procesos tectónicos y estructurales que han ocurrido. En esto la geofísica ha jugado un papel importante, facilitando a partir de diferentes algoritmos matemáticos (Talwani et al., 1959; Talwani y Ewing, 1960), una aproximación más realista de la estructura cortical, a través de modelos físicos obtenidos con la información disponible (Urrutia-Fucugauchi y Molina, 1992; Molina-Garza y Urrutia, 1993).

En la región suroeste de México existen diferentes criterios de interpretación estructurales y tectónicos a los cuales han llegado varios autores encaminados al esclarecimiento geológico de la región (Campa et al. (1974), Cserna (1978), Campa y Coney (1983), Valdés (1992), Cabral-Cano (1994), entre otros). Muchos de estos trabajos tienen como objetivo detallar la geología superficial y otros presentan resultados que abarcan mayor profundidad en la corteza.

Uno de los aspectos más interesantes de la geología de esta región, es la interrogante que existe por la presencia de diferentes complejos litológicos que presentan comportamientos contrastantes en cuanto a su litología y tectónica. Ha llegado a obtenerse diferentes interpretaciones y reconstrucciones paleogeográficas que tratan de vincularlos a la geología cratónica de Norteamérica a través de diferentes mecanismos de transporte y posterior acreción al margen continental de México (Sedlock et al., 1993).

Otras investigaciones encaminadas a realizar una conjugación de todos los resultados tanto de la geología superficial como del subsuelo, no son encontrados en la literatura.

El campo gravimétrico de la zona de Tierra Caliente y sus alrededores (Figs. 5 y 6), es un fiel reflejo de las complicaciones geológicas presentes en la región y de la posible presencia de varias litologías con características petrofísicas diferentes entre si. La existencia de posibles estructuras tectónicas que pudieran estar poniendo en contacto dichos complejos litológicos, es una posible interpretación cualitativa de las anomalías de dicho campo.

En el presente trabajo se hace un primer intento, geológico-geofísico, de conjuntar los resultados más relevantes, para obtener de esta forma una interpretación de las características tectónicas y estructurales de la corteza en la región. Permitiendo así representarla en toda su profundidad, lo más aproximado posible a la realidad geológica según los datos disponibles.

Como apoyo al modelado bidimensional que se llevó a cabo en cuatro perfiles que abarcan gran parte de las anomalías de mayor interés, se utilizó la continuación analítica ascendente a 5, 10, 15 y 20 km de altura y el gradiente total normalizado. La primera de las técnicas nos permitió hacer un análisis de la naturaleza de las fuentes que producen el comportamiento anómalo del campo gravimétrico en superficie, así como estudiar su comportamiento a profundidad. El gradiente total normalizado fué empleado con la finalidad de verificar si la anomalía de la Zona A (Fig. 6), pudiera ser el efecto de una falla profunda. El fundamento de tal análisis es que teóricamente las zonas de fallas producen en superficie un gradiente intenso del campo gravimétrico. También esta técnica se empleó para poder interpretar la presencia de otras zonas de fallas en la región.

En el análisis de los resultados se hace una interpretación de cada uno de los modelos ajustándolos al criterio de terrenos tectonoestratigráficos propuestos por Campa y Coney (1983), y enriqueciéndolo con otros estudios locales dentro del área.

Los objetivos principales que fueron trazados en este proyecto fueron:

- Estudiar el comportamiento gravimétrico en superficie y su posible vínculo con las hipótesis geológicas desarrolladas en la región de estudio.
- Establecer modelos gravimétricos de la corteza terrestre en el Sur de México para estudiar su estructura tanto profunda como somera.
- Apoyar con las conclusiones derivadas de los modelos geofísicos, la validéz o no de los modelos de evolución geológica propuestos para esta región.

II- Area de estudio.

II.1- Ubicación.

La región de trabajo (Fig. 1) está ubicada en el suroeste de la República Mexicana, y comprende parte de los estados de Guerrero, México y Morelos, ocupando un área aproximada de 37 500 Km², con coordenadas 98° 15' a 101° 15' de longitud W y 18° 00' a 19° 00' de latitud N. Enmarca dentro de sus límites a las ciudades de Cuernavaca y Altamirano como las más importantes, siendo esta última la más grande dentro de la zona denominada como Tierra Caliente. El relieve topográfico en la región es muy variable, encontrándose alturas entre 195 m como mínimo, en los alrededores de Ciudad Altamirano, y 4100 m como máximo (en Barranca Mata Leones), con respecto al nivel medio del mar (Fig. 3).

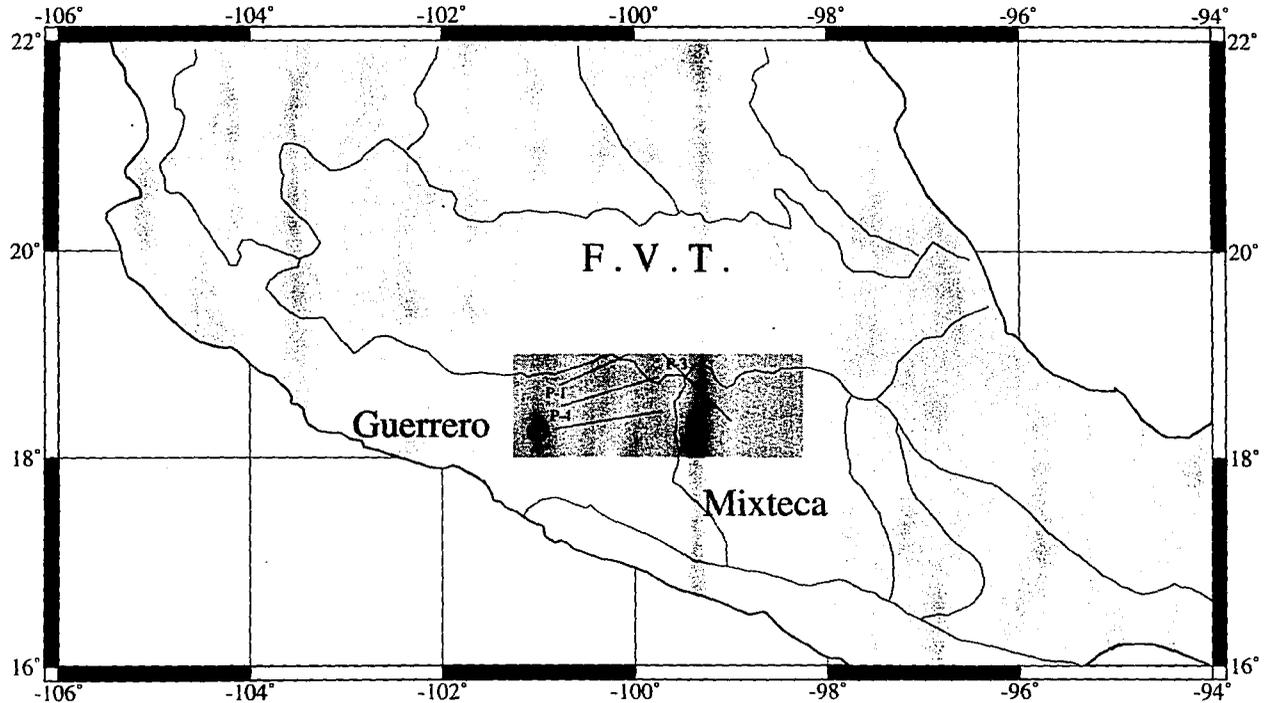
II.2- Principales características geológicas y tectónicas.

La geología del suroeste de México es poco entendida por la falta de estudios geológicos y geofísicos. Por ésto han surgido diferentes hipótesis de trabajo, algunas de las cuales defienden el punto de vista del desplazamiento y posterior acreción al márgen continental mexicano de una serie de bloques provenientes de Norteamérica (Campa y Coney, 1983; Howell et al., 1985; Sedlock et al., 1993).

El área de trabajo abarca porciones de dos de los terrenos tectonoestratigráficos propuestos por Campa y Coney (1983) para la República Mexicana. Esta división estuvo basada en las aparentes discontinuidades en la estratigrafía, que marca supuestos cambios bruscos o críticos en la edad o en la litología, los cuales no podían ser fácilmente explicados como debidos a cambios en ambientes de depósitos. Howell et al. (1985) han definido a los terrenos como: "un paquete o conjunto de litologías de extensión regional, limitados por fallas y caracterizados por una historia geológica diferente a los terrenos vecinos".

Los dos terrenos antes mencionados son el Guerrero y el Mixteca, cubiertos parcialmente en la zona norte por la Faja Volcánica Transmexicana (Fig. 1). El terreno Guerrero está subdividido en tres secuencias de edades que van del Jurásico tardío al Cretácico medio y están compuestos de secuencias volcánicas submarinas y sedimentarias. En el área sólo se encuentra el subterreno Teloapan-Ixtapan, definido por Campa et al. (1974) como

Terrenos, Area y Perfiles Procesados



GMT Mar 17 11:56 Area_de_Estudio

Fig.1- Esquema de ubicación del área de trabajo y los perfiles procesados. Los límites de terrenos se extrajeron de Campa y Coney (1983).

una secuencia de andesitas volcánicas y sedimentos volcanoclásticos interestratificados con calizas, pizarras y areniscas. Presenta bajo grado de metamorfismo regional y se encuentra muy deformado. El márgen Este de dicho subterreno aparece superpuesto sobre las secuencias carbonatadas y clásticas de edad Cretácico (Formación Morelos), que forman parte de la plataforma del Terreno Mixteca. La secuencia litológica de los subterrenos Zihuatanejo y Huetamo, se diferencian de la del subterreno Teloloapan-Ixtapan, por sus estratigrafías, su grado de metamorfismo, y estilo de deformación (Campa et al., 1974).

El Terreno Mixteca (Campa y Coney, 1983), consiste de un basamento metamórfico dividido tectónicamente en dos partes por un cuerpo ultramáfico. Sobre este basamento paleozoico, "Complejo Acatlán" (Ortega-Gutierrez, 1981), aparecen en algunos lugares secuencias de sedimentos terrígenos, y en algunos otros calizas y pizarras de edad neocomiana, calizas de la Formación Morelos (aptiano-cenomaniano) y secuencias flysch cretácicas (Formación Mexcala). El Complejo Acatlán (Ortega-Gutierrez, 1981) abarca más de 15 km de espesor de diversos tipos de rocas, variando desde pizarras a migmatitas, granito a ultramilonita, y gabro a eclogita, incluyendo una ofiolita tectonizada. Según Ortega-Gutierrez (1981), este complejo puede ser dividido en dos subgrupos litoestratigráficos. El Grupo Petlalcingo, considerado como una mezcla parautoctona de metasedimentos clásticos, rocas metavolcánicas y algunas intrusiones de composición máfica-ultramáfica, posteriormente metamorfizado. Por otra parte, el Grupo Acateco constituye una placa alóctona que traslapa al grupo Petlalcingo por una distancia mínima de más de 100 km a lo largo de un contacto horizontal previamente plegado. Este está compuesto de tres unidades litoestratigráficas que son: metaofiolitas, granitoides milonitizados y una unidad groseramente clástica, la cual está deformada y metamorfizada, yaciendo encima de las anteriores unidades.

La Faja Volcánica Transmexicana constituye una franja volcánica del cenozoico superior que cruza transversalmente la República Mexicana (Morán-Zenteno, 1984). Está formada por una gran variedad de rocas volcánicas que fueron emitidas a través de un importante número de aparatos volcánicos. Se encuentran entre otros, productos piroclásticos, lavas andesíticas, dacíticas y riódacíticas, basaltos, riolitas y tobas ácidas.

Dentro del terreno Guerrero se encuentra el Complejo Metamórfico Tierra Caliente, el cual está expuesto principalmente en las vertientes sur de la Cuenca del Río Balsas y más allá del límite sur de la Faja Volcánica Transmexicana (Ortega-Gutierrez, 1981). Aunque sus litologías pueden ser de diferente origen y estar separadas por fallas, ellas presentan características uniformes como el bajo grado de metamorfismo y una aparente simplicidad estructural. Las litologías que conforman este complejo, según Ortega-Gutierrez (1981),

son secuencias intercaladas de unidades sedimentarias y volcánicas, predominantemente pizarras arcillosas, grauvacas y cantidades de rocas volcánicas andesíticas.

Por otro lado, Cabral-Cano (1994) presenta al Complejo Metamórfico Tierra Caliente integrado por el Esquisto Taxco, la Formación Roca Verde Taxco Viejo, y la Formación Almoloya (Fig. 2). La Fm. Roca Verde Taxco Viejo está compuesta de metavolcánicos, lavas de almohadillas, metapiroclásticos, metacalizas, y metaconglomerados. La Fm. Almoloya corresponde a una secuencia de filitas negras bien foliadas. Este complejo se considera que tiene un bajo grado de metamorfismo.

Cabral-Cano, 1994, refiriéndose a Campa y Coney (1983) plantea que el principal problema con la división en terrenos fue que las definiciones de los mismos fueron imprecisas y pudo estar llevando a conclusiones erróneas. La principal causa de lo anterior se debió a la ausencia de mapas geológicos detallados en algunas regiones de México. De esta manera, plantea que la forma exacta, la extensión espacial y la relación estructural con, y entre los terrenos nunca han sido publicados con el detalle necesario. Por tal razón se realiza el presente trabajo en esta región de Tierra Caliente, con el objetivo de enriquecer el conocimiento espacial de las litologías de la región así como para esclarecer sus relaciones estructurales.

Las rocas volcánicas y volcanoclásticas terciarias (Grupo Balsas) en la región de la Mesa Los Caballos (Fig. 3), están probablemente discordantes sobre los estratos sedimentarios mesozoicos y rocas metamórficas expuestas en el Oeste y Este respectivamente y son asumidas que fueron acrecionadas posterior al terreno Guerrero (Jansma et al., 1991).

La zona de Guerrero ha experimentado diferentes procesos geológicos y tectónicos desde el Mesozoico hasta el presente, reflejado en las complejas características geológicas actuales. Por ejemplo, un prolongado período de sedimentación marina, el cual finalizó abruptamente durante la Orogenia Laramide (Cretácico tardío-Terciario temprano) (Morán-Zenteno, 1984). Posteriormente a la deformación Laramide, el norte de Guerrero estuvo sujeto a erosión, antes de un período de vulcanismo Terciario y deposición de sedimentos continentales. El vulcanismo continuó a través del Terciario y Cuaternario, persistiendo hoy en la Faja Volcánica Transmexicana (Jansma et al., 1991).

En la región de Tierra Caliente, Estado de Guerrero, existen más de una docena de troncos dioríticos y traquíticos de emplazamiento muy somero que intrusionan las rocas terciarias. Unos sólo la Formación Balsas, mientras que otros a las rocas volcánicas oligomiocénicas (Cserna, 1978). Jansma et al., 1991, diferencia cuerpos intrusivos silíceos en la región de Mesa Los Caballos, correspondiendo estos a la unidad más joven de toda la secuencia en la zona.

Mapa Topografico

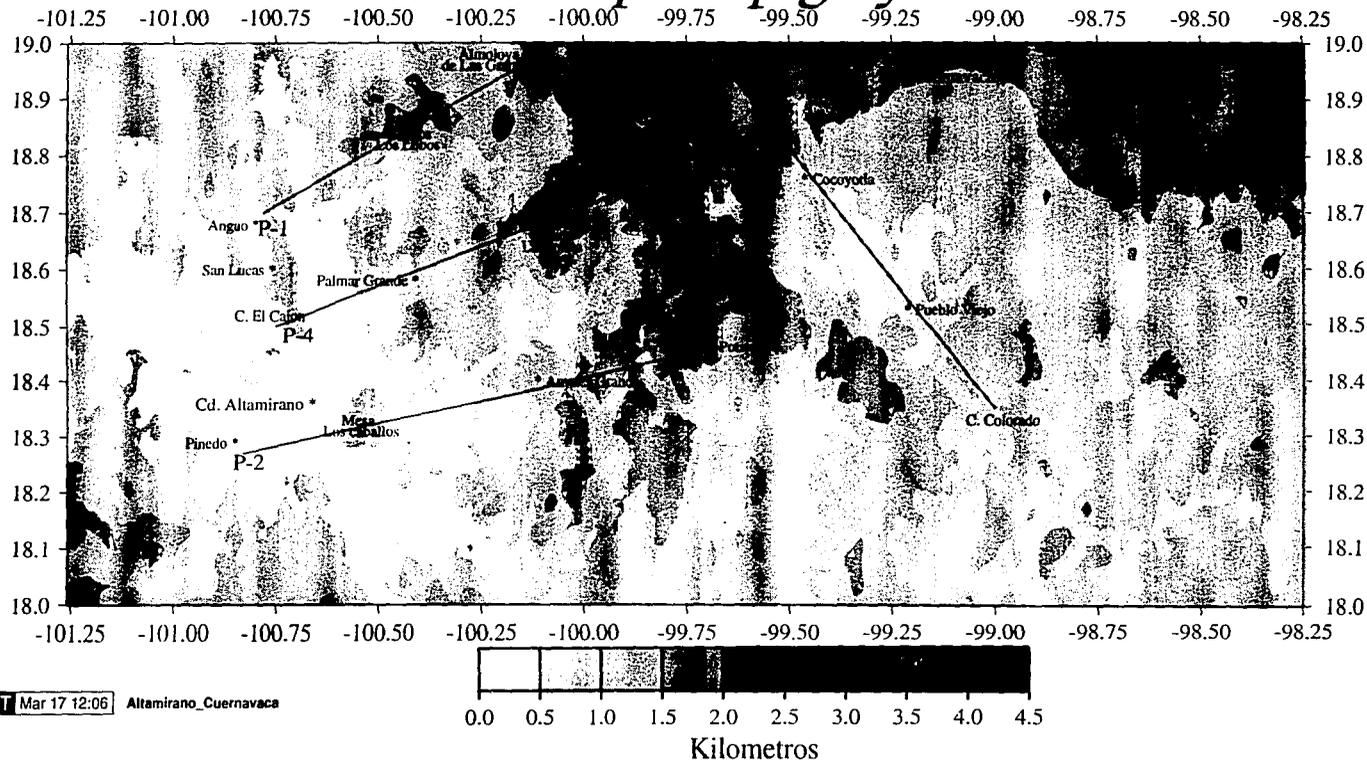


Fig. 3- Información topográfica coincidente con las hojas Cuernavaca y Cd. Altamirano a escala 1:250 000, extraída de INEGI (1985b).

Mapa Topografico

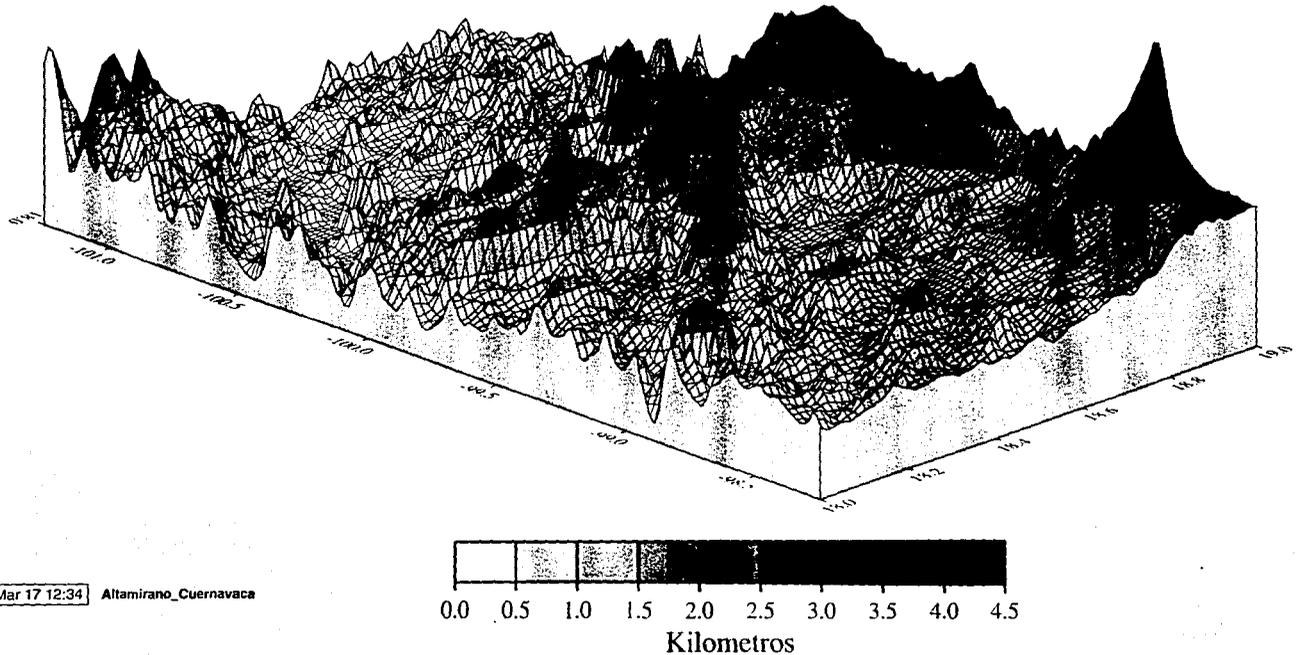


Fig. 3- Información topográfica coincidente con las hojas Cuernavaca y Cd. Altamirano a escala 1:250 000, extraída de INEGI (1985b).

III. Materiales y Métodos.

III.1- Mapa Gravimétrico (Bouguer Simple y Bouguer Total).

La principal información geofísica empleada en el presente trabajo fué el Mapa Gravimétrico de Bouguer Simple a escala 1:250 000 con intervalo de isolíneas cada 200 UG y densidad de capa intermedia igual a 2.67 g/cm^3 , procesado por PEMEX a partir de un levantamiento realizado en la zona de trabajo con interés gasopetrolífero. La información obtenida durante las observaciones fué medida en una red con una buena densidad de estaciones (Fig. 4). Posteriormente el mapa original fué contruido regularizando las observaciones a partir del empleo de una función de interpolación tipo Spline. De esta información se obtuvo la base de datos para el modelado e interpretación. Para esto se digitalizaron las curvas de contornos y se interpolaron obteniéndose una matriz de datos en miligales de 11102 puntos, con intervalos de $1' \times 1'$, equivalente a $1.85 \text{ km} \times 1.85 \text{ km}$. Este procesamiento se realizó con el sistema GMT versión 3.1, empleando una función Spline Lineal para la interpolación de los datos. En la (Fig. 5) se muestra el mapa luego del anterior proceso, respetando el intervalo de contornos de la información primaria.

La topografía en la región (Fig. 3), presenta zonas con alturas menores a los 500 m, como la región de Ciudad Altamirano y otras donde se encuentran grandes montañas como las de Sierra La Goleta, Cerro La Cumbre, Cerro Piedra Grande y Barranca Mata Leones. También aparecen rasgos topográficos intermedios que alcanzan alturas aproximadas a los 2 km y que tienen correspondencia con valores anómalos del campo gravimétrico. Nos referimos con ésto a la Mesa Los Caballos, Cerros Los Lobos, Cerro Colorado y otros.

El efecto gravimétrico de estas características topográficas se corrigieron obteniéndose el mapa de Bouguer Total (Fig. 6).

Para la construcción de dicho mapa se obtuvo la corrección topográfica, empleando una versión actualizada del programa TERRAIND (Bandy, 1991) basado en el algoritmo de Nagy (1966). Este obtiene la contribución gravimétrica de un prisma rectangular, conformado por las alturas de los puntos alrededor o conteniendo a la estación en la cual se quiere hacer la corrección. En éste caso se empleó un modelo de elevación digital (obtenido de INEGI, 1985b) con 11102 puntos equiespaciados cada $1'$ (1.85 km) (Fig. 3), coincidiendo así con la base de datos gravimétrica y conformándose de esta forma 10860 prismas. Algunos de los parámetros empleados para el cálculo fueron la densidad de los prismas, tomada como 2.67 g/cm^3 . Este valor es considerado en muchos estudios como la densidad característica o densidad promedio de las masas de rocas que se encuentran por

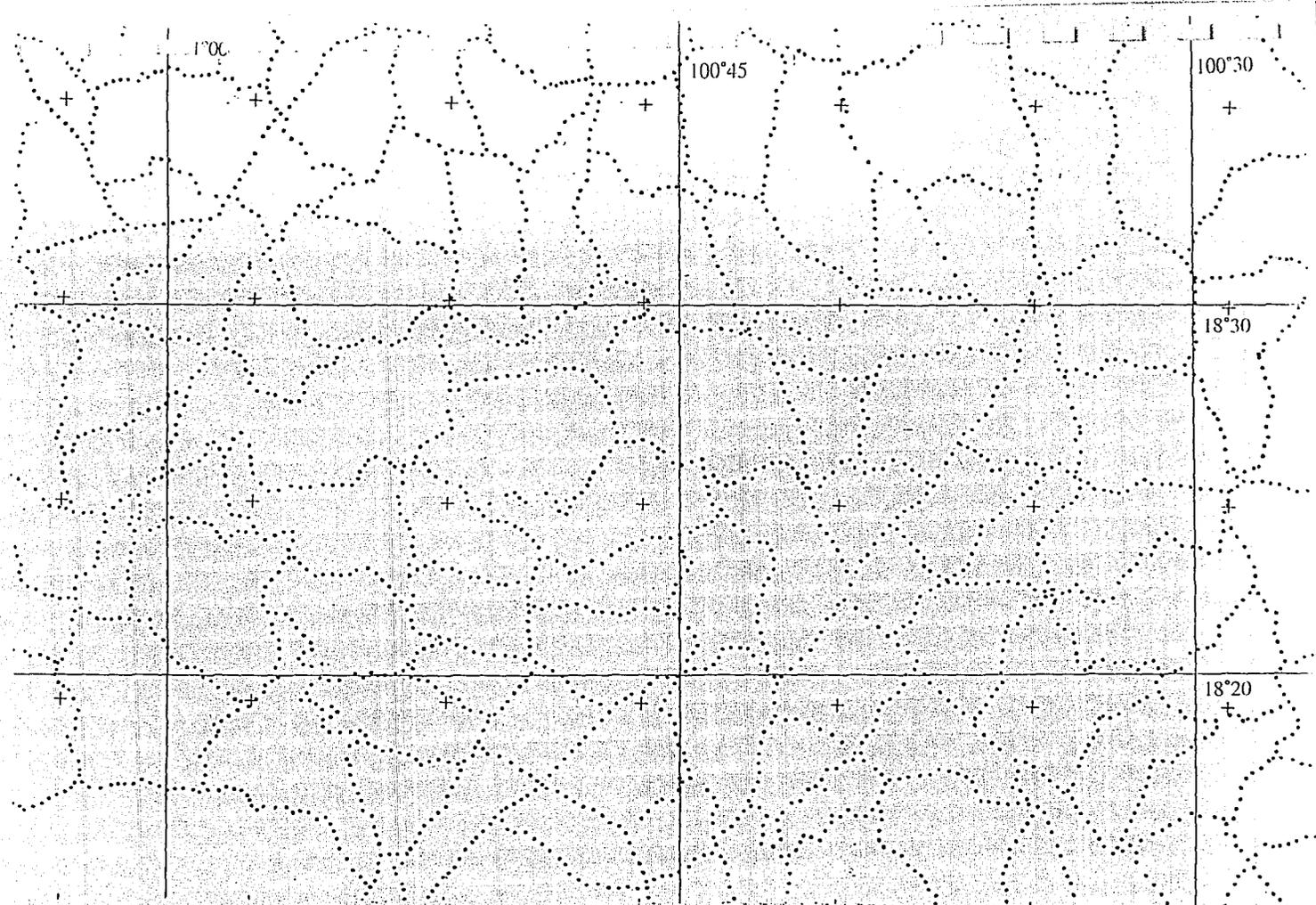
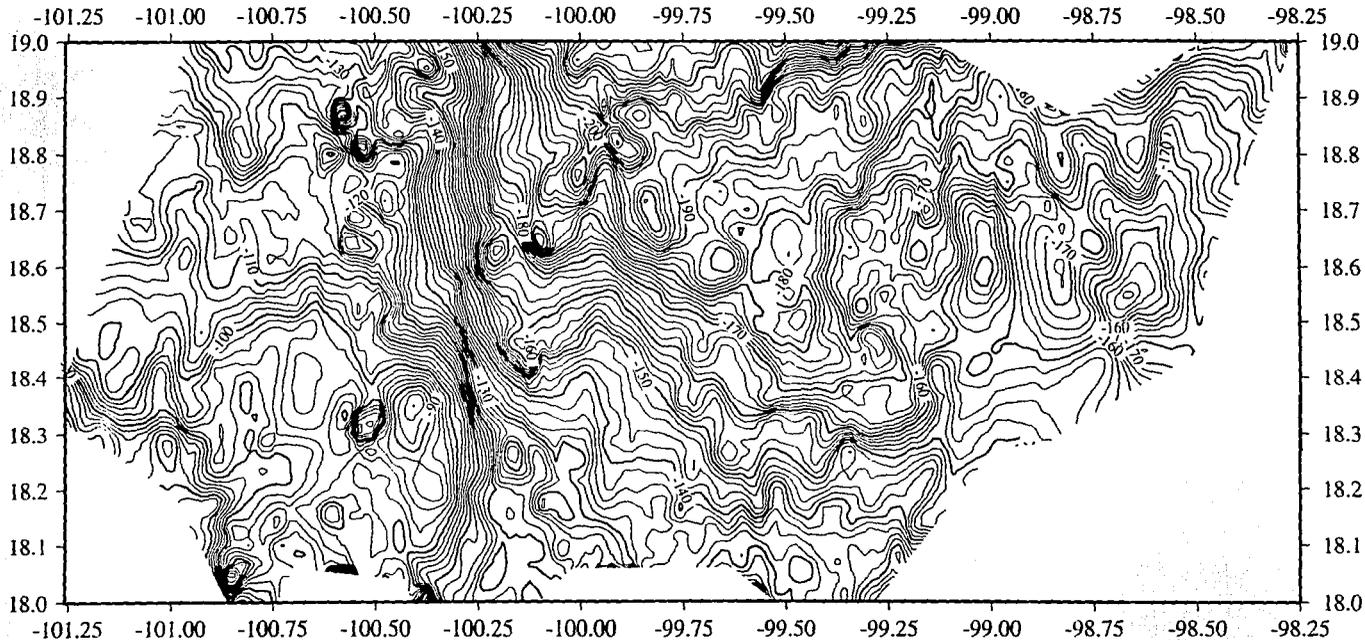


Fig.4- Pequeña sección extraída del mapa de ubicación de la red de estaciones gravimétricas empleadas en el levantamiento realizado por PEMEX.

Bouguer Simple



GMT Mar 17 13:00 Altamirano_Cuernavaca

Fig. 5- Mapa Gravimétrico de Bouguer Simple confeccionado por PEMEX utilizando una densidad de capa intermedia igual a 2.67 g/cm^3 y un intervalo de isolíneas de 2 mgls.

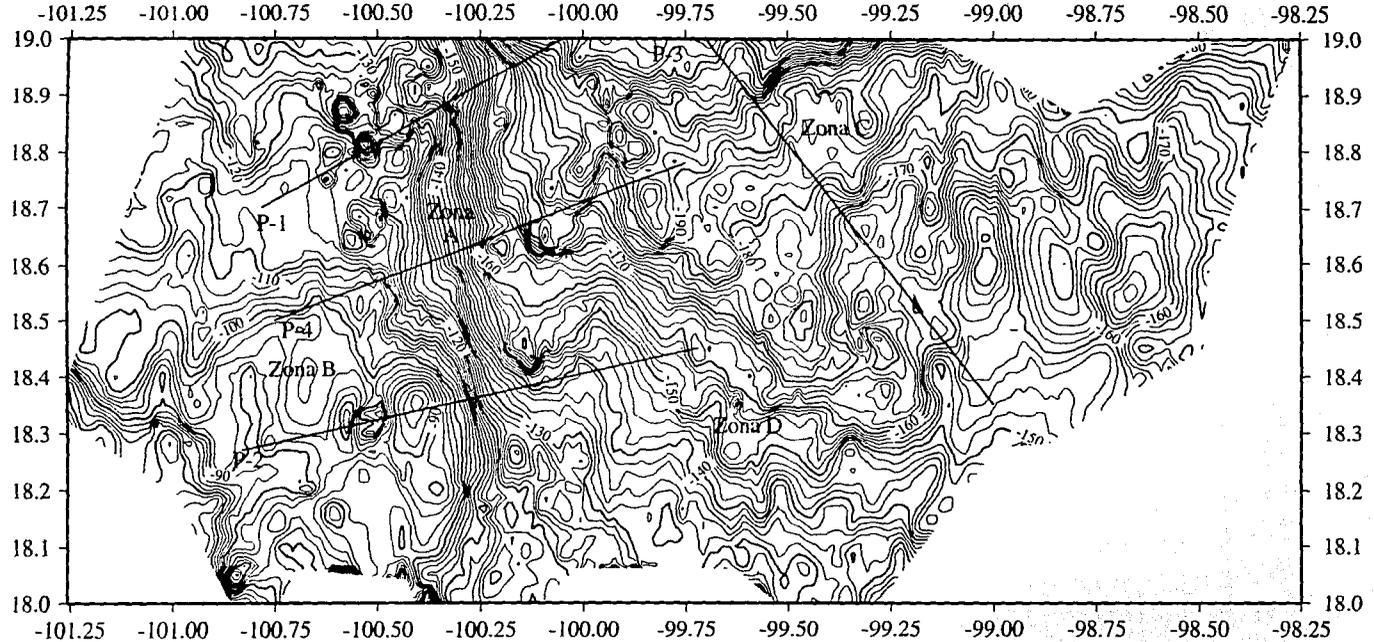
encima del nivel del mar, las que son afectadas por diferentes factores de intemperismo. Empleamos éste valor, ya que se debe ser consecuente con la densidad de capa intermedia empleada para obtener la anomalía de Bouguer. Esta anomalía se obtiene durante la corrección por capa intermedia que se le efectúa a los datos observados. La distancia máxima permisible para considerar el efecto de los prismas corresponde, según requerimientos del programa, a veinte veces la máxima elevación en el área. En éste caso la distancia máxima permisible resultó 81.65 km. Otro parámetro que tiene en cuenta el programa es la contribución de los prismas que contienen a la estación. El efecto gravimétrico de éstos prismas es cero, ya que la estación se encuentra a la misma altura que el prisma. Es decir no existe exceso de masas que pudieran afectar el valor observado. Esta es por tanto, la distancia mínima de consideración del efecto topográfico. Comparando las Figs. 5 y 6 se puede observar que el efecto de las masas que están por encima del nivel del mar es muy pequeño lo que indica que la señal manifiestada en el campo gravimétrico es producida por la naturaleza geológica de la región.

III.2- Interpretación Cualitativa.

El campo gravimétrico (Fig. 6) presenta rasgos que demuestran una confluencia de varios bloques con características petrológicas diferentes.

El alto gradiente que atraviesa toda el área de Norte a Sur y que se ubica alrededor de la longitud 100.25° W aproximadamente (Zona A), es característica de una zona de fallas que pudiera ser profunda, por la gran dimensión de ésta o pudiera también estar representando el efecto conjugado de diferentes características tectónicas y estructurales. Esta pudiera estar representada por contactos de diferentes bloques, levantamientos y hundimientos de los mismos, así como por otras geometrías. La anomalía de la Zona A limita al Oeste el campo anómalo de la Zona B, de valores altos que oscilan entre -120 mgl y -90 mgl. Esta zona es caracterizada por un gran número de anomalías cerradas, que son por lo general los valores de mayor magnitud de la región. Al Este de la Zona A aparecen dos comportamientos del campo diferentes al anterior y con ciertas particularidades entre estos (Zona C y Zona D), (Fig. 6). El campo tanto en la Zona C como en la Zona D va en ascenso de Norte a Sur oscilando entre los -220 mgl a los -130 mgl aproximadamente. El cambio del comportamiento del campo entre ambas zonas se produce a la altura de los 18.3° de latitud N, pasando de un campo de más alta frecuencia (Zona C), a uno de más baja frecuencia (Zona D). La Zona C presenta también una serie de anomalías cerradas, que al igual que en la Zona B, pueden estar relacionadas a la serie de eventos intrusivos y volcánicos presentes en la geología del área.

Bouguer Total



GMT Mar 22 14:55 Altamirano_Cuernavaca

Fig.6- Mapa Gravimétrico Total confeccionado utilizando una densidad de capa intermedia igual a 2.67 g/cm^3 y un intervalo de isóneas de 2 mgals. La corrección topográfica se obtuvo con el programa TERRAIN (Bandy, 1991), basado en Nagy (1966). A, B, C y D señalan la diferentes zonas anómalas del campo.

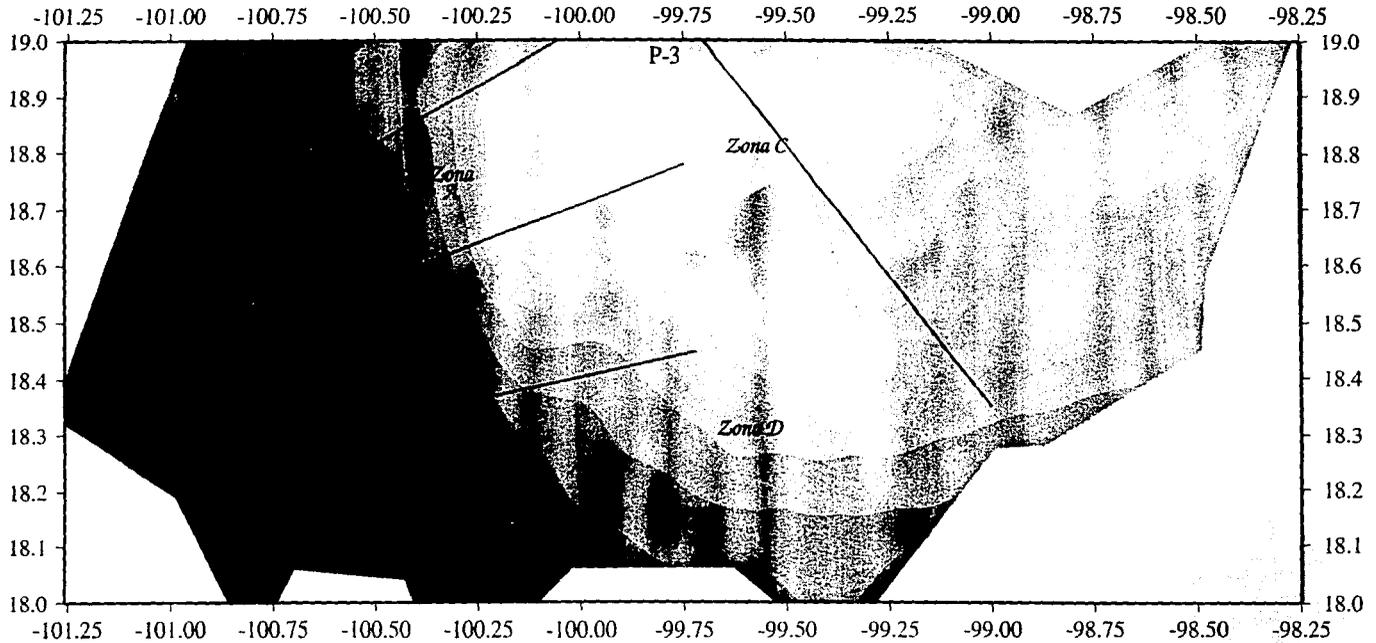
Una interpretación en profundidad más detallada se puede hacer analizando las continuaciones analíticas ascendentes de 5, 10, 15 y 20 km, que aparecen en las figuras 7, 8, 9 y 10. Como altura mínima de la continuación se empleó 5 km, ya que según la intensidad del gradiente de la Zona A (Fig. 6) consideramos a priori que la fuente que la producía no era superficial. Además como nuestro interés es obtener modelos profundos de la corteza, los cuerpos que se encuentran a profundidades menores a los 5 km no iban a ser estudiados con mucha precisión. La altura máxima de la continuación se definió como 20 km, ya que el comportamiento del campo variaba muy poco a partir de la continuación a 15 km (ver Figs 9 y 10). Además que el objetivo con el cual se empleó la CAA, que era estudiar el comportamiento de la Zona A con el fin de verificar la posible naturaleza tectónica de la fuente que la produce, ya era satisfecho a esta altura de continuación.

En la figura 7 se muestra la continuación a 5 km, donde se puede ver como el gradiente de la Zona A continúa, aunque se extiende un poco hacia los lados. Las anomalías cerradas de la Zona B desaparecen, quedando sólo una gran anomalía que representaría el bloque en su aspecto más regional y una más pequeña con valores altos entre 28 y 30 mgl. En las Zonas C y D se sigue observando la graduación en el comportamiento del campo, de norte a sur, de valores más pequeños e isolíneas cerradas, a valores más elevados con isolíneas en forma de gradiente.

El comportamiento en el resto de las continuaciones es muy semejante a lo descrito anteriormente. La anomalía de la Zona A, a medida que aumentamos la altura de la continuación analítica, se comporta con menor gradiente hasta llegar a formar parte de las anomalías más grandes que le rodean (ver continuación a 20 km, Fig. 10). A los 10 km (Fig. 8) aún se observa, aunque en menor escala, el efecto de una anomalía pequeña que era observada en la Fig. 7. Este efecto indica que la fuente que produce dicha anomalía, no corresponde a profundidades someras de la corteza terrestre.

El análisis anterior apoya la interpretación que se hace del campo gravimétrico total referida a la posible existencia en la zona de diferentes bloques con características geológicas particulares, y que pudieran estar vinculados desde este análisis cualitativo, a lo propuesto por Campa y Coney (1983).

CAA (5 Km)



GMT Mar 17 13:45 Altamirano_Cuernavaca

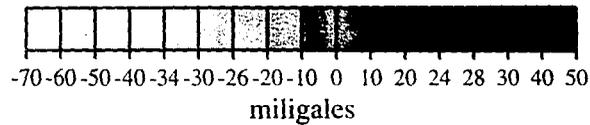
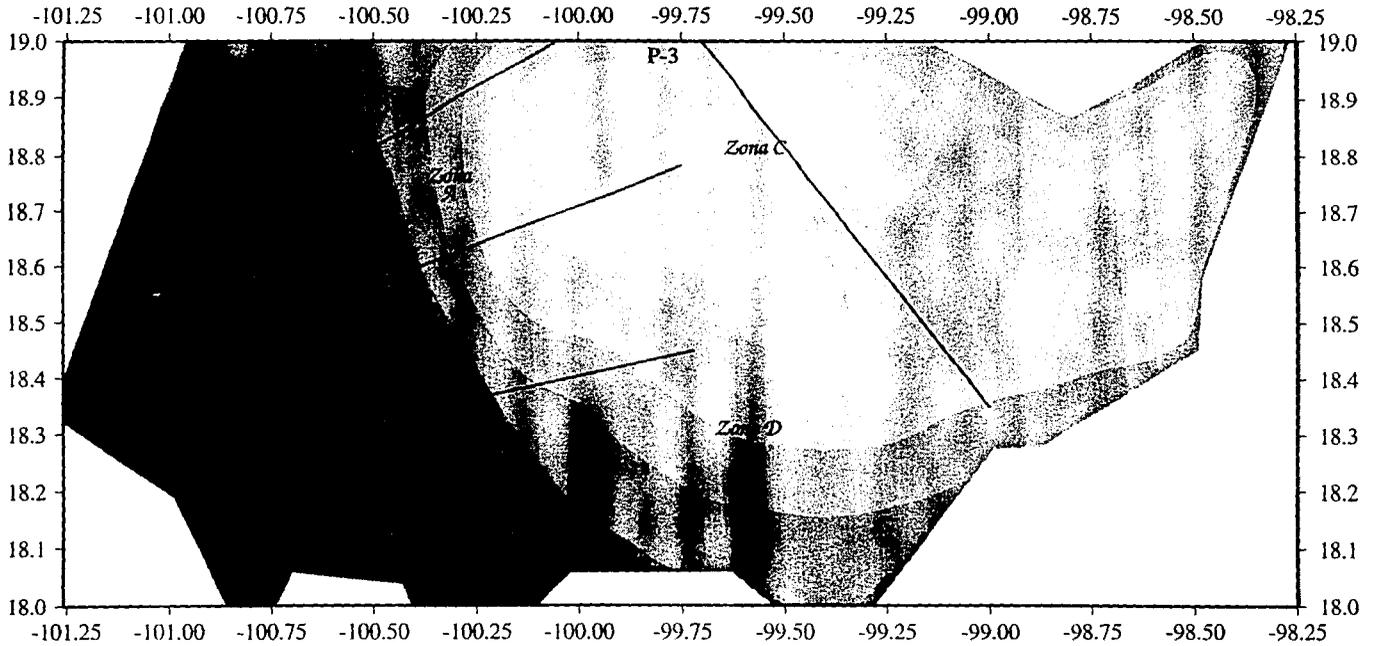


Fig. 7- Continuación Analítica Ascendente a 5 Km de altura.

CAA (10 Km)



GMT Mar 17 13:50 Altamirano_Cuernavaca

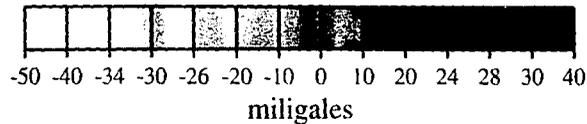
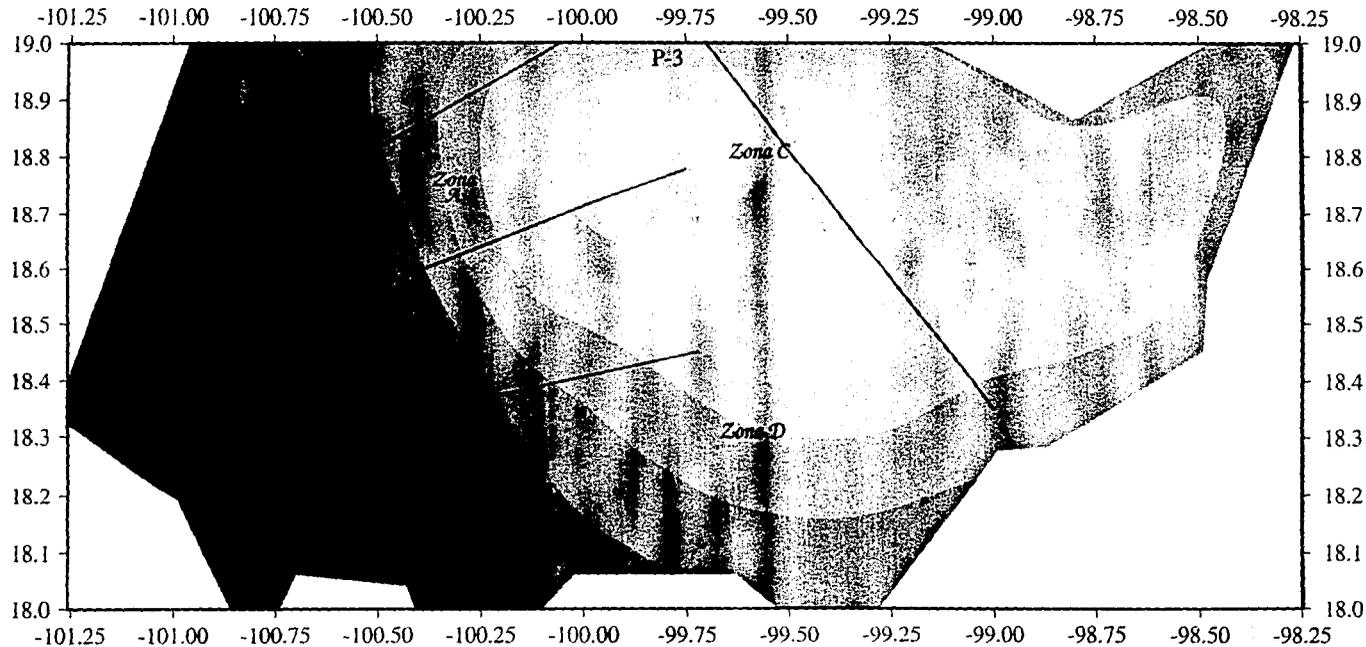


Fig. 8- Continuación Analítica Ascendente a 10 Km de altura.

CAA (15 Km)



GMT Mar 17 13:55 Altamirano_Cuernavaca

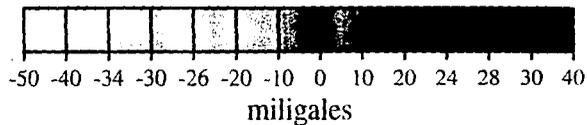
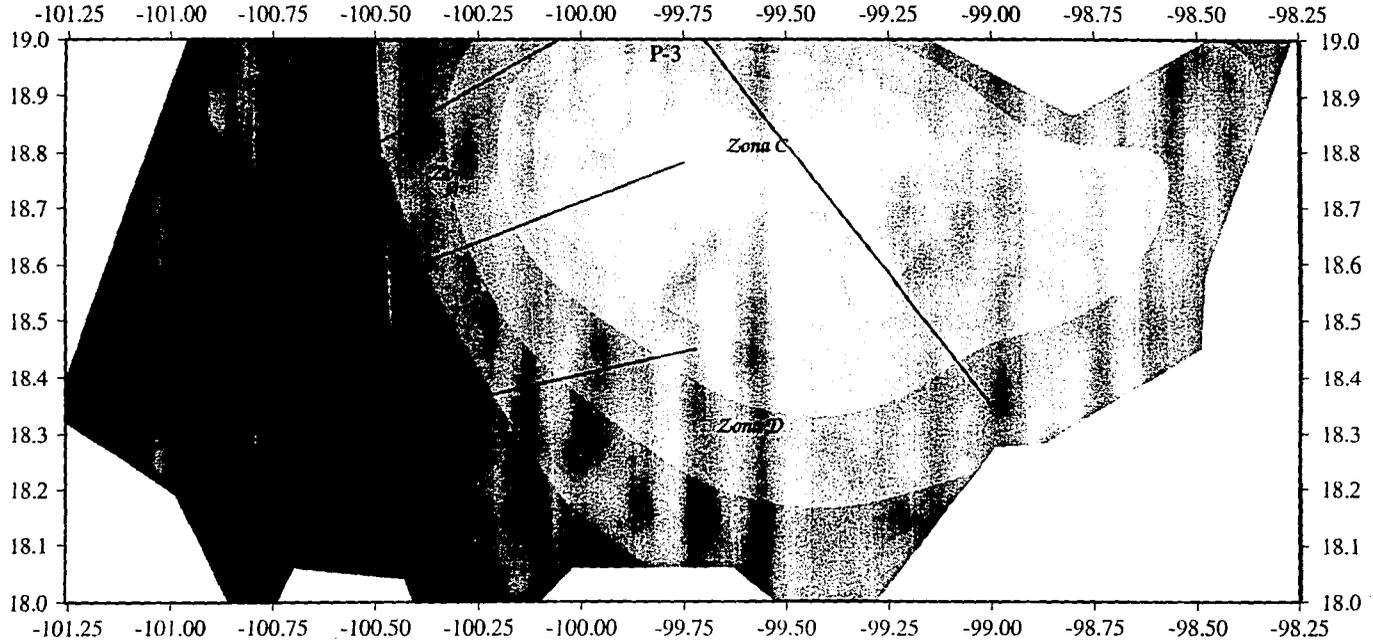


Fig. 9- Continuación Analítica Ascendente a 15 Km de altura.

CAA (20 Km)



GMT Mar 17 14:01 Altamirano_Cuernavaca

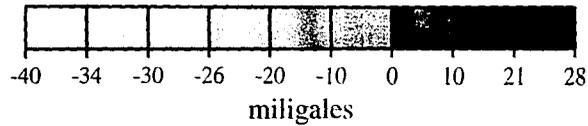


Fig. 10- Continuación Analítica Ascendente a 20 Km de altura.

III.3- Método del Gradiente Total Normalizado.

III.3.1- Generalidades del cálculo.

En la transformación de los campos potenciales existen diversas técnicas que se hacen cada vez más eficaces a medida que una complementa a la otra, durante la resolución de un problema común. La combinación matemática de algunas de estas técnicas, en la cual se disminuya al mínimo posible los factores perturbadores y desestabilizadores, conformaría una herramienta muy útil. El Gradiente Total Normalizado (GTN), (Berioszkin, 1973), es uno de estos ejemplos, combinando el cálculo de las derivadas del campo (horizontal y vertical) con la continuación analítica. Su expresión general es:

$$GTN(x, z) = \frac{G(x, z)}{G(x, z)} = \frac{\sqrt{(V_z x^2 + V_z z^2)^\gamma}}{\frac{1}{M} \sum_0^M \sqrt{(V_z x^2 + V_z z^2)^\gamma}}$$

donde:

$V_z x$ - Gradiente Horizontal

$V_z z$ - Gradiente Vertical

M- Número total de puntos del perfil

γ - Factor controlador de la resolución del método

Los gradientes se calculan a partir de las expresiones siguientes:

$$V_z x(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_{N1}^{N2} n B_n \cos \frac{\pi n x}{L} \cdot \frac{\pi n z}{L} \cdot \left(\frac{\frac{\text{sen } \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}}{\frac{\pi n}{N}} \right)^2$$

$$V_z z(x, z) = \frac{\pi}{L} \sum_{N1}^{N2} n B_n \text{sen} \frac{\pi n x}{L}$$

donde:

L - Longitud del perfil

N1, N2- Armónico inicial y final respectivamente

$$N1 \leq N \leq N2$$

$$1 \leq n \leq N2$$

$e^{-\frac{\pi n z}{L}}$ - Continuación analítica descendente

$$\left(\frac{\frac{\text{sen } \frac{\pi n}{N}}{\frac{\pi n}{N}}}{\frac{\pi n}{N}} \right)^{\mu=2} - \text{Función suavizadora o estabilizadora.}$$

B_n - Coeficientes de la sumatoria

$$B_n = \frac{2}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \Delta g(i) \text{sen}(\pi n i)$$

$\Delta g(i)$ - Valores observados del campo.

La función suavizadora se introduce con el objetivo de hacer mínima la inestabilidad provocada por la continuación analítica descendente al acercarnos a la fuente.

Durante el cálculo del GTN se le resta a la curva observada un polinomio con el objetivo de eliminar los efectos de los bordes o efecto Gibbs. Este es causado por el truncamiento que se realiza a las observaciones, debido a la imposibilidad práctica de tener una función infinita en el tiempo. El efecto se reduce a valores extremos que no son consecuentes con las observaciones.

III.3.2- Comparación con otras técnicas de interpretación de los campos potenciales.

Hacer una comparación del GTN con otras técnicas de interpretación, nos permite evaluar su potencialidad, así como analizar las diferencias de las técnicas que éste involucra (continuación analítica descendente y derivadas del campo), cuando son aplicadas conjuntamente.

Con los métodos de cálculo de derivadas.

La expresión del Gradiente Total Normalizado hace más estable la solución a los errores aleatorios y a las pequeñas anomalías debidas a las heterogeneidades de pequeña magnitud de la parte superior de la corteza terrestre, en comparación con las expresiones definidas para el cálculo de las derivadas del campo. El resultado del GTN es siempre positivo, lo que hace su análisis más sencillo y práctico. A diferencia de las derivadas, durante el empleo de este método no se pierden muchos puntos en los extremos, sólo el punto inicial y final, para garantizar que se elimine el efecto Gibbs.

Otra ventaja práctica es que con el GTN se puede obtener la profundidad de las fuentes (Febles, 1983; Cuevas et al., 1995), lo cual hace que se convierta en una técnica cuantitativa de interpretación. No así las derivadas, las que generalmente son usadas como técnicas de interpretación cualitativa.

Con la continuación analítica descendente:

El principal problema que presenta la continuación analítica descendente (CAD) y que la hace inferior en posibilidades al GTN es su inestabilidad, es decir la CAD tiene la desventaja de dejar de comportarse armónicamente cuando estamos muy cerca de la fuente del campo potencial. Al hacer una continuación del campo potencial en el semiespacio inferior se resaltan las componentes de alta frecuencia, es decir los cuerpos más someros de la corteza terrestre. El GTN utiliza la función de estabilización o función suavizadora, como también es denominada, que le permite no sólo evitar la inestabilidad sino que además facilita calcularlo a la profundidad misma de la fuente e inclusive a profundidades mayores. Por lo anterior el GTN permite obtener la profundidad del cuerpo perturbador y otros parámetros relacionados con esta.

III.3.3- Utilización e interpretación del método.

Este método ha sido utilizado con fines diversos, aunque fué ideado con intereses de prospección gasopetrolífero. Sus diferentes interpretaciones han permitido utilizarlo con el fin de caracterizar la profundidad de yacimientos minerales (Febles, 1983) así como para el estudio tectónico estructural profundo de la corteza terrestre (Elieseva et al., 1986; Díaz-Duque et al., 1990; Fundora y Pacheco, 1991; Cuevas et al., 1992; Cuevas et al., 1995) obteniéndose resultados satisfactorios en la determinación de algunas características de las fallas como su ubicación, profundidad y dirección de buzamiento.

En el presente trabajo este método se empleó con el fin de determinar si la fuente de la anomalía gradiente de la Zona A (Fig. 6), era causada por alguna estructura tectónica importante y en caso afirmativo obtener sus parámetros. También se empleó para verificar la presencia de otras dislocaciones tectónicas en la zona y la determinación de sus parámetros.

El GTN se aplicó en los perfiles que atraviezan la Zona A, siendo éstos los perfiles 1, 2 y 4 (Fig. 6). Para la correcta aplicación del método deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos propuestos por Berioszkin (1973).

1- La longitud de los perfiles (L) donde se aplica el método deben ser cinco o más veces mayor que la profundidad que se desea estudiar.

La profundidad de estudio (H) deseada en éste trabajo fué de 45 km, profundidad aproximada a la cual se construirían los modelos 2-D posteriormente. Cada uno de los perfiles a estudiar se le incrementó su longitud, hasta alcanzar y sobrepasar los 225 km. De esta forma:

$$\begin{aligned}L &= 5 \times H \\L &= 5 \times 45 \text{ km} \\L &= 225 \text{ km o mayor}\end{aligned}$$

2- El número de armónicos mayor (N2) no debe sobrepasar las 0.5 a 0.7 veces el número de puntos del perfil (M).

$$\begin{aligned}N2 &\leq 0.7 \times M \\N2 &\leq 0.7 \times 65 \\N2 &\leq 45.5\end{aligned}$$

3- El intervalo de profundidad o niveles de cálculo tiene que ser mayor o igual al intervalo de muestreo del perfil.

En este trabajo el intervalo de muestreo de los perfiles fué de 3.5 km y el intervalo de profundidad o niveles de cálculo fué de 5 km.

Estas características son resumidas en la tabla 1.

<i>Perfil</i>	<i>Longitud (Km)</i>	<i>Profundidad de estudio (Km)</i>	<i>Número de puntos</i>	<i>Número de armónicos</i>
P-1 Angao - Almoloya de Las Granadas	227.50	45	66	5,10,15,20,25, 30,35,40
P-2 Pinedo - El Potrero	255.50	45	74	5,10,15,20,25, 30,35,40,45
P-4 C. El Cajón - C. Piedra Parada	227.50	45	65	5,10,15,20,25, 30,35,40

Tabla 1. Características de los perfiles y de la metodología empleada en el Método del Gradiente Total Normalizado.

Los resultados del método son representados en forma de cortes de isolíneas en profundidad (Figs. 16.1 a 16.3), para los diferentes números de armónicos que son definidos. Los criterios de interpretación con fines tectónicos son: **la presencia de cadenas de mínimos que se repitan en varios armónicos y/o un máximo que se repita en varios armónicos**. Estos criterios proponen la presencia de una posible zona de fallamiento, cuya dirección de buzamiento se interpretaría como la dirección en que se presenta la anomalía.

III-4. Modelado bidimensional.

III-4.1. Generalidades.

El modelado bidimensional es de gran utilidad para poder estimar la estructura y profundidad de los diferentes cuerpos que constituyen tanto la corteza superficial como la corteza profunda. Además, permiten agrupar los diferentes criterios geológicos que existan del área y realizar una interpretación más realista de la información.

De esta forma, se confeccionaron cuatro modelos geofísicos en diferentes perfiles, utilizando la información gravimétrica con la correspondiente corrección por topografía.

Los perfiles fueron ubicados de tal forma que cortaran las anomalías de mayor interés desde el aspecto cualitativo (Fig. 6).

Las coordenadas de los perfiles son:

Perfil	Inicio [grados]		Final [grados]		Inicio [grad. y min.]		Final [grad. y min.]	
	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
P-1 Angao - Almoloza de Las Granadas	-100.78°	18.70°	-100.05°	19.00°	-100°47'	18°42'	-100°03'	19°00'
P-2 Pinedo - El Potrero	-100.83°	18.27°	-99.72°	18.45°	-100°50'	18°16'	-99°43'	18°27'
P-3 Villa Guerrero - C. Colorado	-99.70°	19.00°	-99.00°	18.35°	-99°42'	19°00'	-99°00'	18°21'
P-4 C. El Cajón - C. Piedra Parada	-100.75°	18.50°	-99.75°	18.78°	-100°45'	18°30'	-99°45'	18°47'

Tabla 2: Coordenadas de los perfiles procesados.

Como se observa en la figura 6, los perfiles 1, 2 y 4 cortan casi perpendicularmente la anomalía gradiente de la Zona A, siendo ésta la anomalía más interesante por su forma y ubicación. El perfil 2 pasa no sólo por la Zona A, sino que además parte desde la Zona B, donde encontramos anomalías de alta frecuencia. Finalmente llega a la Zona D, con anomalías de gran magnitud. El perfil 3 fué ubicado en la parte más oriental del área de

estudio, donde aparecen las Zonas C y D, correspondiendo a una región donde los valores del campo disminuyen de Norte a Sur.

La longitud de estos perfiles oscila entre los 84 y 117 km lo cual garantiza que los modelos que son obtenidos durante el procesamiento bidimensional alcancen grandes profundidades, llegando hasta el manto superior.

Para la modelación se empleó un programa basado en el algoritmo de Talwani et al. (1959). Este programa facilita una gran interactividad y comodidad durante su aplicación, permitiendo conformar cuerpos de variadas geometrías. Esto facilita crear modelos geofísicos lo más cercano posible a los modelos geológicos de la corteza terrestre. Además ofrece salidas gráficas que permiten distinguir en los modelos una gran cantidad de cuerpos.

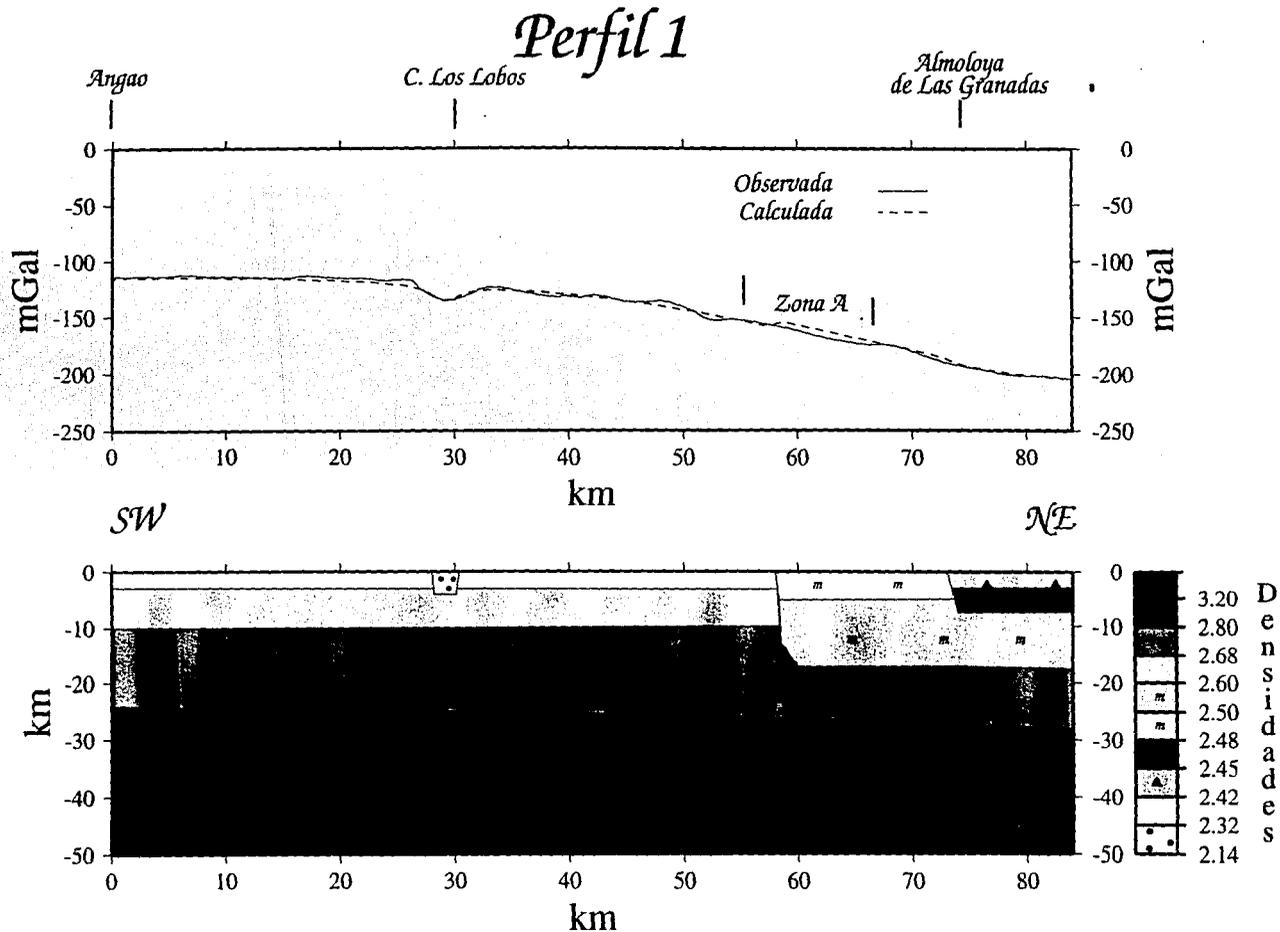
III-4.2 Conformación de los modelos.

El área que ocupa el presente trabajo se encuentra aproximadamente a unos 220 km de distancia de la Trinchera Mesoamericana donde se produce la subducción de las placas Rivera y Cocos bajo la placa Norteamérica (Mammerickx y Klitgord, 1982). Por esta razón los modelos se prolongaron no más allá de la profundidad hasta la cual se encuentra la placa subducida. Pardo (1993) presenta una posible geometría de la placa Cocos, la cual subduce gran parte de esta región Sur de México, prolongándose bajo la Faja Volcánica Transmexicana. Este resultado es obtenido utilizando localizaciones de hipocentros de sismos registrados con la red local y telesísmica.

Según Pardo, 1994 bajo el área del presente trabajo la placa Cocos alcanza una profundidad promedio de 47 km hasta aproximadamente los 18.4° de latitud entre las longitudes -100.25° a -100.25° (Fig. 6). En el resto del área las profundidades aumentan rápidamente pasando de los 50 km. Según lo anterior el modelo del perfil 2 (Fig. 12) fué limitado hasta la profundidad de 47 km y el resto de los modelos (Figs. 11, 13 y 14) se propusieron hasta los 50 km como máximo.

Seguidamente pasamos a estudiar las diferentes profundidades y densidades del manto superior, propuestas en los trabajos publicados (Urrutia-Fucugauchi y Molina, 1992; Molina-Garza y Urrutia, 1993; Arzate et al., 1993) y que nos pudieron servir de apoyo para ubicar éste y otros cuerpos que conforman las profundidades mayores en los modelos.

Urrutia-Fucugauchi y Molina (1992), confeccionaron tres modelos de la corteza utilizando información gravimétrica. En su modelo A el espesor de la corteza oscila entre los 35 a 45 Km, obtenido mediante un modelo de Airy. El B obtenido a partir de modelos



GMT Mar 18 09:52 p-1

Fig.11- Modelo Geológico-Geofísico del perfil 1, ubicado entre la regiones de Angao y Almoloya de Las Granadas.

de ondas superficiales, dió una profundidad cortical de 45 km, con una densidad para el manto superior de 3.3 g/cm^3 y para la corteza inferior igual a 3.08 g/cm^3 . En su modelo C el espesor máximo de la corteza es de 46 km, con una densidad del manto superior de 3.4 g/cm^3 pero se interpreta, como en el modelo B, una capa de densidad intermedia ($\sigma = 3.25 \text{ g/cm}^3$ en B y $\sigma = 3.29 \text{ g/cm}^3$ en C). En cuanto a la profundidad de la corteza en el Oeste de México, los autores concluyen que ésta se incrementa desde el margen del Océano Pacífico hacia el interior del continente, oscilando entre 40 a 46 km.

Molina-Garza y Urrutia (1993) en un trabajo de modelación gravimétrica 2D en tres perfiles regionales, obtuvieron que el espesor cortical alcanzaba valores de 47 km en la zona Sur y central de México, con una disminución de este espesor a medida que se acercaban al margen Pacífico. Ellos se basaron en un análisis de compensación isostática unido al cálculo de la continuación analítica ascendente a una y dos unidades de muestreo, así como en el empleo de datos sísmicos para conformar los modelos.

Arzate et al. (1993) llevaron a cabo un trabajo de modelación cortical preliminar en la zona del margen continental de Oaxaca a partir de mediciones magnetotélúricas y gravimétricas, llegando a la conclusión de que el contacto manto superior-corteza inferior (Moho) (propuesto a 45 ± 4 km de profundidad), correlaciona bien con las características estructurales mayores en superficie.

Otros trabajos empleando sísmica de refracción sugieren una profundidad para este contacto de 45 km para la zona de Oaxaca (Valdés et al., 1986) y para la zona entre Petatlán y la Ciudad de México (Valdés, 1992).

Durante la modelación posterior, la profundidad del manto superior varió de la posición presentada en los modelos finales, con el objetivo de tener en cuenta cual era el rango de precisión. Estas pruebas indicaron que los cambios que debían hacerse a los modelos eran incoherentes, según los trabajos de interpretación geológica y geofísica publicados. Por lo que consideramos que el Moho (cuerpo de 3.20 g/cm^3) y el cuerpo de densidad 2.80 g/cm^3 (Figs. 11, 12, 13 y 14) tienen su profundidad bastante restringida alrededor de la posición reportada en los trabajos consultados, y como resultó en los modelos aquí propuestos.

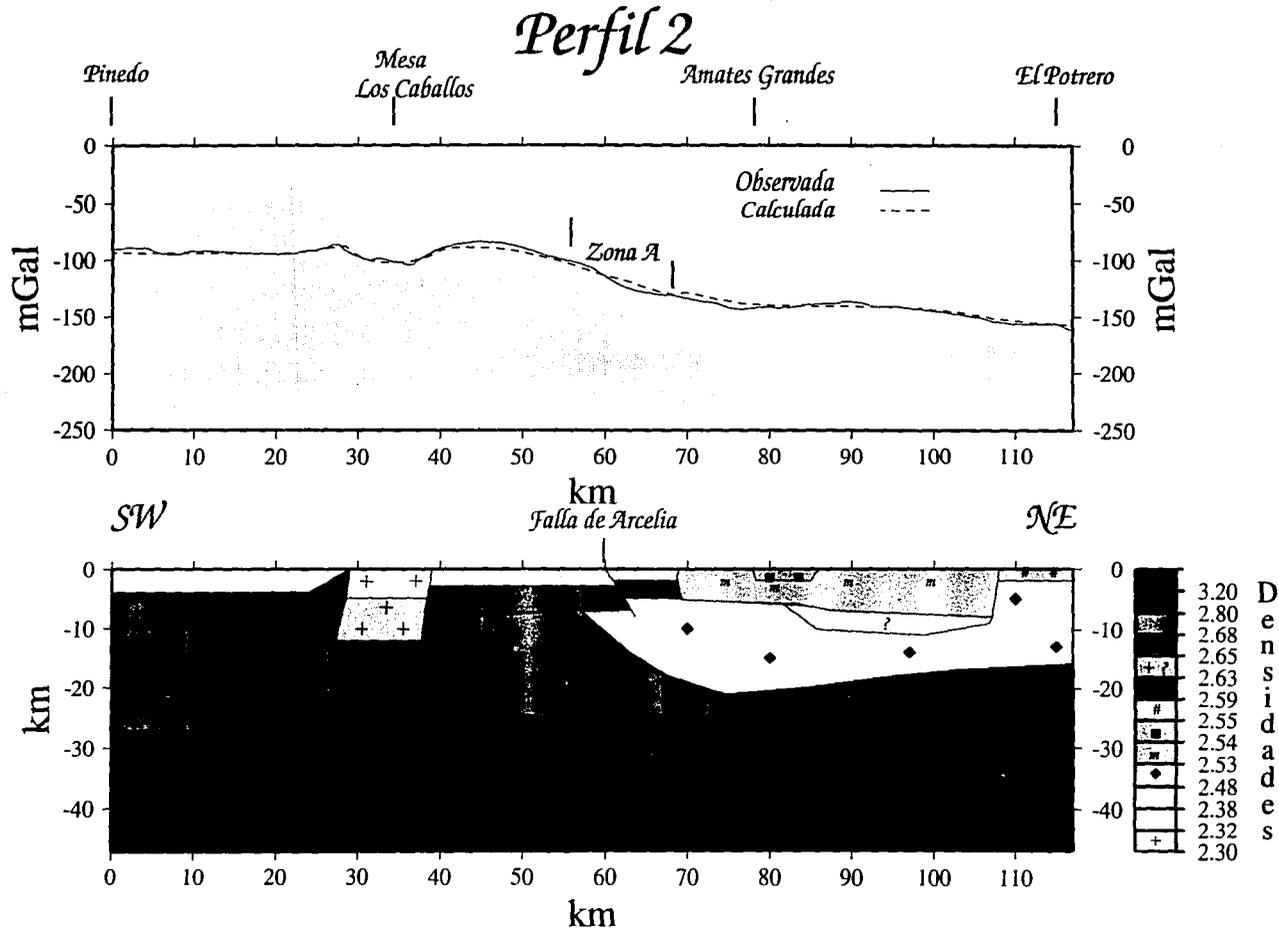
En la figura 11 se muestra el modelo final del perfil 1 (Angao-Almoloya de Las Granadas) donde el cuerpo de densidad 3.20 g/cm^3 es interpretado en este trabajo como el manto superior. La profundidad, por tanto, de la corteza va en aumento desde la región de Angao hasta Almoloya de Las Granadas (41 km hasta 47 km), lo que coincide con Valdés (1992), Urrutia-Fucugauchi y Molina (1992) y Molina-Garza y Urrutia (1993). En los modelos del perfil 2 (Pinedo-El Potrero) (Fig.12) y perfil 4 (Cerro El Cajón-Cerro Piedra Parada) (Fig.14) también se puede observar la mayor profundidad que sufre el

Moho en esta dirección aunque dada la posición relativa de éstos respecto al perfil 1 (P-1), las profundidades de la corteza varían en menor grado (en el modelo del perfil 2 oscila entre los 43 a 47 km y en el modelo del perfil 4 disminuye de 43 a 45 km). Bajo la Faja Volcánica Transmexicana el modelo del perfil 3 (Villa Guerrero-Cerro Colorado) (Fig.13) refleja profundidades del manto hasta de 44 km, presentándose también en forma descendente desde más al sur, donde toma valores de 43 km.

De la corteza inferior también se obtuvo información de apoyo en los trabajos anteriormente revisados. Esta fué representada en todos los modelos con densidad 2.80 g/cm^3 (Figs. de 11 a 14). Este valor está dentro del rango de densidades empleado por diferentes autores, y que Smithson y Brown (1977) recopilan, para posteriormente proponer de forma muy general un modelo de la corteza continental inferior de México. La profundidad de la corteza inferior, al igual que del manto superior, va haciéndose mayor a medida que avanzamos en distancia en el modelo del perfil 1 (24 a 28 km) (Fig. 11). En los modelos de los perfiles 2 y 4 (Figs. 12 y 14) el aumento también se produce pero con ciertas irregularidades. Esto provoca que la profundidad promedio entre Pinedo y Mesa de Los Caballos para el perfil 1 y entre Cerro El Cajón y Palmar Grande en el perfil 2, sea diferente a la correspondiente en el resto de ambos perfiles. Lo anterior no ocurre en el modelo del perfil 3 (Fig. 14), ya que la corteza inferior aquí se comporta con una geometría muy simple y descendentemente a medida que nos acercamos a la región de Cerro Colorado.

Sobre este cuerpo (corteza inferior) de 2.80 g/cm^3 aparece un cuerpo representado también en todos los modelos con la misma densidad, igual a 2.68 g/cm^3 . Sus características en cuanto a profundidad y geometría están estrechamente relacionadas al comportamiento del resto de los cuerpos más superficiales, por lo que se puede observar que para cada modelo hay un comportamiento distinto del cuerpo. En el modelo del perfil 1 (Fig. 11), éste se eleva hasta la profundidad de 10 km, antes de llegar a la zona de Almoloya de Las Granadas. Esta misma profundidad aproximadamente la toma en los modelos de los perfiles 2 y 4 (Figs. 12 y 14), entre las distancias aproximadas de 0 a 60 km (Pinedo y aproximándonos a Amates Grandes) y de 0 a 45 km (Cerro El Cajón-Palmar Grande) respectivamente. Todos los modelos tienen como semejanza que para la parte final de éstos, la corteza inferior disminuye su espesor considerablemente, excepto para el modelo del perfil 3 donde prácticamente permanece sin variaciones.

La parte restante de los modelos se confeccionó empleando diferentes fuente geológicas publicadas (Cserna (1978), INEGI (1985a), Jansma et al. (1991), Johnson et al. (1991), Cabral-Cano (1994)).



GMT Mar 18 09:35 p-2

Fig.12- Modelo Geológico-Geofísico del perfil 2, ubicado entre las regiones de Pinedo y El Potrero.

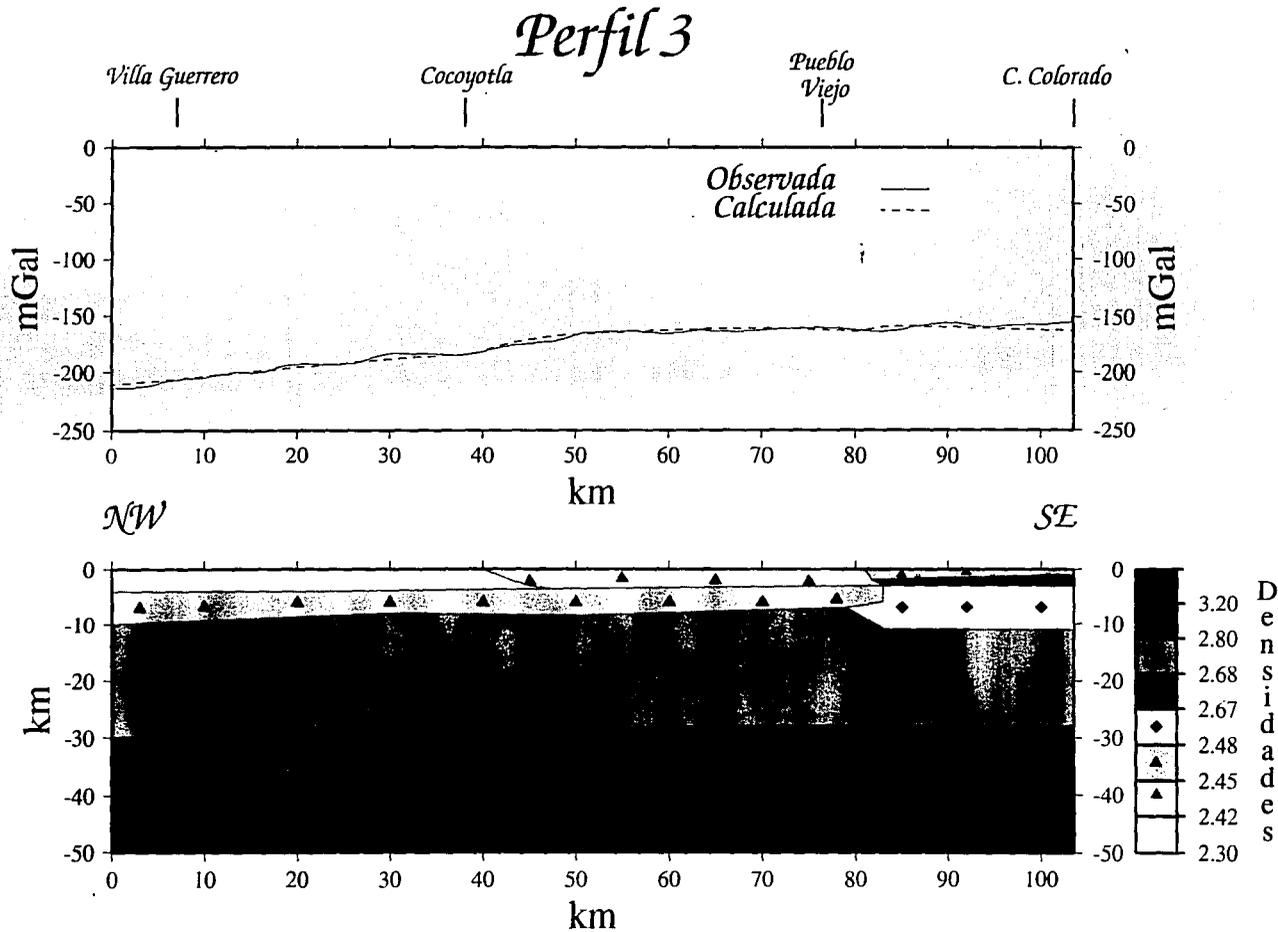
En los modelos de los perfiles 1, 3 y 4 (Figs. 11, 13 y 14) se ubicaron todos los contactos marcados en el mapa geológico a escala 1:250 000 publicado por INEGI (1985a). Para el modelo del perfil 2 pudo tenerse acceso a una mayor información superficial, ya que éste pasa por dos zonas estudiadas y mapeadas con más detalle que en los casos anteriores.

Con esta información se trató de conformar los modelos con base a los estudios e interpretaciones geológicas con que se cuenta. Las profundidades de estos cuerpos fueron resultado de la modelación gravimétrica y de algunos criterios geológicos que posteriormente se presentarán.

La parte estructural fué consultada del mapa de INEGI (1985a) y de los mapas antes mencionados de Johnson et al., (1991) y Cabral-Cano (1994). En realidad varias de las fallas que se proponen en estos trabajos no fueron tenidas en cuenta por nosotros, dada la poca profundidad que éstas presentan. Para corroborar este criterio se empleó la técnica del Gradiente Total Normalizado, descrita anteriormente.

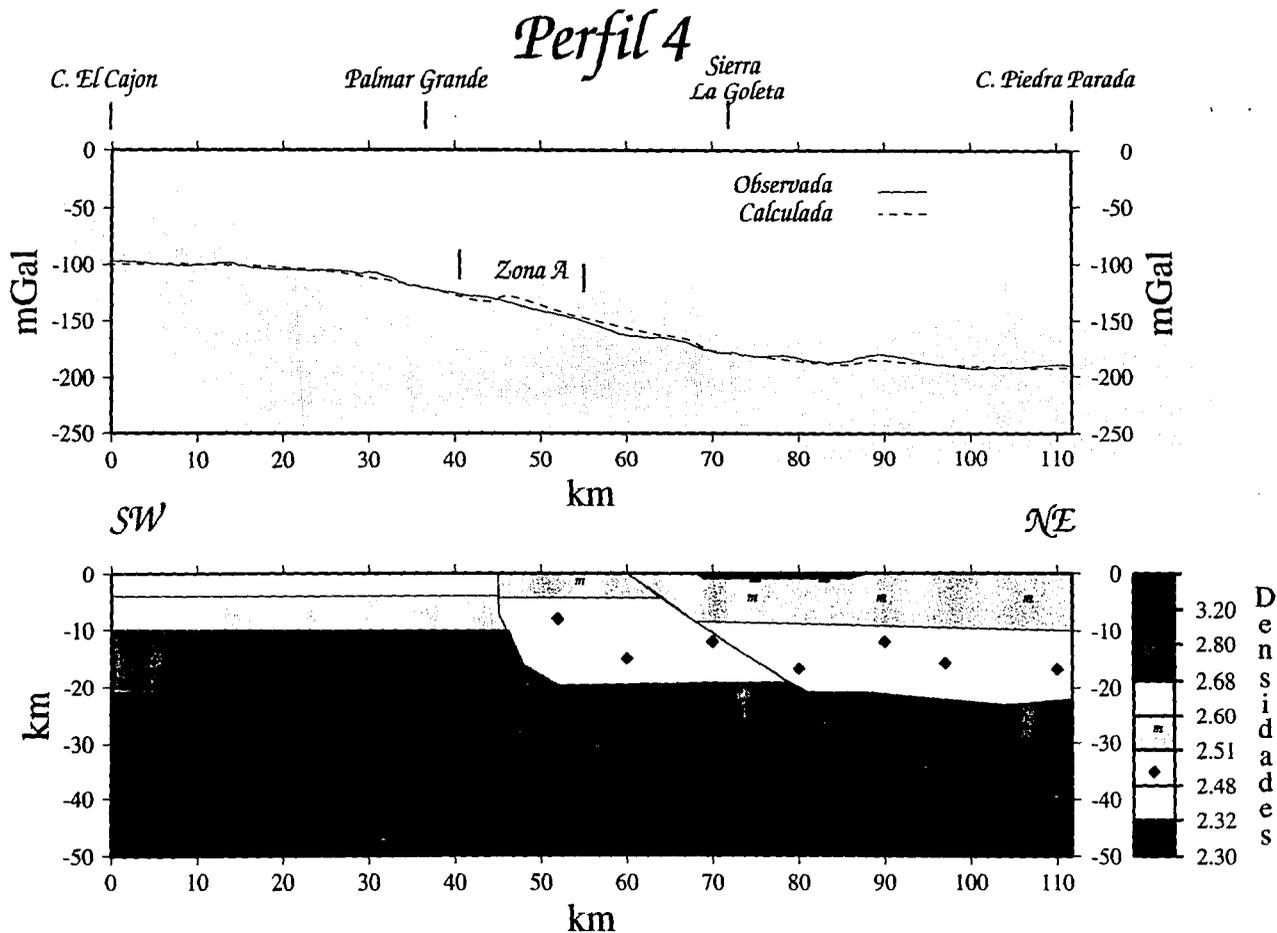
Las densidades de los cuerpos superficiales no se corresponden con las litologías que en el próximo capítulo se interpretarán, pero es justo mencionar que durante el modelaje se trató de ajustar a los cuerpos las densidades que más se aproximaran a las interpretaciones geológica existentes. Sin embargo, conocemos que existen diversos factores que impiden que en estos modelos regionales e inclusive en otros más detallados (Urrutia-Fucugauchi et al., 1994), coincida la densidad del modelo físico con las litologías. Una causa la encontramos en que el campo gravimétrico es la superposición de las respuestas o efectos de diferentes cuerpos geológicos que pueden estar relacionados geoméricamente y que en un modelo bidimensional es difícil separar estos y otros efectos como son: del tipo petrofísico, como la anisotropía del medio; la no homogeneidad; el aumento de la densidad con la profundidad; la presencia o no de flúidos en las rocas lo que indica la porosidad presente; y otros. Además como podemos observar las dimensiones de la mayoría de los cuerpos son bastante grandes lo que hace más complicado aún adjudicar una densidad a una gran cantidad de litologías que pueden estar involucradas en éstas extensiones. Otra causa puede ser la diferencia entre las muestras a las que se les determinan sus valores de densidad y los cuerpos en la corteza terrestre, en cuanto a profundidad, grado de intemperismo, fracturamiento, etc. Esto nos llevó a prestar más interés durante la modelación a la geometría de los cuerpos y a la relación geométrica entre éstos.

El ajuste obtenido en todos los casos es aceptable, aunque pudiera mejorarse aún si se conociera la geología con mayor detalle tanto en superficie como en profundidad.



GMT Mar 18 10:02 p-3

Fig.13- Modelo Geológico-Geofísico del perfil 3, ubicado entre Villa Guerrero y Cerro Colorado.



GMT Mar 18 09:17 p-4

Fig.14- Modelo Geológico-Geofísico del perfil 4, ubicado entre Cerro El Cajón y Cerro Piedra Parada.

III.5- Mediciones de densidad.

Durante las etapas iniciales del trabajo visité parte del área y recolecté un conjunto de muestras de los principales tipos de litologías que afloran en Tierra Caliente (Fig.15).

Con el objetivo de tener al menos una idea de las densidades de estas rocas, dada la ausencia de pozos que apoyaran los modelos y conociendo además que éstas están muy afectadas por el intemperismo, cambio de presión, etc. realicé mediciones de sus densidades. Estas mediciones fueron realizadas de la forma más sencilla atendiendo a los aspectos mencionados y además porque se contaba con sólo un número reducido de muestras. Esto me impidió tener una caracterización satisfactoria de los complejos litológicos que se analizaron, en ocasiones con no más de dos muestras por litología.

El trabajo de laboratorio que se realizó fué medir con una balanza el peso de cada muestra. Luego éstas fueron sumergidas en agua destilada, determinándose el volumen de la misma. Posteriormente el cálculo de la densidad se obtuvo dividiendo el peso por el volumen de cada una de las muestras, arrojando los valores que aparecen en la tabla 2. En esa tabla aparece el número de muestra, su peso en gramos, el volumen inicial de agua destilada, el volumen final en el recipiente luego de ser sumergida la muestra, el volumen de la muestra obtenido al restar $V_{inicial} - V_{final}$. Luego aparece la densidad en gramos por centímetros cúbicos y finalmente se lista una descripción aproximada del tipo de roca o el nombre de la formación geológica a la que pertenece.

En la tabla 3 se muestran los promedios obtenidos de las anteriores mediciones, para cada formación geológica, o en algunos, para cada litología representada en los mapas geológicos consultados.

Muestra	Peso (g)	Vinicial (cc)	Vfinal (cc)	Vmuestra (cc)	Densidad (g/cm ³)	Litología
M21-1	177.12	225	290	65	2.725	Caliza Mexcala
M18-1	130.04	200	250	50	2.6	Filita
M18-2	177.31	200	268	68	2.61	Filita
M22-1	69.51	225	254	29	2.4	Mexcala (lutita)
M20-3	120.73	325	368	43	2.81	Filita
M23-1	157.98	250	314	64	2.47	Volcánicos (ignimbritas, brecha, ceniza)
M23-2	112.26	225	274	50	2.24	Volcánicos (ignimbritas, brecha, ceniza)
M20-1	284.44	300	405	105	2.71	Filita
M24-4	80.58	200	240	40	2.01	Asociaciones
M21-5	103.27	325	363	38	2.72	Filita

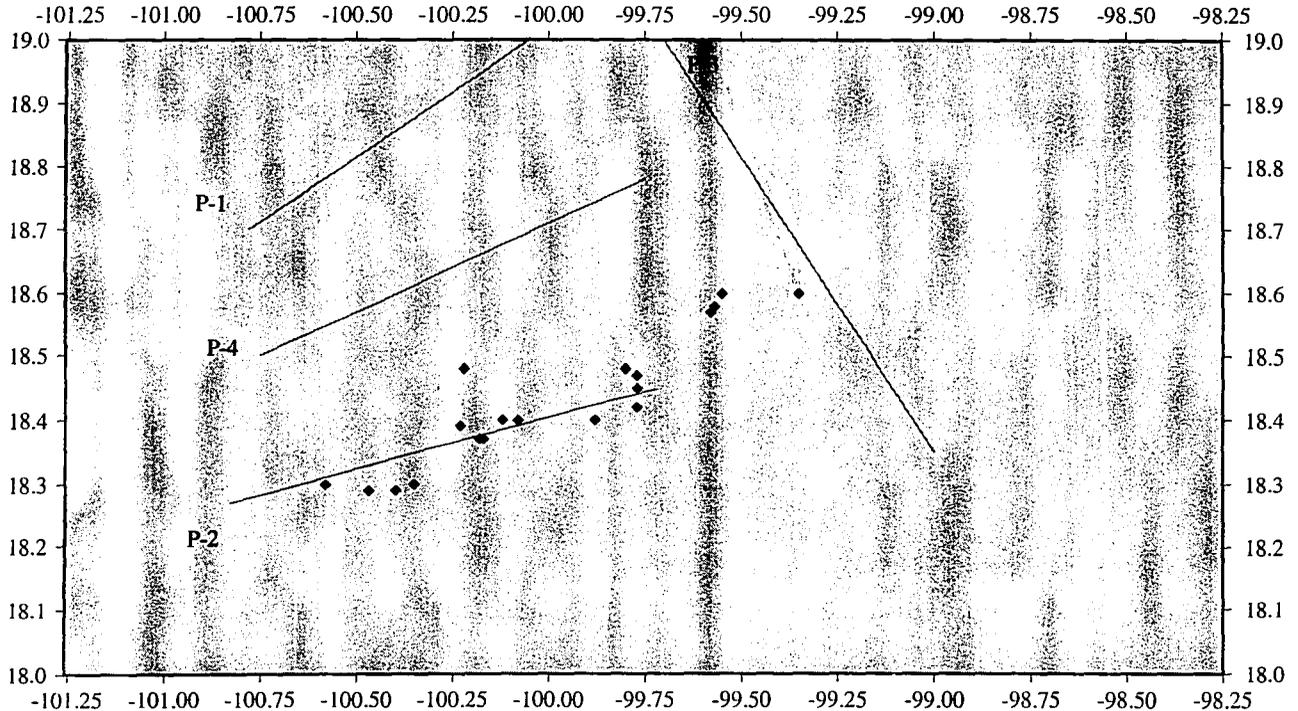
M22-5	84.75	175	205	30	2.82	Roca Verde Taxco Viejo
M19-3	69.86	200	225	25	2.79	Filita
M23-3	140.63	200	257	57	2.47	Toba riolítica
M21-1	64.11	150	175	25	2.56	F. Mexcala (Pizarra arcillosa y arenisca)
M21-3	177.95	325	400	75	2.37	Mexcala (lutita)
M19-3	137.49	275	325	50	2.75	Filita
M24-4	196.78	200	275	75	2.62	Asociaciones
M23-4	166.01	200	264	64	2.594	Arenisca y lutita litificada
M23-4	138.09	200	253	53	2.605	Arenisca y lutita litificada
M23-1	102.65	225	268	43	2.387	Volcánicos (ignimbritas, brecha, ceniza)
M23-1	129.74	225	277	52	2.495	Volcánicos (ignimbritas, brecha, ceniza)
M24-2	53.73	150	171	21	2.559	Toba ácida
M24-2	58.95	175	200	25	2.358	Toba ácida
M24-2	86.19	175	212	37	2.329	Toba ácida
M24-3	162.35	225	284	59	2.75	Caliza Morelos
M24-3	104.55	200	240	40	2.614	Caliza Morelos
M23-7	41.62	200	215	15	2.775	Caliza Morelos
M23-7	113.87	200	243	43	2.648	Caliza Morelos
M23-7	84.52	200	232	32	2.641	Caliza Morelos
M24-1	73.05	200	238	38	1.92	Toba ácida alterada
M24-1	136.33	225	292	67	2.034	Toba ácida alterada

Tabla 3: Resultados de la determinación de las densidades de las muestras de campo.

Litología	Promedio (g/cm³)
F. Mexcala	2.514
Filita	2.713
Volcánicos (ignimbrita, ceniza, brecha)	2.38
Asociaciones	2.31
Roca Verde (Complejo Metamórfico Tierra Caliente)	2.82
Toba ácida	2.44
Toba alterada	1.98
Caliza Morelos	2.685

Tabla 4: Valores promedios obtenidos de las muestras de campo.

Ubicación de las muestras



GMT Mar 18 10:22 Altamirano_Cuernavaca

Fig.15- Ubicación de las muestras recolectadas en el campo y que fueron determinadas sus densidades en el laboratorio (vea el texto para mayor detalle).

Como se puede constatar en la figura 15 la mayoría de las muestras fueron tomadas cerca del perfil P-2 y unas pocas en las cercanías del perfil P-3. La causa de lo anterior es que se aprovecharon las principales carreteras que atraviesan parte de la región.

Realizando una comparación de los valores de la tabla 4 y los valores de densidad obtenidos como resultado del modelaje, se puede constatar que existen algunas correspondencias. Por ejemplo, la Formación Mexcala es modelada en el perfil 2 (Fig. 12) con densidad 2.54 g/cm^3 y es obtenida en el laboratorio con 2.514 g/cm^3 . Los volcánicos (ignimbrita, ceniza, brecha) son modelados en el perfil 2 (Fig. 12) con la misma densidad que la obtenida en el laboratorio y varía un poco en los modelos de los perfiles 1 y 4 con 2.32 g/cm^3 (Figs. 11 y 14 respectivamente). Otra correspondencia se observa entre las secuencias denominadas Asociaciones donde la diferencia entre los valores modelados (Plataforma Morelos-Guerrero, perfil 3, Fig. 13) y medidos es de 0.01 g/cm^3 . La densidad obtenida en el laboratorio de las tobas ácidas (2.44 g/cm^3), corresponde con las densidades modeladas en los perfiles 1 (Fig. 11) y perfil 3 (Fig. 13) para el cuerpo de tobas ácidas (2.45) que aparece debajo de la Faja Volcánica Transmexicana en ambos modelos. Finalmente las calizas de la Formación Morelos presentan correspondencia en el modelo del perfil 3 (Fig. 13) con diferencias también de 0.01 g/cm^3 .

IV- Resultados y discusión.

La continuación analítica ascendente, el gradiente total normalizado y la modelación gravimétrica bidimensional han sido empleadas con el objetivo de caracterizar la distribución y geometría de los diferentes paquetes de rocas presentes en el área. Para ello se trató de obtener modelos corticales que encierren, en geometrías simplificadas, la interrelación que existe entre los diversos complejos litológicos presentes en la región suroeste de México.

Para un mejor análisis de estos resultados realizamos una interpretación de cada modelo obtenido, basándonos en la hipótesis general acerca de los paquetes litológicos propuestos por Campa y Coney (1983), enriqueciendo ésta con otros criterios y resultados expuestos en trabajos locales.

Modelo del perfil 1: Angao-Almoloya de Las Granadas.

Desde el punto de vista de la hipótesis de los terrenos tectonoestratigráficos acrecionados en el suroeste de México, el modelo geológico-geofísico del perfil 1 (Fig. 11) puede ser interpretado de la siguiente forma. El perfil (P-1) se ubica entre el terreno Guerrero y la Faja Volcánica Transmexicana (Fig. 1), ocupando esta última desde la región de Almoloya de Las Granadas hasta el final del perfil. El resto del perfil está

cubierto por rocas volcánicas ácidas de edad Terciaria, así como por algunos cuerpos intrusivos de forma regular.

El terreno Guerrero pudiera estar representado en el modelo del perfil 1 (Fig. 11) por los cuerpos de densidades 2.60 g/cm^3 , 2.50 g/cm^3 y 2.48 g/cm^3 . El primero de ellos pudieramos asociarlo a las secuencias volcánicas submarinas y sedimentarias de edad Jurásico tardío-Cretácico medio, denominada por Campa y Coney (1983) como subterreno Teloloapan-Ixtapan. Alternativamente los cuerpos de 2.50 g/cm^3 y 2.48 g/cm^3 conformarían entonces el Complejo Metamórfico Tierra Caliente (Ortega-Gutierrez, 1981), que en los mapas de INEGI (1985a) es caracterizado por afloramientos de rocas metavolcánicas de edad Jurásico superior a Cretácico inferior. Sobre el terreno Guerrero podemos diferenciar, con el cuerpo de densidad 2.32 g/cm^3 , la presencia de volcánicos y depósitos clásticos de edad Terciario que fueron depositados, según Jansma et al. (1991), posterior al emplazamiento del terreno Guerrero.

El cuerpo de 2.14 g/cm^3 (Fig. 11) coincide por su posición en el perfil con Cerros Los Lobos, pudiendo estar representado, muy esquemáticamente, a la serie de troncos dioríticos y traquíuticos de emplazamientos muy someros, que se encuentran aflorando en gran parte de esta zona de Guerrero (Cserna, 1978). Este cuerpo en nuestro modelo proviene desde los 4 km de profundidad y en superficie presenta una extensión de 5 km. Si analizamos la continuación analítica del campo a los 5 km de altura (Fig.7) se puede apreciar que la anomalía producida por este cuerpo desaparece, corroborando su naturaleza de cuerpo somero.

La Faja Volcánica Transmexicana que aflora en la región de Almoloya de Las Granadas, pudiera estar asociada al cuerpo de densidad 2.42 g/cm^3 , correspondiendo al material volcánico reciente (cenozoico superior) que cubre toda esta área. Este material corresponde a basaltos, andesitas y tobas intermedias. A mayor profundidad, bajo la faja, aparece un cuerpo de densidad 2.45 g/cm^3 , que pudiera estar caracterizando a una secuencia de tobas ácidas (riolíticas) de edad cenozoico inferior.

A los 10 km de profundidad del modelo del perfil 1 (Fig. 11) aparece una capa de 2.68 g/cm^3 interpretada como corteza intermedia, la cual puede estar constituida por rocas metamórficas de composición variada. Según Johnson et al. (1991), el basamento en la zona de San Lucas (Fig. 3) puede aparecer a partir de los 10 km de profundidad, constituido probablemente de rocas metamórficas de facies esquistos verdes, así como filitas talco/sericita, roca verde y esquistos cloríticos.

Los cuerpos más profundos de este modelo representan con densidad 2.80 g/cm^3 a la corteza inferior y con 3.20 g/cm^3 al manto superior, los cuales se ajustan bien a las

profundidades dadas por Valdés (1992) y Campillo et al. (1995) utilizando la información sísmica disponible.

El gradiente total normalizado para este perfil (Figs. 16.1, 16.2 y 16.3) no muestra evidencias que pudieran indicar la presencia de fallas profundas, a pesar de que el contacto entre los cuerpos que representan al complejo metamórfico Tierra Caliente y el resto de los cuerpos a su alrededor pudiera ser interpretado como un contacto tectónico, cuya falla no aflora en superficie.

Modelo del perfil 2: Pinedo-El potrero.

La sustentación geológica que permitió definir los cuerpos más superficiales del modelo del perfil 2 (Fig. 12) se basa en una mayor información geológica recopilada en el mapa geológico de Cabral-Cano (1994) y que abarca gran parte del perfil. Los contactos geológicos fueron llevados al modelo, así como la falla de Arcelia, que se profundiza hasta los 9 km aproximadamente.

Los cuerpos más profundos caracterizan, al igual que en el caso del modelo del perfil 1, a la corteza inferior (2.80 g/cm^3) y al manto superior (3.20 g/cm^3). En comparación con el modelo del perfil 1 (Fig. 11) estos cuerpos dejan de comportarse como capas planas para mostrar un comportamiento de capas con profundidad variable en la mayoría de su extensión, pero siempre con una tendencia a incrementar su profundidad hacia el final del perfil.

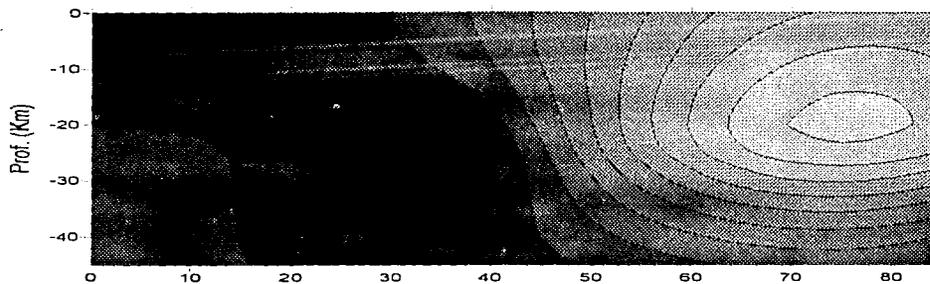
Los cuerpos que pudieran conformar el terreno Guerrero, ocupan profundidades hasta los 10 km como promedio, caracterizado por el cuerpo de densidad 2.59 g/cm^3 y el cuerpo de 2.53 g/cm^3 , representando específicamente éste último, al Complejo Metamórfico Tierra Caliente. Encima de éste, entre la región de Pinedo y las cercanías de Amates Grandes, aparecen cuerpos de densidad 2.32 g/cm^3 y 2.38 g/cm^3 que por analogía al modelo del perfil 1 (Fig. 11) estarían caracterizando a secuencias volcánicas y depósitos clásticos terciarios. Sobre el Complejo Metamórfico Tierra Caliente, alrededor de la zona de Amates Grandes (Fig. 12), aparece un cuerpo de densidad 2.54 g/cm^3 . Este cuerpo es descrito en el mapa geológico de Cabral-Cano (1994) como las secuencias de la Caliza Pochote de edad Aptiano-Cenomaniano (?), compuestas por intercalaciones de espesores de calizas negras y pizarras arcillosas, además de intercalaciones también de pizarras arcillosas y areniscas.

En la zona norte del Estado de Guerrero, en el área de Mesa Los Caballos (Fig. 3), Jansma et al. (1991) plantea la presencia de cuerpos silíceos. Uno de estos cuerpos corresponde al intrusivo Mesa Los Caballos, el cual es modelado a partir de los cuerpos

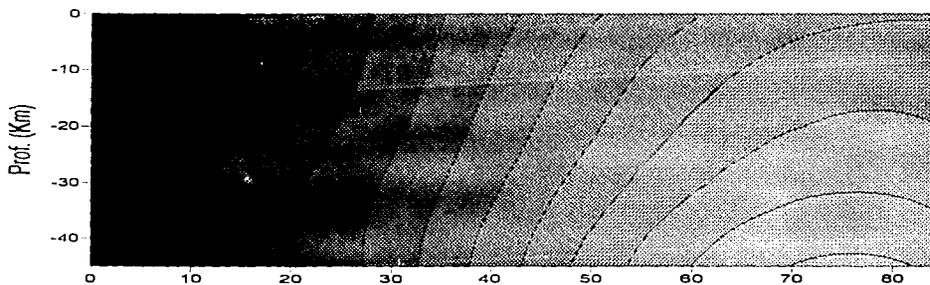
Perfil 1

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
INVESTIGACIÓN DE LA BARRIERA

armónico 15



armónico 10



armónico 5

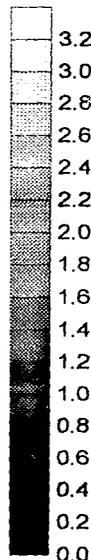
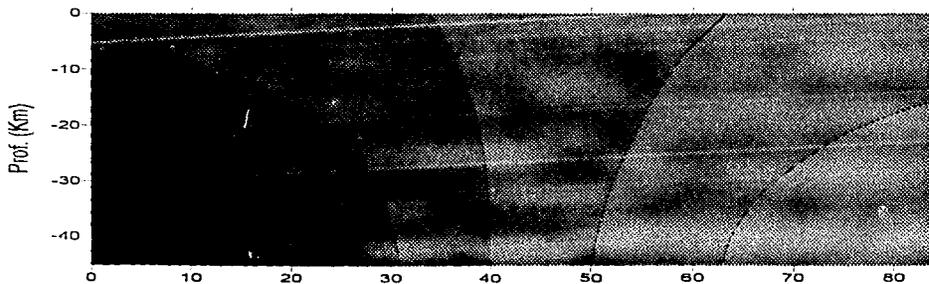
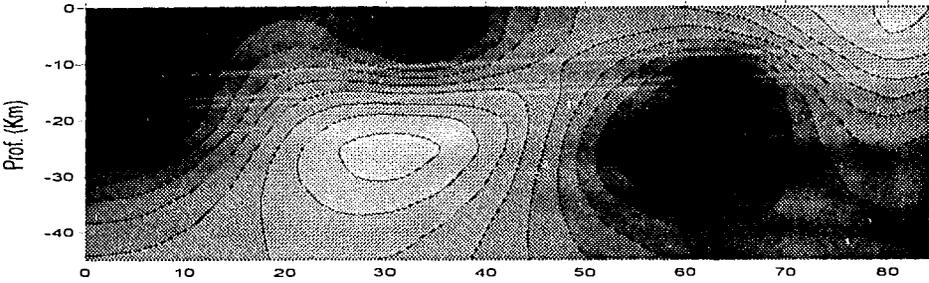


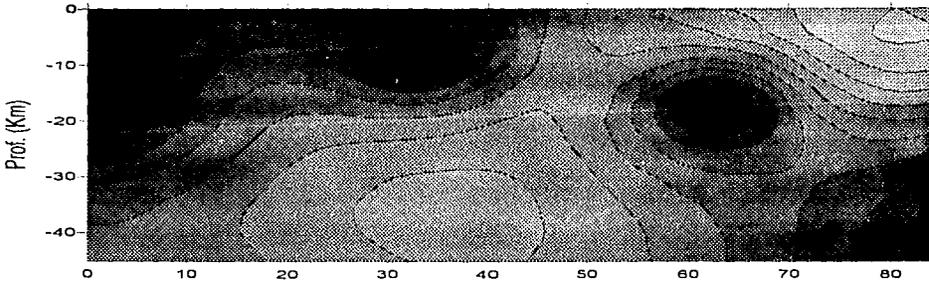
Fig. 16.1- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-1 (Angao-Almoloya de Las Granadas (Armónicos 5, 10, 15).

Perfil 1

armónico 30



armónico 25



armónico 20

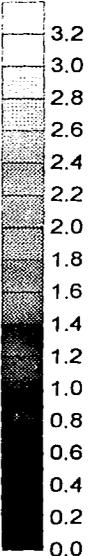
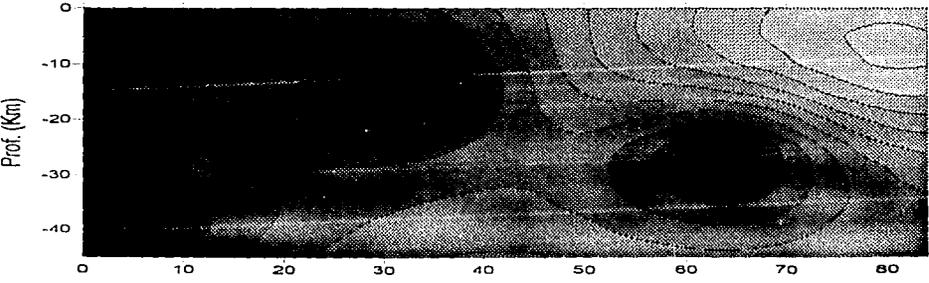


Fig. 16.2- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-I (Angao-Almoloya de Las Granadas (Armónicos 20, 25, 30).

Perfil 1

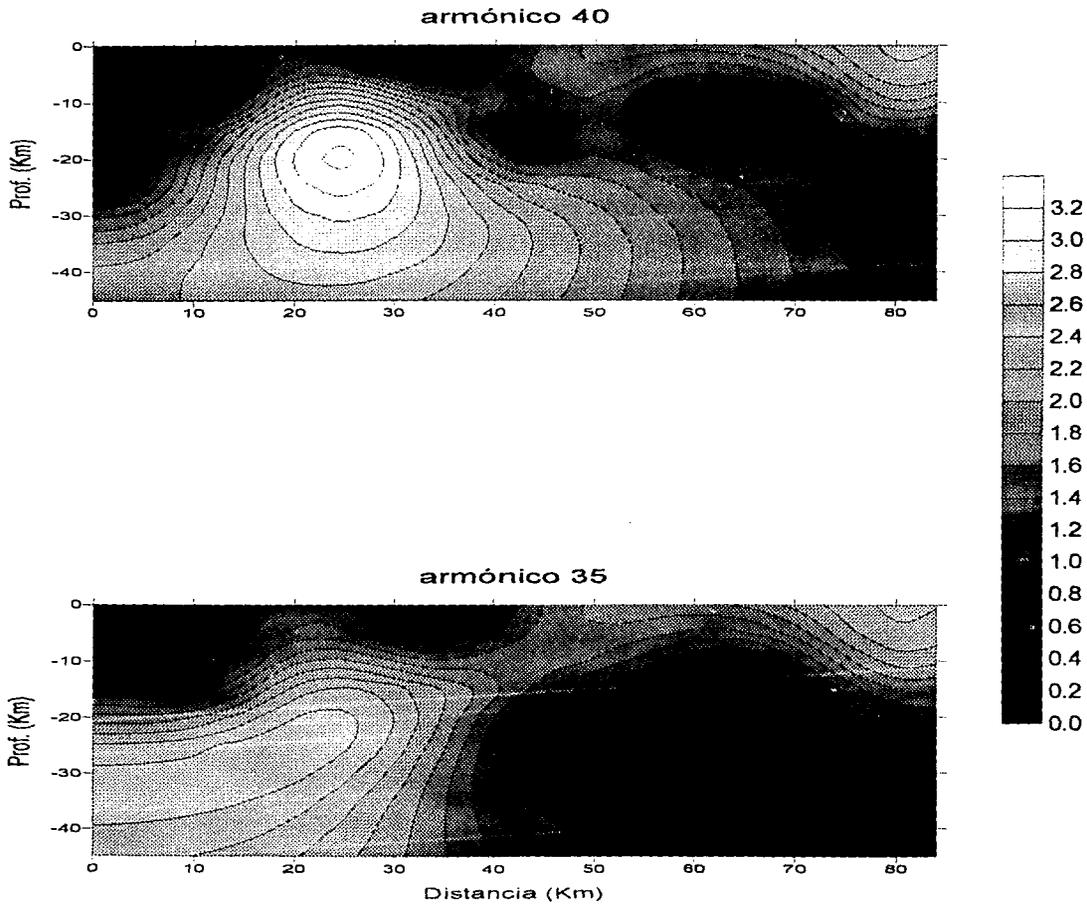


Fig. 16.3- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-1 (Angao-Almoloya de Las Granadas) (Armónicos 35 y 40).

de densidades 2.39 g/cm^3 , 2.63 g/cm^3 y 2.65 g/cm^3 , dando una característica de composición variable a dicho intrusivo (Fig. 12). Sus límites en superficie fueron extraídos del mapa geológico obtenido por Jansma et al. (1991) y su profundidad es estimada por el modelaje 2D.

En la región de El potrero (Fig. 12) aparece el cuerpo de densidad 2.55 g/cm^3 , el cual corresponde en el mapa geológico de Cabral-Cano (1994) con los límites de las calizas masivas del Cretácico medio de la Formación Morelos, la que aflora en gran porción de la zona de trabajo. Bajo estas calizas y bajo el Complejo Metamórfico Tierra Caliente aparece un cuerpo de gran extensión, representado posiblemente por una secuencia de esquistos y rocas metavolcánicas, que pudieran corresponder a la secuencia denominada por Ortega-Gutiérrez (1981) como Complejo Acatlán.

El gradiente total normalizado en este perfil (Fig. 17.1, 17.2 y 17.3) tampoco muestra evidencias de la presencia de alguna falla de grandes dimensiones, lo que indica que las fallas propuestas por INEGI, (1985a) y Cabral-Cano, (1994) son de expresiones muy someras. En algunos casos pudieramos asumirlas entre los contactos de los diferentes complejos litológicos, como es el caso del contacto que existe entre el Complejo Metamórfico Tierra Caliente y las calizas masivas, así como su límite con la secuencia del terreno Guerrero, representado con un cuerpo de densidad 2.59 g/cm^3 .

El levantamiento que presenta la corteza inferior e intermedia entre la Mesa Los Caballos y las cercanías a la región de Amates Grandes (Fig. 12) es sugerida por la continuación analítica ascendente, la cual a 5 y 10 km de altura muestra evidencias de una anomalía del campo en esta zona (Figs. 7 y 8).

Modelo del perfil 4: Cerro El Cajón-Cerro Piedra Parada.

Por las semejanzas y cercanías entre los modelos de los perfiles 1, 2 y 4 pasaremos a interpretar el modelo del perfil 4 antes que el modelo del perfil 3.

La información geológica de base empleada en este modelo fué el mapa geológico a escala 1:250 000 publicado por INEGI (1985a). De aquí se extrajeron los contactos de los diferentes cuerpos litológicos presentes y se empleó una analogía con los modelos anteriormente analizados. De esto surgió el modelo del perfil 4 (Fig. 14), el cual presenta una menor complejidad geométrica que el modelo del perfil 2 (Fig. 12) pero a su vez expone características muy parecidas a éste.

El manto superior, representado igualmente por el cuerpo de densidad 3.20 g/cm^3 , se comporta como una capa plana que aumenta su profundidad hacia la región de Cerro Piedra Parada. La corteza inferior e intermedia de densidad 2.80 g/cm^3 y 2.68 g/cm^3

Perfil 2

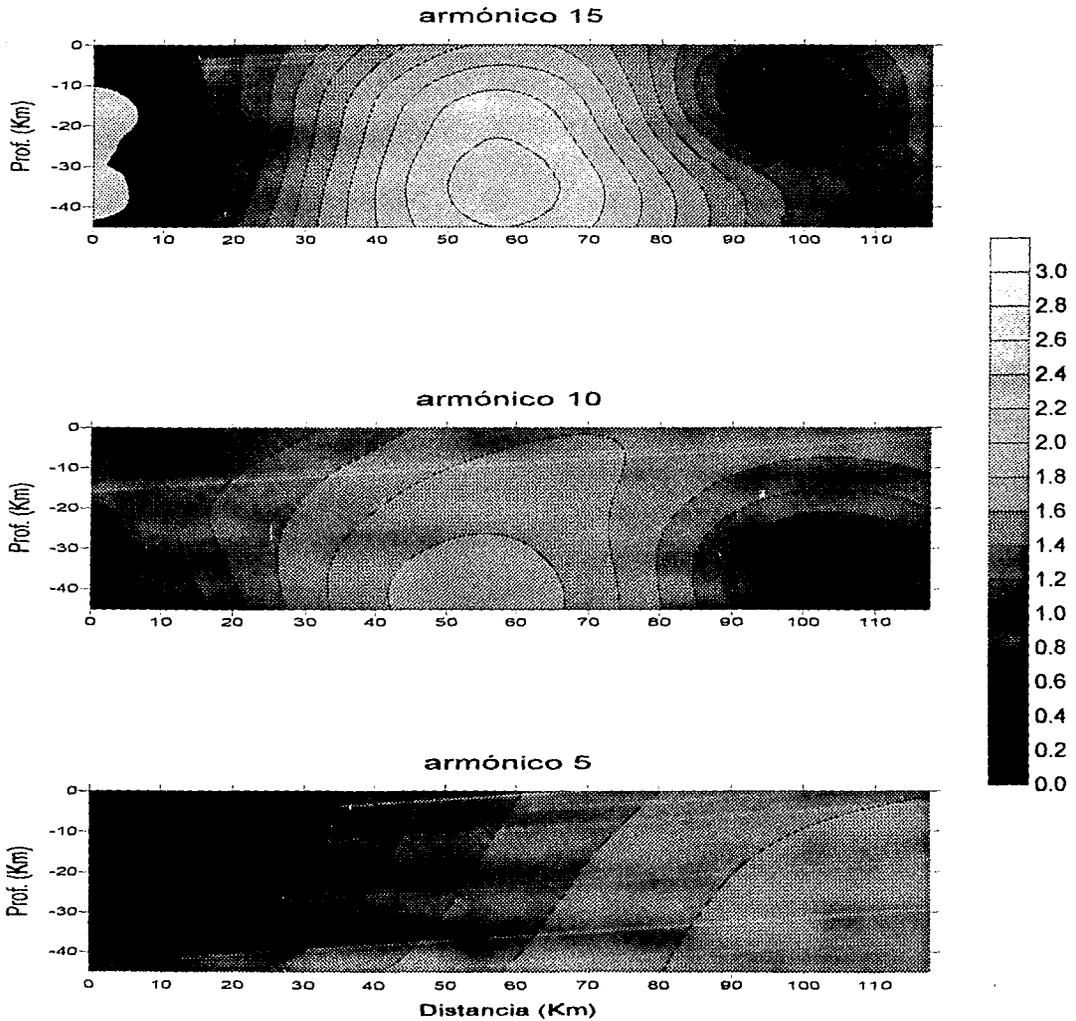


Fig. 17.1- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-2 (Pinedo - El Potrero). Armónicos 5, 10, 15.

Perfil 2

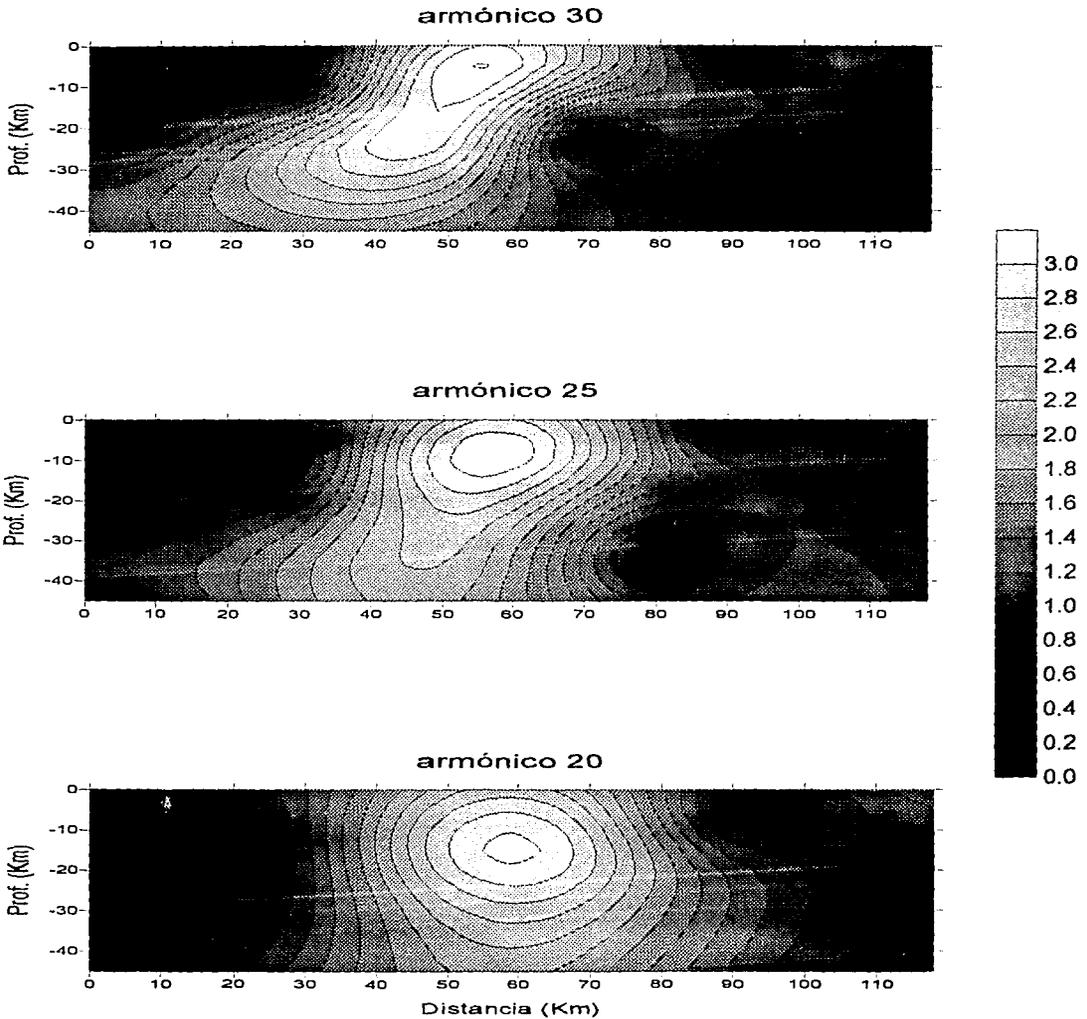


Fig. 17.2- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-2 (Pinedo y El Potrero). Armónicos 20, 25, 30.

Perfil 2

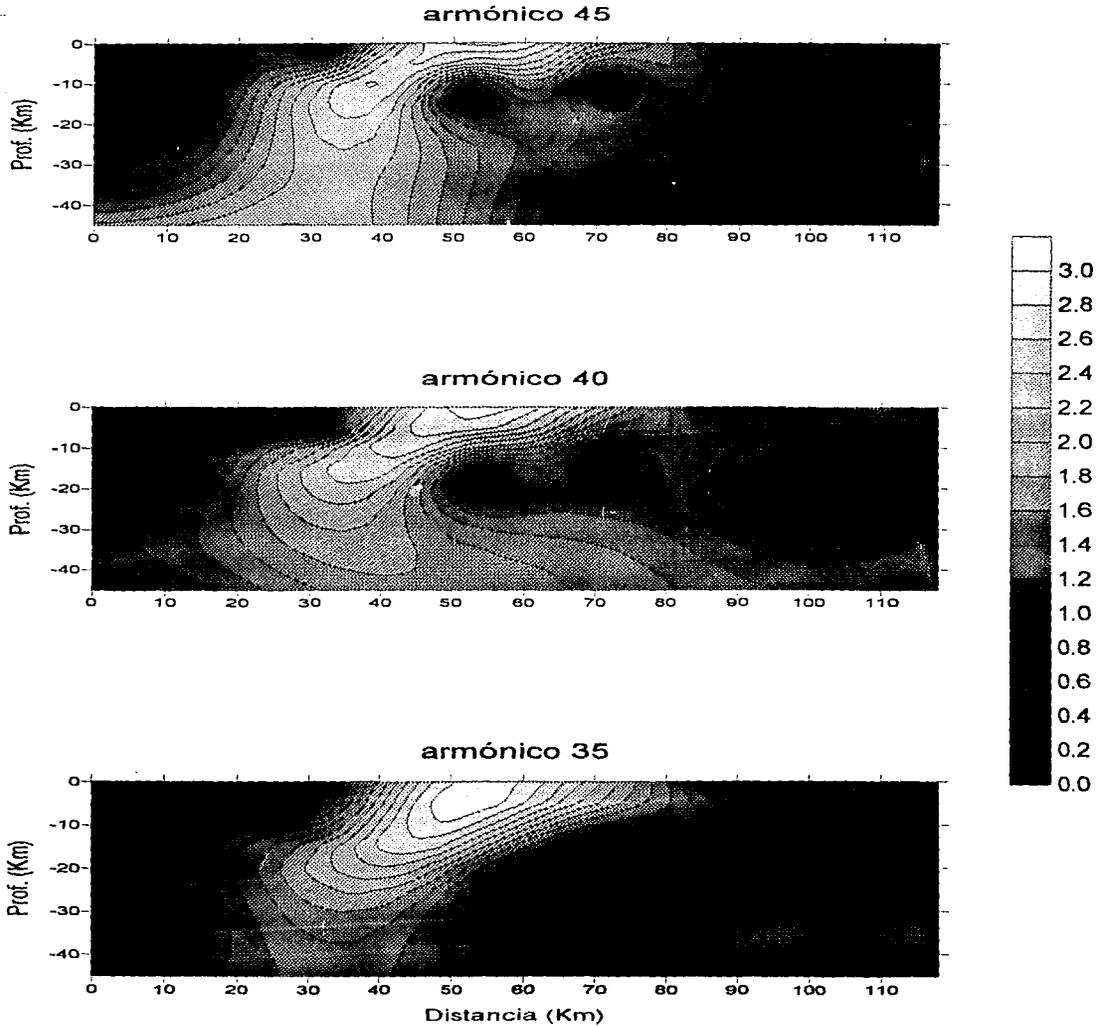


Fig. 17.3- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-2 (Pinedo y El Potrero). Armónicos 35, 40 y 45.

respectivamente tienen un comportamiento irregular, levantándose entre la región Cerro El Cajón-Palmar Grande y profundizándose posteriormente hacia la zona entre Palmar Grande-Cerro Piedra Parada, con ciertos cambios de profundidades. El posible terreno Guerrero sigue siendo caracterizado por un cuerpo de densidad 2.60 g/cm^3 y por el Complejo Metamórfico Tierra Caliente, representado por una capa de 2.51 g/cm^3 que ocupa gran extensión en el modelo y por supuesto en el mapa geológico de INEGI, (1985a), donde es descrito como rocas metavolcánicas y metasedimentarias. El perfil 4 pasa por un gran cuerpo volcánico específicamente de tobas ácidas, el cual en el modelo del perfil 4 (Fig. 14) aparece yaciendo encima del complejo metamórfico con densidad de 2.30 g/cm^3 (se ubica pasando la región de Sierra La Goleta). Sobreyaciendo al terreno Guerrero, entre Cerro El Cajón y Palmar Grande), encontramos nuevamente el cuerpo de secuencias volcánicas y depósitos clásticos terciarios, con densidad 2.32 g/cm^3 .

En las figuras (18.1), (18.2) y (18.3) aparece el resultado obtenido del gradiente total normalizado para este perfil 4, en el que se revela una falla alrededor del kilómetro 60 sobre el perfil (corresponde a la región de Sierra La Goleta, Fig. 14) que se profundiza hasta los 22 Km aproximadamente. Esta falla es deducida del máximo que se repite desde el armónico 15 (Fig. 18.1) al armónico 30 (Fig. 18.2), según los criterios de interpretación del método (vea el capítulo III.3.3).

Modelo del perfil 3: Villa Guerrero-Cerro Colorado.

El modelo del perfil 3 (Fig. 13) representa como en los anteriores al manto superior, la corteza inferior e intermedia con cuerpos de densidades 3.20 g/cm^3 , 2.80 g/cm^3 y 2.68 g/cm^3 respectivamente.

Este modelo abarca según la figura 1, el terreno Mixteca y la Faja Volcánica Transmexicana, los cuales están representados por los cuerpos superficiales cuyos contactos fueron extraídos del mapa geológico de INEGI, (1985a).

El cuerpo 2.30 g/cm^3 que aflora desde Villa Guerrero hasta pasando Cocoyotla (Fig. 13), pudiera estar representando a las secuencias denominadas en el mapa geológico de INEGI (1985a) como asociaciones, las que corresponden a las litologías de la Plataforma Guerrero-Morelos. Estas litologías son: brechas sedimentarias, areniscas, conglomerados, etc.

La Faja Volcánica Transmexicana es interpretada en el modelo del perfil 3 (Fig. 13) por el cuerpo de densidad 2.42 g/cm^3 (ubicado entre aproximadamente 10 km pasando Cocoyotla hasta Pueblo Viejo) representando a la secuencia de volcánicos (de edad

Perfil 4

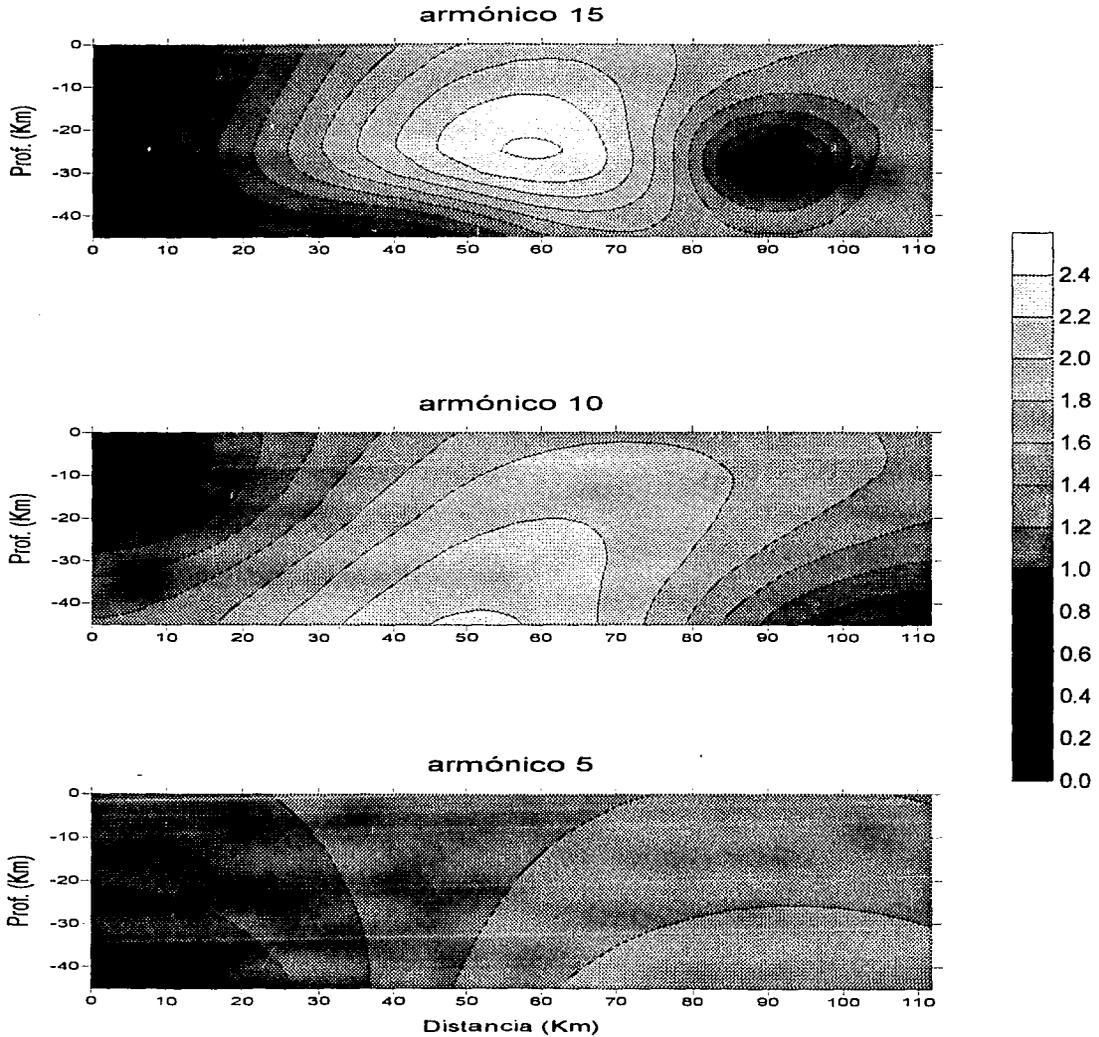


Fig. 18.1- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-4 (Cerro El Cajón-Cerro Piedra Parada). Armónicos 5, 10, 15.

Perfil 4

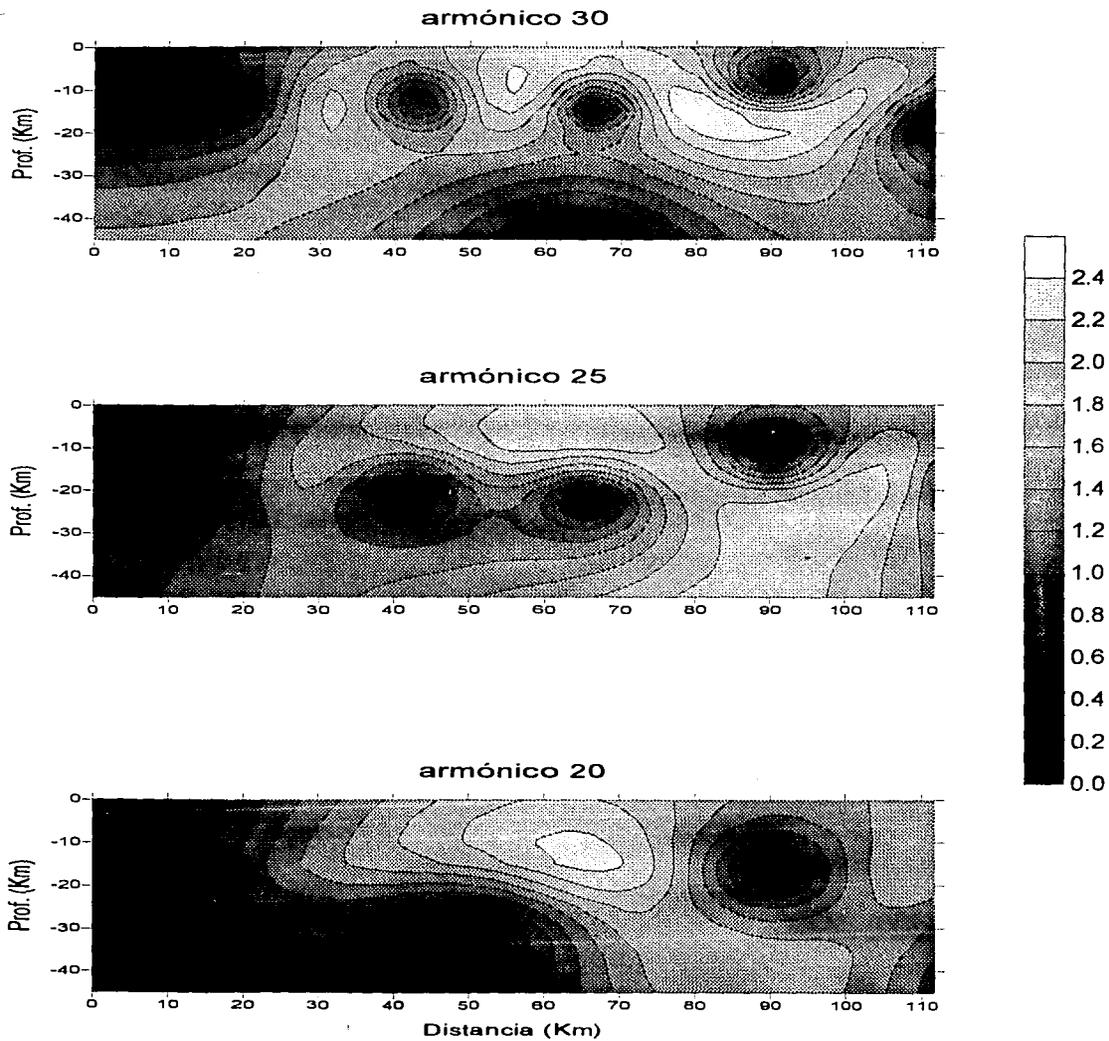


Fig. 18.2- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-4 (Cerro El Cajón-Cerro Piedra Parada). Armónicos 20, 25 y 30.

Perfil 4

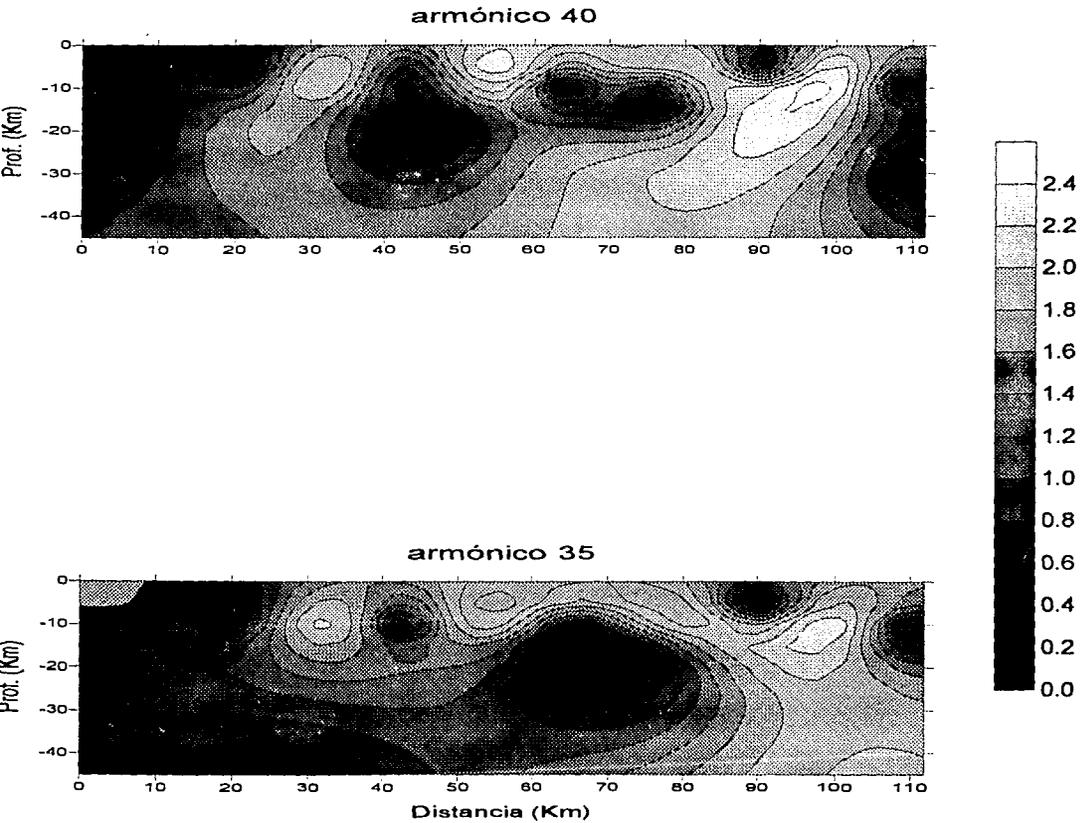


Fig. 18.3- Resultados del Gradiente Total Normalizado para el perfil P-4 (Cerro El Cajón-Cerro Piedra Parada). Armónicos 35 y 40.

cenozoico superior). Esta secuencia está constituida por basaltos, andesitas y tobas intermedias.

Similar al modelo del perfil 1 (Fig. 11), debajo de la Faja Volcánica Transmexicana aparece un cuerpo de 2.45 g/cm^3 , que pudiera estar caracterizando a una secuencia de tobas ácidas (riolíticas) de edad cenozoico inferior. En el modelo del perfil 3 (Fig. 13) este cuerpo de tobas ácidas subyace también a la posible Plataforma Guerrero Morelos.

En contacto posiblemente tectónico, (según el modelo a la altura de la región de Pueblo Viejo), con la Faja Volcánica, aparece representado el terreno Mixteca por los cuerpos de densidades 2.48 g/cm^3 (Complejo Acatlán), sobreyacido por las calizas masivas de la Formación Morelos de densidad 2.67 g/cm^3 . Aflorando en ésta región (Pueblo Viejo-Cerro Colorado) se encuentra un cuerpo volcánico conformado por andesitas y tobas intermedias (INEGI, 1985a) representado por la capa de 1.5 km de espesor promedio y densidad 2.45 g/cm^3 .

En este caso el límite propuesto por Campa y Coney (1983) entre la Faja Volcánica Transmexicana y el terreno Mixteca no apoya los resultados obtenidos en este trabajo. Una situación similar ocurre en el modelo del perfil 2, lo cual es analizado por Cabral-Cano (1994), planteando que este problema se debe a la falta de una cartografía detallada en la zona.

Según los resultados e interpretación presentados en este trabajo podemos analizar algunos aspectos generales de los resultados. En primer lugar los modelos, así como las técnicas del gradiente total normalizado y la CAA nos muestran que la naturaleza de la anomalía gravimétrica gradiente (Zona A) (Fig. 6), que atraviesa casi toda la zona de Norte a Sur, es el resultado de la superposición de diferentes características geométricas. Es decir, en las profundidades de ésta Zona A existe una superposición de factores estructurales o de configuración de la corteza terrestre. Estos factores se exponen en el modelo del perfil 1 (Fig. 11), al conjugarse el contacto tectónico que separa al complejo metamórfico Tierra Caliente (2.48 g/cm^3 y 2.50 g/cm^3) y el terreno Guerrero (2.60 g/cm^3), con el incremento del espesor cortical hacia la zona de Almoloya de Las Granadas. En el modelo 2 (Fig. 12) este efecto de la Zona A se debe a la conjunción de la falla Arcelia y la falla presente en el contacto entre el complejo metamórfico (2.53 g/cm^3) y el terreno Guerrero (2.59 g/cm^3). Además a esto se une el levantamiento que sufren tanto la corteza inferior como la corteza intermedia en la región comprendida entre Mesa Los Caballos y Amates Grandes. La diferencia en el espesor cortical es menos marcada que en el modelo del perfil 1 (Fig. 11), pero también está presente en esta anomalía. El efecto gravimétrico de la Zona A en el perfil 4 (Fig. 14) está modelado por una falla de 6 a 7 km de profundidad, entre el Complejo Metamórfico Tierra Caliente (2.51 g/cm^3) y el terreno

Guerrero (2.60 g/cm^3). Este efecto se conjuga con el contacto litológico que se produce entre el Complejo Acatlán (2.48 g/cm^3) - terreno Guerrero (2.60 g/cm^3) y Complejo Acatlán - Corteza intermedia (2.68 g/cm^3). Estos contactos son debidos fundamentalmente a la elevación de la corteza intermedia e inferior, entre la región de Cerro El Cajón-Palmar Grande (Fig. 14). La diferencia en el espesor de la corteza inferior es un aspecto que juega un papel importante en dicho efecto.

El anterior análisis está respaldado en el comportamiento del efecto gravimétrico durante la continuación ascendente, en el que se puede observar que este gradiente (Zona A) persiste hasta alturas de continuación de 20 km (Fig. 10), pero ya con una menor intensidad. El gradiente total normalizado (Figs. de la 16.1 a la 18.3) enfatiza que esta anomalía de la Zona A no es producida por una falla que pudiera alcanzar grandes profundidades, dado que en ningún perfil se presentan evidencias (cadenas de mínimos de GTN o máximos de GTN que se repitan en varios armónicos) que pudieran ubicar una estructura tectónica de estas características en la zona anómala.

Las densidades de la corteza inferior e intermedia en los modelos gravimétricos obtenidos del área de Tierra Caliente y regiones colindantes, sugieren un modelo de corteza continental. Un estudio sobre la corteza continental inferior (Smithson y Brown, 1977) plantea que las consideraciones y observaciones geológicas generales, indican que la corteza inferior está compuesta de granulitas y en menor cantidad de rocas ígneas. Las granulitas posteriormente son mivilizadas a la corteza media donde pasan a ser migmatitas. La información geofísica recopilada por (Smithson y Brown, 1977), los llevó a concluir que la corteza inferior es heterogénea. Esta heterogeneidad manifestada principalmente en las reflexiones sísmicas son producidas por plegamientos isoclinal, abruptos cambios en el buzamiento, cambios en los espesores de las capas, e intrusiones ígneas, todas, características de los terrenos metamórficos. Concluyen también que la corteza inferior debe ser menos máfica (y menos densa) que el gabro, con un rango entre $2.8\text{-}2.9 \text{ g/cm}^3$.

Urrutia-Fucugauchi y Molina (1992) interpretaron según modelación gravimétrica de la corteza en el terreno Guerrero (Graben de Colima y Sierra Madre Occidental), que sus resultados sugieren una corteza de carácter continental o transicional, con espesores de corteza inferior de naturaleza metamórfica y/o ígneas (granulitas e intrusiones gabroicas).

V- Conclusiones.

- 1- Considero que los resultados obtenidos se ajustan al criterio de la presencia en el área de Tierra Caliente y sus alrededores, de varios complejos litológicos con características geológicas y petrofísicas diferentes. Además la interpretación realizada en éste trabajo, nos permite reafirmar la imprecisión existente en los límites de los terrenos propuestos por Campa y Coney (1983) (Fig. 1), como es considerado por Cabral-Cano (1994).
- 2- El procesamiento realizado con el Gradiente Total Normalizado, la Continuación Analítica Ascendente y el modelado bidimensional ha permitido concluir que la anomalía gradiente (Zona A) (Fig. 6) no es producida por una falla que se profundiza bajo ésta región. Este gradiente es producido por la superposición de varios efectos geométricos y estructurales, que se conjuntan bajo la región anómala. Estos son: diferencia en el espesor de la corteza entre ambos lados de la zona anómala (Zona A); presencia de fallas de poca profundidad; contactos litológicos entre secuencias con densidades contrastantes; elevaciones de las capas más profundas de la corteza (corteza inferior e intermedia).
- 3- Los modelos obtenidos de la región de Tierra Caliente y áreas colindantes, pudieran corresponder a una secuencia de carácter continental estructurada de la siguiente forma. Corteza superior compuesta por rocas sedimentarias, volcánicas y metamórficas, intrusionadas en algunas zonas (modelo del perfil 2) por rocas ígneas. Corteza intermedia compuesta por migmatitas con una densidad promedio de 2.68 g/cm^3 . Finalmente una corteza inferior con densidad promedio de 2.80 g/cm^3 , caracterizada por rocas metamórficas de facie granulítica y por intrusiones gabroicas.

VI- Bibliografía

- Arzate, J.A., M. Mareschal, & J.Urrutia, 1993. A preliminary crustal model of the Oaxaca continental margin and subduction zone from magnetotelluric and gravity measurements. *Geof. Int.*, vol. 32-3, p. 441-452.
- Bandy, W.L., 1991. TERRAIND: Program to calculate the terrain correction for gravity measurements. [inédito].
- Berioszkin, V.M., 1973. Utilización de la gravimetría para la búsqueda de yacimientos de petróleo y gas. Ed. Nauka, Moscú, p.264.
- Campa, M.F., M. Campos, R. Flores y R. Oviedo., 1974. La secuencia mesozoica volcánica sedimentaria metamorfizada de Ixtapan de la Sal, Mex-Teloloapan, Gro. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 35, p. 7-28.
- Campa, M.F. & P.J. Coney, 1983. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Jour. Earth Science*, vol. 20, p.1040-1051.
- Cabral-Cano, E., 1994. Tectonoestratigraphic assessment of the Tierra Caliente metamorphic complex, Mexico. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science University of Miami, tesis doctoral.
- Campillo, M., S.K. Singh, N. Shapiro, J. Pacheco & R.B. Herrmann, 1995. Crustal structure south of the Mexican volcanic belt, based on group velocity dispersion. *Geof. Int.*, en prensa.
- Cserna, Z. de, 1978. Notas sobre la geología de la región comprendida entre Iguala, Ciudad Altamirano y temascaltepec, estados de Guerrero y México. Sociedad Geológica Mexicana, IV Convención Geológica Nacional, México, D.F., Libro-Guia de la excursión geológica a Tierra Caliente, estados Guerrero y México, Rodolfo del Arenal (ed.), p. 1-25.
- Cuevas, J.L., R. Alvarez, F. García et al., 1992. Investigaciones geofísicas regionales complejas para el estudio de la constitución profunda de la corteza terrestre en la región central de Cuba. [Inédito], *Inf. Cient.-Téc.*, Inst. Geof. y Astron., Acad. Cien. de Cuba, La Habana, p. 114.
- Cuevas, J.L, F. García, M. Pacheco, D. González, R. Ramírez, 1995. Determinación de estructuras tectónicas disyuntivas utilizando técnicas del procesamiento de imágenes y del gradiente total normalizado a partir de datos gravimétricos de Cuba central. *Geof. Int.*, vol.34-1, p. 93.
- Díaz-Duque, J., R. Fernandez de Lara, I. de la Vega et al., 1990. Trabajos por el método del gradiente total normalizado [en ruso]. En investigación Sísmica en la región de emplazamiento del Centro de Investigaciones Nucleares [inédito], *Inf.Cient. Téc.*, Secret. Asun. Nucl., La Habana, p. 225-232.

- Elieseva, I.S., V.S. Voljonin y Z.N. Sobolev, 1986. Estudio de la constitución geológica profunda de la corteza terrestre de la sineclisa de Tunguska, por el método del gradiente total normalizado [en ruso]. *Razvedochnaya Geofizika*, V. 103, Ed. Nedra, Moscú, p. 98-103.
- Febles, D., 1983. Constitución profunda y perspectivas de yacimientos cromíticos en rocas ultrabásicas por datos geofísicos en Camagüey, Cuba [en ruso], [inédito], Tesis de Doctorado, Leningrado, 147pp.
- Fundora, M. y M. Pacheco, 1991. Utilización del gradiente total normalizado en la evaluación tectónico estructural en perfiles sismogravimétricos de Cuba oriental. En II Encuentro Nacional de Ingenieros Geofísicos, La Habana, 14-15 Mayo, ISPJAE, Resúmenes, 1.
- Howell, D.G., D.L.Jones, & E.R. Schermer, 1985. Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region, in D.G. Howell, ed., *Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region: Circum-Pacific Council of Energy and Mineral Resources, Earth Science Series*, vol. 1, p. 3-30.
- INEGI, 1985a. Carta geológica, hojas Cuernavaca y Cd. Altamirano, serie 1:250000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F., México.
-, 1985b. Carta topográfica, hojas Cuernavaca y Cd. Altamirano, serie 1:250000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D.F., México.
- Jansma, P.E., H.R. Lang & C.A. Johnson, 1991. Preliminary investigation of the Tertiary Balsas Group, Mesa Los Caballos area, northern Guerrero State, Mexico using Landsat Thematic Mapper Data. *The Mountain Geologist*, vol. 28, No. 2/3, p. 137-150.
- Johnson, C.A., H.R. Lang, E. Cabral, C.G.C. Harrison, & J.A. Barrios, 1991. Preliminary assessment of stratigraphy and structure, San Lucas Region, Michoacan and Guerrero States, SW Mexico. *The Mountain Geologist*, vol. 28, No. 2/3, p. 121-135.
- Mammerickx, J. & K. Klitgord, 1982. Northern East Pacific Rise: Evolution from 25 m.y.B.P. to the present. *J. Geophys. Res.*, vol. 87, p. 6751-6759.
- Molina-Garza & J. Urrutia, 1993. Deep crustal structure of central Mexico derived from interpretation of Bouguer gravity anomaly data. *J. Geodynamics*, vol. 17. p. 181-201.
- Morán-Zenteno, D.J., 1984. *Geología de la República Mexicana*. Secretaría de programación y presupuesto del INEGI; Universidad Nacional Autónoma de México, segunda edición, 88pp.
- Nagy, D., 1966. The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophys.*, vol. 31, p. 362-371.

- Ortega-Gutierrez F., 1981. Metamorphic belts of southern Mexico and their tectonic significance. *Geof. Int.*, vol. 20-3, p. 177-202.
- Pardo, M.H., 1993. Características sismotectónicas de la subducción de las placas de Rivera y Cocos en el sur de México. Universidad Autónoma de México, tesis doctoral, 129pp.
- Rivera, J., L. Ponce, 1986. Estructura de la corteza al oriente de la Sierra Madre Occidental, México, basada en la velocidad de grupo de las ondas de Rayleigh. *Geof. Int.*, vol. 25-3, p. 383-402.
- Sedlock, R., F. Ortega & R. Speed, 1993. Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. *Geof. Soc. Am., Special Paper 278*, 153pp.
- Smithson, S.B. & S.K. Brown, 1977. A model for lower continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 35, pp. 134-144.
- Talwani, M., J. Lamar & M. Landisman, 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with applications to the Mendocino submarine fracture zone. *J. of Geophys. Res.*, vol 64, No.1, p. 49.
- Talwani, M. & Ewing, M., 1960. Rapid computation of gravitational attraction of three dimensional bodies. *Geophys.*, vol. 25, p. 203-225.
- Tolson, G., 1993. Structural geology and tectonic evolution of the Santa Rosa area, SW Mexico State, Mexico. *Geof. Int.*, vol. 32, num. 3, p. 397-413.
- Urrutia-Fucuguchi, J. & R.S. Molina, 1992. Gravity modelling of regional crustal and upper mantle structure of the Guerrero terrane-1. Colima Graben and southern Sierra Madre Occidental, western Mexico. *Geof. Int.*, vol. 31, num. 4, p. 493-507.
- Urrutia-Fucugauchi J., S. Lozano, B. Ortega, M. Caballero, R. Hansen, H. Bohnel & J.F.W. Negendank, 1994. Paleomagnetic and paleoenvironmental studies in the southern basin of Mexico-I. Volcanosedimentary sequence and basin structure of Chalco Lake. *Geof. Int.*, vol. 33, num. 3, p. 421-430.
- Valdés, C.M., W.D. Mooney, S.K. Singh, R.P. Meyer, C. Lomnitz, J.H. Luetgert, B.T. Hellsley, B.T.R. Lewis and M. Mena, 1986. Crustal structure of Oaxaca, Mexico from seismic refraction measurements. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 76, p. 547-564.
- Valdés, C.M., 1992. Seismic structure between the Pacific coast and Mexico City, from the Petatlan Earthquake ($M_s=7.6$) aftershocks, and the aftershocks relation to adjacent seismic zones. Tesis doctoral, University of Wisconsin-Madison, 210pp, [Inedito].