

FACULTAD DE INGENIERIA

---

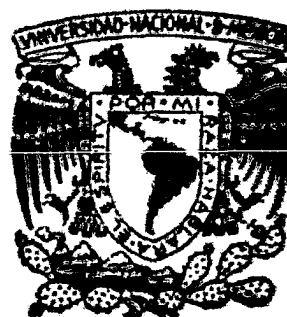
**INTRODUCCION AL METODO GRAVIMETRICO  
DE EXPLORACION**

**TESIS PROFESIONAL**

**INGENIERO GEOFISICO**

**ALFREDO DE LUNA GUZMAN**

---



**MEXICO, D. F. 1983**

**UNAM**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA

FACULTAD DE INGENIERIA  
Dirección  
60-I-137

Señor ALFREDO DE LUNA GUZMAN.  
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Prof. Ing. - Francisco A. Arroyo Carrasco, para que lo desarrolle como tesis para su Examen Profesional de la carrera de INGENIERO GEOFISICO.

"INTRODUCCION AL METODO GRAVIMETRICO DE EXPLORACION"

- PROLOGO.
- RESUMEN.
- I PROSPECCION MEDIANTE EL METODO GRAVIMETRICO.
- II CARACTERISTICAS GENERALES DEL GRAVIMETRO DE PROSPECCION.
- III PROCEDIMIENTOS DE OPERACION EN CAMPO.
- IV CONTROL GRAFICO DE LA CALIDAD Y AVANCE DEL LEVANTAMIENTO.
- V CORRECCIONES GRAVIMETRICAS.
- VI ANOMALIAS DE BOUGUER REGIONAL Y RESIDUAL. COMENTARIOS. BIBLIOGRAFIA.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar -- Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como -- requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así -- como de la disposición de la Coordinación de la Administración -- Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los -- ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F., 25 de noviembre de 1982.

EL DIRECTOR

Ing. Javier Jiménez Esprigú.

JJE'MRV'gtg

A MIS PADRES:

Alfredo de Luna Elizondo  
Aida Guzmán de de Luna  
Por su cariño y paciencia.

A MIS HERMANOS:

Lupita  
Eduardo  
Gerardo  
Alejandro  
Javier  
Por su apoyo y confianza

A MI MADRE:

Por el gran cariño y el desinteresado apoyo  
que siempre me ha brindado.

A MI ESPOSA:

Por el amor y ternura que impulsa mis acciones  
y da fuerza a mis pensamientos.

*Alfredo.*

## AGRADECIMIENTOS

Con una promesa de continuidad en la superación profesional, al M.enC. Osvaldo Sánchez Zamora, tanto por la sugerencia\_ y dirección del tema, como por el ejemplo humano y profesio\_ nal que me supo tansmitir.

Por las valiosas discusiones técnicas y sus siempre oportunos comentarios, al Ing. Roboam León Sánchez, al Ing Enrique del Valle Toledo, al Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carras\_ co, del Departamento de Geofísica de la División de Cien--- cias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería en la Univer- sidad Nacional Autónoma de México.

Con la más distinguida de mis consideraciones al Ing.Manuel Morales Reyna y al M.enC. Rodolfo Marines Campos, ambos de la Subdirección de Tecnología de Exploración del Instituto Mexicano del Petróleo, por sus valiosos consejos y desinte- resada ayuda.

Al personal de la División de Aplicaciones Petróleras de la Gerencia de Computación Electrónica del Instituto Mexicano\_ del Petróleo.

Por las facilidades otorgadas y el tiempo concedido en la \_ elaboración de esta tesis al M.enC. Rolando Ramos Ruiz de \_ la Gerencia de Computación Electrónica del Instituto Mexi-- cano del Petróleo.

Por el comentario oportuno, pletórico de crítica construc- tiva al M.enC. David A. Osorno Góngora de la Gerencia de - Computación Electrónica del Instituto Mexicano del Petróleo.

Por su altísimo sentido de responsabilidad y profesionalis- mo en la impecable realización de la versión definitiva de \_ este trabajo, Mi Madre.

INTRODUCCION AL METODO  
GRAVIMETRICO  
DE EXPLORACION

## I N D I C E

|   | Pag. |
|---|------|
| PROLOGO   | 1    |
| RESUMEN   | 3    |
| I. PROSPECCION MEDIANTE EL METODO GRAVIMETRICO  | 4    |
| 1. Esquema general  | 4    |
| 1.1 Control topográfico   | 4    |
| 1.2 Control gravimétrico  | 5    |
| 2. Aspectos importantes de un levantamiento gravimétrico                                      | 6    |
| 2.1 Principales características a <u>consi</u> derar en el área de estudio                    | 6    |
| 2.2 Aspectos importantes del levantamiento topográfico previo a un levantamiento gravimétrico | 7    |
| 2.3 Criterios para fijar distancias entre estaciones  | 8    |
| 2.4 Diferentes tipos de retículas y su uso  | 9    |
| II. CARACTERISTICAS GENERALES DEL GRAVIMETRO DE PROSPECCION                                   | 11   |
| 1. Descripción y funcionamiento de los controles del gravímetro                               | 11   |
| 1.1 Dial o disco de lectura   | 12   |
| 1.2 Sistema de iluminación  | 12   |
| 1.3 Sistema de nivelación   | 13   |
| 2. Pruebas instrumentales del gravímetro -- antes de ser usado en campo                       | 13   |
| 2.1 Verificación del sistema de nivelación  | 13   |
| 2.2 Verificación del grado de <u>sensibili</u> dad  | 14   |
| 3. Rescalamiento  | 14   |
| 4. Deriva del gravímetro  | 17   |
| 5. Fallas más comunes y forma de resolverlas en campo   | 17   |



|  | Pág. |
|--|------|
| III. PROCEDIMIENTOS DE OPERACION EN CAMPO                      | 20   |
| 1. Rutina de observación                                       | 20   |
| 1.1 Nivelación   | 20   |
| 1.2 Procedimiento de lectura                                   | 21   |
| 2. Métodos de observación y establecimiento de estaciones base | 21   |
| 2.1 Esquemmatización de los principales métodos de observación | 23   |
| IV. CONTROL GRAFICO DE LA CALIDAD Y AVANCE DEL LEVANTAMIENTO   | 32   |
| 1. Cálculo gráfico de la deriva y de los valores base          | 32   |
| 1.1 Drift en forma de pino                                     | 32   |
| 1.2 Drift en forma de escalera                                 | 36   |
| 2. Planos de avance diario                                     | 38   |
| 2.1 Compensación de polígonos                                  | 39   |
| V. CORRECCIONES GRAVIMETRICAS                                  | 44   |
| 1. Correcciones instrumentales                                 | 44   |
| 2. Correcciones no instrumentales                              | 46   |
| 2.1 Correcciones no isostáticas                                | 46   |
| 2.1.1 Corrección de aire libre                                 | 46   |
| 2.1.2 Corrección de Bouguer                                    | 47   |
| 2.1.3 Corrección por latitud                                   | 49   |
| 2.1.4 Corrección topográfica                                   | 51   |
| 2.2 Correcciones isostáticas                                   | 56   |
| 2.2.1 Modelo de Pratt-Hayford                                  | 57   |
| 2.2.2 Modelo de Airy-Heiskanen                                 | 59   |
| 2.2.3 Discusión  | 60   |
| 3. Cálculo de la densidad de corrección                        | 63   |
| 3.1 Método de Nettleton  | 65   |
| 3.2 Método de mínimos cuadrados                                | 68   |
| 3.2.1 Algunas definiciones                                     | 68   |

|   | Pág. |
|---|------|
| 3.2.2 Aproximación mediante mínimos cuadrados         | 69   |
| 3.2.3 Cálculo de los incrementos de altura y gravedad | 77   |
| VI. ANOMALIAS DE BOUGUER REGIONAL Y RESIDUAL          | 79   |
| 1. Definiciones                                       | 79   |
| 2. Métodos de separación                              | 81   |
| 2.1 Métodos gráficos                                  | 82   |
| 2.2 Métodos analíticos                                | 83   |
| 3. Discusión  | 84   |
| COMENTARIOS   | 88   |
| BIBLIOGRAFIA  | 89   |

## PROLOGO

En los últimos años ha sido cada vez más importante para los países en desarrollo, la exploración y cuantificación de sus recursos naturales. Dicha exploración había sido realizada, hasta hace algunos años, con métodos geológicos que sólo tomaban en cuenta condiciones o características de la superficie de la corteza, debido a que las necesidades de explotación no eran tan apremiantes como lo son ahora.

El incremento acelerado de las industrias ha repercutido, en forma directa, en los métodos de exploración, debido a que las necesidades de recursos naturales, tales como uranio, carbón, petróleo, agua, etc., son cada día mayores. Grandes áreas han tenido que ser exploradas nuevamente, aplicando métodos cada vez más científicos y de mayor precisión para localizar a grandes profundidades dichos recursos.

Los métodos empleados son definidos como métodos indirectos, debido a que emplean los cambios en las propiedades físicas y químicas de las estructuras rocosas que son medibles en la superficie mediante algún método; tales propiedades son susceptibilidad magnética, radioactividad, conductividad eléctrica, densidad, etc.

Debido a lo anterior, la aplicación y principalmente, la interpretación de los resultados obtenidos del uso de estos métodos en la exploración, estará a cargo del ingeniero geofísico, mismo que en los últimos años ha tenido un papel importante en la localización eficiente de nuestros recursos naturales.

En la práctica profesional, la exploración conjuga una gran variedad de actividades en las que se requiere administrar tanto instrumentos de medición de alta preci

sión, como recursos humanos.

Es por tanto, de gran importancia, antes de empezar propiamente los trabajos de exploración, tener como punto de partida, un planteamiento o esquema general de las diferentes actividades a desarrollar, para que, en esta forma, puedan ser previstas todas las posibilidades de optimización en tiempos y costos.

En el caso concreto de un estudio gravimétrico, es de vital importancia fijar metas que deberán ser cubiertas mediante el establecimiento de diversos objetivos ordenados en una secuencia lógica, para que, en el caso de que la totalidad del trabajo se realice por un solo grupo de personas, se empleen lo mejor posible todos los recursos disponibles, o bien, en caso de efectuarse con varios grupos, no exista interferencia o duplicidad en el trabajo de los mismos.

Es por tanto, objetivo de este trabajo, presentar los aspectos que comprende un levantamiento gravimétrico con fines de exploración, en forma tal, que permita elaborar un plan de trabajo con la mayor eficiencia. Para ello se presenta, en algunas de las etapas, aspectos importantes que deberán considerarse en la generalidad de los casos, ya que estos podrían ocasionar algún problema en la aplicación o bien, en la interpretación de los resultados del estudio.

## RESUMEN

La estructura del presente trabajo, está comprendida en seis capítulos cuyo contenido es el siguiente.

En el capítulo I, como introducción y dentro de un esquema general, se presenta el método gravimétrico dividido en sus principales etapas. Con el fin de familiarizarse con el equipo de medición en lo que respecta a su funcionamiento básico, en el capítulo II, se hace una breve descripción de los principales aspectos del gravímetro de proyección.

En el capítulo III, se hace referencia tanto al modo de operar del gravímetro, como a los métodos de observación más usados en campo, presentandose además, las ventajas y desventajas que pudiera tener uno respecto de otro. Para obtener un mayor control en el desarrollo del levantamiento, en el capítulo IV, se presentan algunas de las técnicas más usadas para lograr tal propósito.

En el capítulo V, se hace un resumen de las correcciones que es necesario aplicar a los datos antes de construir un mapa de anomalía. Se presentan además dos de los métodos más usados en el cálculo de la densidad de corrección.

Finalmente, en el capítulo VI, se presentan los principales criterios en la separación de los efectos regional, residual y de Bouguer, estableciendo comparaciones entre ellos.

## I. PROSPECCION MEDIANTE EL METODO GRAVIMETRICO

### 1.- Esquema general.

Después de efectuar el reconocimiento geológico del área y examinar las posibilidades que pudiera tener el método de prospección gravimétrica, se define el tipo de trabajo a efectuar; de reconocimiento, de semi-detalle o de detalle. Esta clasificación se basa por una parte, en la profundidad y las dimensiones aproximadas de la estructura geológica buscada, y por otra, en la variación lateral de las propiedades físicas de un lugar a otro, mismas que determinan en gran parte la claridad con que pueden definirse zonas de algún interés. Resulta claro entonces, que éstos tres tipos de trabajos difieren uno con respecto a otro en aspectos como precisión, espaciamiento entre estaciones y calidad del estudio en general.

El desarrollo de un levantamiento puede básicamente dividirse en las etapas que se detallan a continuación.

#### 1.1 Control topográfico

En este punto se consideran dos aspectos: el primero es denominado como control horizontal, usualmente proporcionado por cartas de DETENAL, o por algunas otras de que se disponga. Estas proveen de vértices operacionales con coordenadas como las del Sistema Universal transversa de Mercator (UIM), que pueden ser situados en el plano base del área en estudio, para que, a partir de éstos, se haga la localización exacta de las estaciones, lo cual, generalmente se hace con plancheta.

El segundo aspecto a considerar, es denominado

como control vertical, y consiste en una nivelación de alta precisión, que se apoya, cuando se considera necesario, en bancos de nivel previamente fijados.

## 1.2 Control gravimétrico.

Con las estaciones gravimétricas localizadas mediante levantamientos topográficos, se procede a efectuar las lecturas con el gravímetro en cada una de ellas, verificando siempre, no rebasar las tolerancias en los cierres poligonales.

Finalmente, los datos obtenidos son sometidos a un proceso de cálculo, mediante el cual se obtienen los planos de anomalía, para así elaborar un informe final detallado.

## 2. Aspectos importantes en un levantamiento gravimétrico.

### 2.1 Principales características a considerar en el área de estudio.

En esta etapa, se realizan estudios de observación directa, empleando métodos de geología superficial y del subsuelo, obteniendo un panorama general de las condiciones y características, tanto geológicas como topográficas del área en estudio.

De estas características, la más importante a considerar es, en una primera aproximación, la profundidad a la que se espera localizar la estructura geológica buscada.

Este aspecto lleva a considerar otro factor importante, que deberá obtenerse de los estudios geológicos previos. o sea, el contraste de densidad existente entre las estructuras geológicas adyacentes y la que se busca.

Estos estudios deberán estar siempre apoyados, por cartas geológicas y topográficas y, de ser posible, por perforaciones efectuadas en la misma zona, o en zonas relativamente cercanas al área en estudio.



### 2.2 Aspectos importantes de un levantamiento topográfico, previo a un levantamiento gravimétrico.

Una vez elegido el tipo de retícula que habrá de emplearse, será necesario ubicar en el terreno, mediante métodos topográficos, los puntos que se van a usar como estación para las observaciones, de acuerdo a lo inicialmente planeado. En áreas muy extensas, es común auxiliarse, sobre todo en el control topográfico horizontal, por cartas de DETENAL, las cuales proveen de vértices operacionales en las que se puede apoyar el levantamiento del área, recomendándose usar visuales con plancheta menores a 20 Km..

Para el control vertical, la nivelación efectuada deberá ser de alta precisión (o de tercer orden en términos topográficos), con visuales, por lo general, menores a 125 m.

Dado que las estacas con que se marcan los puntos que servirán como estaciones de observación, algunas veces se pierden, o es difícil volver a localizarlas con la rapidez necesaria, se acostumbra hacer un croquis de su ubicación, relacionándolo con puntos de referencia, como construcciones o accidentes topográficos permanentes.

Las relaciones más usadas para calcular las tolerancias en estos tipos de trabajos son:  $T = 0.02\sqrt{K}$  Km/cm en polígonos principales y  $T = 0.04\sqrt{K}$  Km/cm para polígonos secundarios.

Un error en la elevación de 30 cm., origina una diferencia de 0.07 miligales en la corrección por altitud y el mismo error en la dirección norte-sur, origina un error de 0.03 miligales en latitudes medias. (Dobrin, 1975).

Tomando como referencia este ejemplo, resulta entonces, que la mínima precisión con que deberá conocerse la

elevación de las estaciones es de:  $\pm 30$  cm., para obtener una precisión de  $\pm 1$ .u.g.

En algunas circunstancias y solo para trabajos de referencia en los que se requiere gran velocidad y economía aún a costa de perder precisión, las altitudes de las estaciones se determinan barométricamente en lugar de emplear métodos topográficos convencionales, aunque se tiene una gran limitante debida a que el equipo barométrico es afectado en grado importante, por las condiciones meteorológicas.

Finalmente, una vez fijada la estación, deberá señalarse mediante una estaca numerada secuencialmente, y en los casos en que se dificulta la visibilidad, se le agrega una banderola generalmente de polietileno resistente a la interperie y de color visible a distancia.

### 2.3 Criterios para fijar la distancia inicial entre estaciones.

Al proyectar un levantamiento gravimétrico, uno de los factores más importantes a considerar es la situación y espaciamiento de las estaciones y líneas de observación. En un estudio inicial de reconocimiento para grandes estructuras que puedan ser petrolíferas, la distancia entre las estaciones será, naturalmente, mucho mayor que en una investigación para localizar masas metálicas de tamaño reducido y más superficiales. En prospección minera, el espaciado de las estaciones está condicionado en gran parte, por el tamaño probable de las masas metálicas que se buscan (Dobrin, 1975).

De acuerdo a lo anterior, sólo un amplio reconocimiento de la geología del área y una gran experiencia, determinan, en mayor o menor grado, la confiabilidad del espa

ciado inicial que se fija entre estaciones y líneas de observación. Se recomienda analizar la configuración de anomalía de Bouguer a medida que se empieza a cubrir el área en estudio, ya que si ésta es de tendencia demasiado homogénea, será necesario reducir el espaciado inicial entre estaciones, o bien ampliarlo en caso contrario.

#### 2.4 Diferentes tipos de retículas y su uso.

Una vez fijadas las distancias entre estaciones y líneas de observación, deberá seleccionarse también el rumbo y localización de las líneas de observación.

El rumbo deberá coincidir, siempre que se pueda, con el rumbo predominante de las estructuras geológicas, ya que no debe olvidarse que los cambios de densidad que el gravímetro registra, son laterales y no de profundidad.

La envolvente del área en estudio, estará delimitada por un polígono de tantos lados como sea necesario; dicho polígono recibe el nombre de polígono principal. A su vez, este es dividido por otros polígonos internos, denominados polígonos de control o polígonos secundarios, en los cuales se harán las lecturas.

Con el fin de obtener un mayor control del levantamiento, se recomienda programar las líneas de observación en forma tal, que se tengan puntos de cruce suficientes y a distancias accesibles, para fijar en ellos estaciones base. En esta forma, los lados de los polígonos secundarios, estarán formados por líneas de observación, mismas que deberán programarse de tal forma, que eviten obstáculos naturales como ríos caudalosos o vegetación demasiado espesa, que impida abarcar el máximo de área en el mínimo tiempo.

Con el fin de definir en mejor forma los efectos anómalos de las estructuras buscadas, se utilizan, cuando es posible, retículas ortogonales, debiendo conservar la aquidistancia en ambas direcciones, debido a que se desconoce cuál será el rumbo predominante de dicha estructura. Cabe mencionar que estos métodos sólo se emplean en áreas relativamente pequeñas, debido al alto costo originado, entre otras causas, por la necesidad de abrir un gran número de brechas, pero, debido a su simetría, presentan algunas ventajas cuando la información va a ser procesada en forma automática.

En los casos en que las áreas son muy grandes, o la topografía dificulta el acceso, se suele emplearse retículas sin forma definida, orientando las líneas de observación en la forma más conveniente, de acuerdo a las características geológicas y topográficas que se presentan, teniendo cuidado de cubrir aproximadamente la misma área en cada uno de los polígonos secundarios.

Con frecuencia se presenta la necesidad de tener que desplazar las estaciones de suposición real en la red que se está empleando, con el fin de evitar desigualdades topográficas no previstas, que requieran correcciones laboriosas. Una lectura realizada en la cima de un pequeño cerro, estará mucho más afectada por la masa del mismo, que si se hiciera a una pequeña distancia de sus laderas. En ambos casos habrá que calcular las correcciones debidas al obstáculo, pero en último caso, el error debido tanto a la incertidumbre en la forma exacta, como a la densidad del pequeño cerro, no será apreciable, (Dobrin, Telford, 1975, - 1976).

## II. CARACTERISTICAS GENERALES DEL GRAVIMETRO DE PROSPECCION

### 1. Descripción y funcionamiento de los controles del gravímetro.

Es común definir un gravímetro como un dinamómetro de alta sensibilidad, mediante el cuál podemos medir la diferencia de peso que experimenta una masa colocada en su interior. Como la cantidad de masa es constante, se deduce entonces, que los cambios en las lecturas instrumentales en diferentes lugares, son debidas a variaciones muy pequeñas en la atracción gravitacional terrestre, dichas variaciones pueden ser medidas gracias a que los gravímetros tienen una escala de lecturas graduada en forma tal, que permita hacer lecturas con cuatro cifras enteras y una décima de aproximación.

Esta alta sensibilidad requiere, que el mecanismo móvil del gravímetro, se encuentre alojado dentro de un recipiente herméticamente sellado que lo proteja de efectos de temperatura y presión, los cuales afectan entre otras, las propiedades elásticas de dichos mecanismos.

El sistema móvil comprende un brazo de momentos apoyado en bisagras de fibras de torsión suspendido de resortes de cuarzo. Los sistemas de control, en el caso de los gravímetros Worden, se encuentran distribuidos en la cámara superior de acuerdo al esquema de la figura número 1.

Las escalas de lectura, el control de reescalar y los tornillos de ajuste de los niveles se encuentran colocados sobre la placa superior. El interruptor de iluminación del sistema óptico se encuentra en una placa montada próxima al ocular del microscopio. Las baterías del sistema de iluminación (Tipo AA) se encuentran bajo una placa sujeta con tornillos, próxima al nivel longitudinal.

Con el fin de lograr los mejores resultados en campo, es conveniente familiarizarse con el funcionamiento del gravímetro mediante la consulta de los manuales y especificaciones según la marca y tipo. En la actualidad existen diferentes tipos de gravímetros, todos basados en el mismo principio de funcionamiento y con mecanismos similares a los anteriormente explicados. Algunos de los gravímetros más usados para distintos propósitos son el CG-2 y el CG-2 G de la compañía Scintrex Limited, el La Coste and Romberg de la compañía del mismo nombre y el Worden Master de la compañía Texas Instruments, de estos tres, los dos primeros son los más usados en trabajos geodésicos, y el tercero, en trabajos de exploración con fines económicos, siendo una de las principales características que diferencia a uno de otro la que, el primero, no requiere de baterías para activar el sistema de compensación térmica.

Con objeto de dar una idea general, se hace referencia en una breve descripción, a los controles principales del modelo Worden Master, debido a que es con el que actualmente se cuenta en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Fig. No. 1).

#### 1.1 Dial o disco de lectura.

Es el mecanismo que controla la posición del haz de luz en la retícula, es decir, mide la fuerza restauradora que es necesario aplicar para llevar el haz de luz hacia el centro de la retícula, corrigiendo de esta forma la deflexión que experimentan los resortes de cuarzo que sostienen la masa. La medida de esta fuerza estará dada, en principio, en unidades de lectura.

#### 1.2 Sistema de iluminación.

Este sistema es activado mediante un interruptor

La luz que proporciona permite conocer cuál es la magnitud y sentido de la deflección de acuerdo a la posición del haz de luz en la retícula.

### 1.3 Sistema de nivelación.

El gravímetro cuenta con dos niveles, uno longitudinal y otro transversal, los cuáles son nivelados mediante los tres tornillos de nivel localizados en la base del gravímetro y pueden ser ajustados mediante un procedimiento que se explicará adelante.

## 2. Pruebas instrumentales del gravímetro antes de ser usado en campo.

Antes de llevar el gravímetro al campo, es necesario realizar algunas pruebas instrumentales, con el fin de verificar el correcto funcionamiento de todos sus sistemas.

De estas pruebas, las más comunes son las siguientes.

### 2.1 Verificación del sistema de nivelación

Para revisar los niveles se procede en la siguiente forma:

- a) Centrar las burbujas de los niveles con relación a las líneas de referencia marcadas sobre el tubo de vidrio utilizando los tornillos de nivel.
- b) Llevar el haz de luz a la línea de centro de la retícula girando el disco de lectura.
- c) Utilizando los tornillos del sistema de nivelación, se desbalancea el gravímetro lo necesario para que la burbuja del nivel longitudinal se mueva una división hacia la izquierda, manteniendo centrado el nivel transversal

El efecto esperado, es que, el haz de luz deba haberse movido ligeramente hacia la derecha de la línea de referencia central de la retícula.

- d) Se repite el paso anterior, solo que ahora la burbuja deberá ser desplazada hacia la derecha, el resultado será nuevamente un desplazamiento del haz de luz hacia la derecha de la línea \_ del centro de la retícula.
- e) Se revisa el ajuste del nivel transversal de \_ la misma manera, manteniendo centrado el nivel longitudinal.

## 2.2 Verificación del grado de sensibilidad.

La sensibilidad puede ser definida, como la distancia que el haz de luz recorre a través del campo visual, para un cambio de gravedad; esta distancia es medida contando el número de unidades de división que es necesario girar el disco de lectura para que el haz de luz sea desplazado desde la línea de referencia central, hasta una de las líneas \_ exteriores de la retícula.

Los ajustes de sensibilidad más comunes son los \_ que se encuentran en un rango de entre 30 y 50 divisiones del disco de lectura.

## 3. Reescalamiento.

El reescalamiento del gravímetro, solo debe efec-



tuarse cuando se esté seguro de que éste es demasiado alto, o bajo, para una operación eficiente.

Por lo general, se hace necesario reescalar el gravímetro cuando se le translada rápidamente de una zona muy fría a otra muy caliente, o bien, cuando se tiene un cambio considerable en la altura sobre el nivel del mar.

Si es necesario ajustar la sensibilidad, es decir, reescalar el gravímetro, se puede proceder en la siguiente forma:

- a) Viendo el receptáculo del ocular del microscopio desde arriba, se usa solo la presión de los dedos para girar el receptáculo íntegro, aproximadamente, un décimo de vuelta en dirección de las manecillas del reloj. Esto producirá un aumento en la sensibilidad.
- b) Se realinea la retícula, de manera que las líneas sean paralelas al haz de luz, mediante la rotación de solo la parte superior del ocular.
- c) Se reajusta el nivel longitudinal de acuerdo al procedimiento explicado en párrafo 2.1.
- d) Se verifica la sensibilidad, y se repiten los pasos anteriores. Si un aumento adicional en la sensibilidad es requerido.

Si por el contrario, es necesario disminuir la sensibilidad, se sigue todo el procedimiento anterior, solo que ahora se gira el receptáculo en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

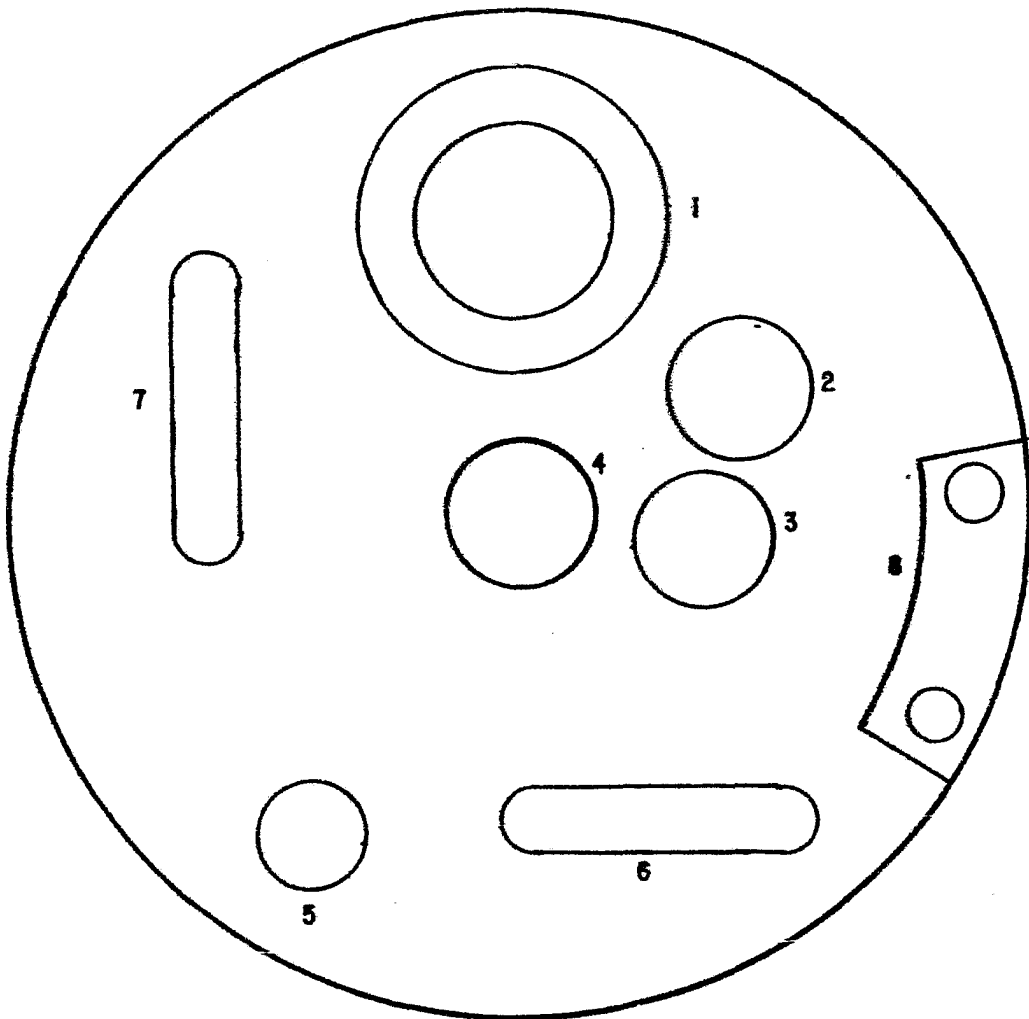


FIGURA N<sup>o</sup>. 1 .

DISTRIBUCION GENERAL DE LOS CONTROLES DE UN  
GRAVIMETRO

1. DISCO DE LECTURAS
2. OCULAR DEL MICROSCOPIO .
3. TERMOMETRO
4. PERILLA PARA AJUSTAR LA LAMPARA
5. INTERRUPTOR
6. NIVEL LONGITUDINAL
7. NIVEL TRANSVERSAL .
8. BATERIAS .

#### 4. Deriva del gravímetro.

La deriva puede ser definida, como el cambio necesario en la posición del disco de lectura, para mantener el haz de luz en su posición central durante un período de --- tiempo y en un mismo lugar. Esta puede ser considerada como positiva o negativa, dependiendo de si es necesario aumentar, o disminuir el número de divisiones en el disco de lectua.

Para determinarla, es común colocar el gravímetro donde no sea perturbado, y tomar una lectura cada 15 minutos, durante un periodo de por lo menos tres horas.

Con los datos obtenidos, se construye una gráfica, en donde las ordenadas serán las lecturas, y las abscisas, los tiempos de observación. La línea suave que une estos puntos, será la representatción gráfica de la deriva propia del gravímetro.

#### 5. Fallas más comunes y forma de resolverlas en campo.

En algunas ocasiones, al estar haciendo el levantamiento, se pueden presentar algunas fallas, las que, si el gravímetro ha sido transportado adecuadamente, pueden tratarse de corregir mediante procedimientos sencillos.

A continuación se presenta un cuadro con las fallas más comunes y la forma en que podrían resolverse.

| FALLA   | CAUSA PROBABLE  | SOLUCION  |
|---|---|---|
| No hay iluminación en la retícula o en los niveles          | Lámpara defectuosa.<br>Bateria.<br>Contactos de interruptor sucios o defectuosos.                       | Reemplazar batería o lámpara.<br>Reemplazar o limpiar contactos.  |
| No hay iluminación en la retícula. Niveles iluminados.      | Orientación incorrecta de la lámpara.   | Ajustar.  |
| Las lámparas se funden frecuentemente                       | El voltaje de las baterías es demasiado alto.   | Usar solo una batería nueva a la vez alternandolas al reemplazarlas.  |
| La línea producida por el haz de luz aparece fuera de foco. | Orientación incorrecta de la lámpara.<br>Filamento de la lámpara torcido.<br>Microscopio fuera de foco. | Ajustar o reemplazar la lámpara.  |
| El haz de luz no se mueve cuando se gira la escala.         | El haz de luz está "pegado".  | Dar ligeros golpes con los dedos a la placa superior del gravímetro, hasta que el haz de luz adquiera movilidad propia. |

|  |   |  |
|--|---|--|
| El haz de luz deriva rápidamente.          | Transporte indebido de gravímetro         | Esperar un tiempo a que el gravímetro se estabilice. |
| Los niveles requieren de frecuente ajuste. | Los soportes de los niveles están flojos. | Apretar los soportes con destornillador de relojero. |

### III. PROCEDIMIENTOS DE OPERACION EN CAMPO

Al iniciar el trabajo diario, deberá seguirse\_\_\_ siempre la rutina de verificación de los sistemas del aparato. Para trasladarse a la zona de trabajo, es importante\_ tomar las debidas precauciones para un correcto transporte, evitando movimientos bruscos, o que sea golpeado o inclinado.

Cuando el transporte se ha efectuado en automóvil, es recomendable esperar un tiempo aproximado de media hora, para dar tiempo a que se estabilizen los mecanismos del gravímetro, o en el caso de un cambio de temperatura, dar tiempo suficiente para que el sistema de compensación térmico,\_ estabilize la temperatura interna.

#### 1. Rutina de observación.

Al llegar a la línea que se va a observar, deberán siempre iniciarse las lecturas en una estación considerada como base. El procedimiento que se sigue para llevar a cabo dichas lecturas, se detalla a continuación en cada una de sus etapas.

##### 1.1. Nivelación.

Después de colocar el gravímetro en su base, se\_\_ nivela aproximadamente, girandolo sobre el plato cóncavo, situandolo en forma tal, que el nivel longitudinal quede\_\_ frente al observador y el nivel transversal del lado izquierdo. Una vez obtenida la mayor aproximación en las burujas de los niveles, se hace un ajuste final con los tornillos niveladores situados en la base del gravímetro, recomendandose centrar primero el nivel transversal y después\_\_

el nivel longitudinal.

Es importante, cuidar que la placa superior del gravímetro, no quede expuesta a los rayos directos del sol, ya que ésto podría ocasionar que los niveles se corrieran de su punto de equilibrio verdadero, con la consiguiente alteración en las lecturas.

### 1.2. Procedimiento de lectura.

Con el gravímetro nivelado, se gira el interruptor de iluminación hacia la posición de encendido, con lo que se ilumina el campo visual en la retícula. La posición del haz de luz, aparecerá como una línea luminosa, la cuál, mediante el movimiento del disco de lecturas, será llevada hacia la línea de referencia central del campo visual, (Fig. No. 2 ).

Los ajustes del haz luminoso con la línea de referencia, deberán hacerse mediante movimientos suaves del disco de lectura, ya que de lo contrario, se provocaría que el haz luminoso pasara de un extremo a otro del campo visual sin poder evitarlo, haciendo con ésto más lenta la lectura.

## 2. Métodos de observación y establecimiento de estaciones base.

Siempre que sea posible, se deberá disponer cerca del área en estudio de un punto en el que se conozca previamente el valor de la gravedad, es decir, una estación pendular con valor absoluto de gravedad o bien, una estación que haya sido usada como estación base en algún levantamiento anterior.

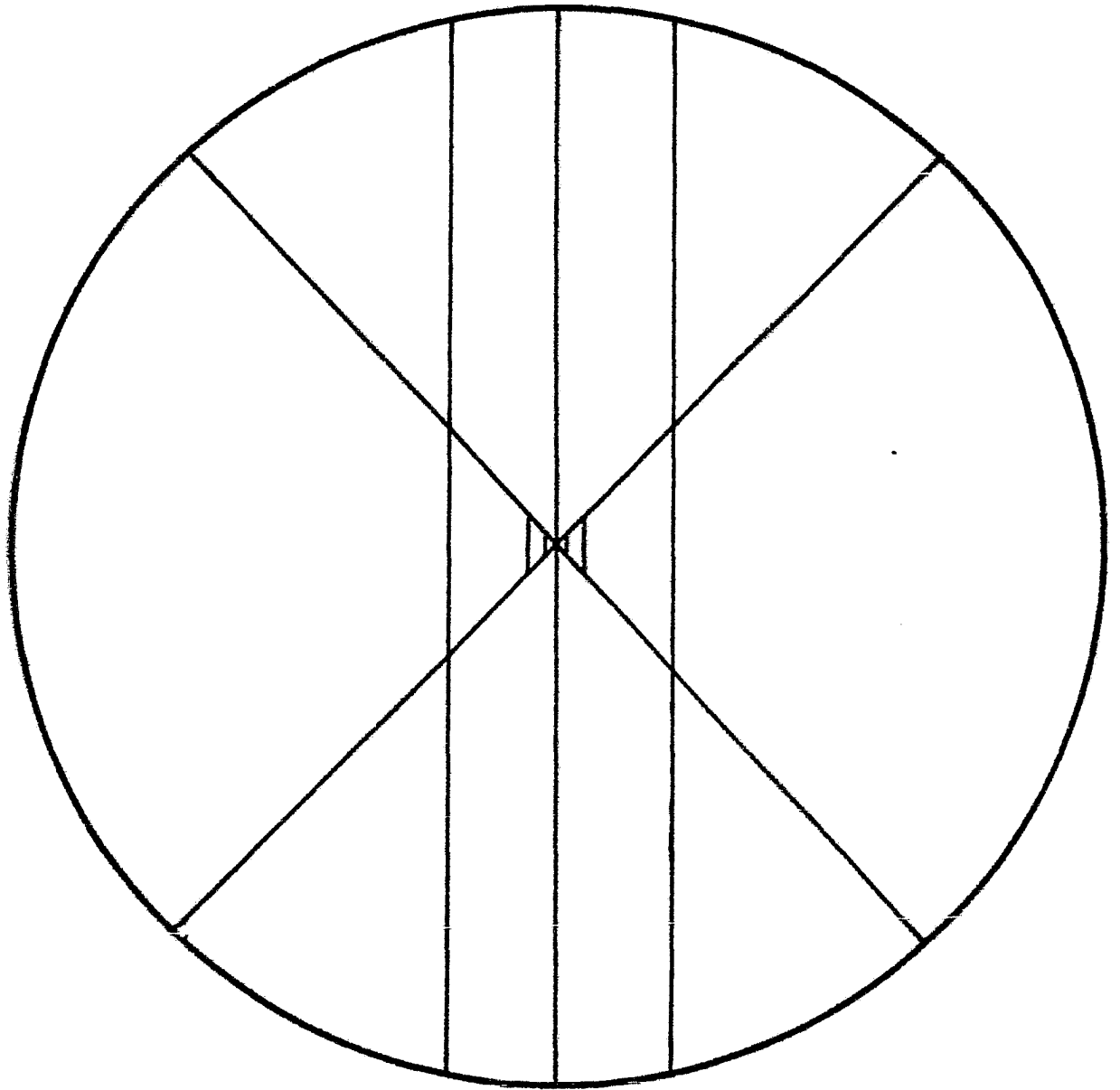


FIGURA Nº . 2 .

RETICULA DEL GRAVIMETRO .



Debido a que esto no siempre es factible, se hace necesario en la mayoría de los casos, realizar un trabajo adicional para el establecimiento de una estación base local.

Debido a que los instrumentos solo miden diferencias de gravedad, el valor de ésta en una estación, es llevado hacia la estación de referencia local, mediante el establecimiento de estaciones auxiliares como se muestra en la figura No. 3 .

Con el fin de avanzar más rápidamente y facilitar regresar a la estación inicial, se acostumbra fijar estaciones base espaciadas tanto a lo largo del polígono principal exterior, como en los polígonos secundarios interiores, logrando en esta forma, tener a una distancia conveniente, una estación base para apoyar un nuevo polígono de observación.

Resumiendo, las observaciones de una línea se harán siempre entre dos estaciones consideradas como base y, durante el trayecto, seleccionar estratégicamente, las estaciones que serán consideradas como bases para apoyar en el futuro, las demás líneas de observación y poder así, cubrir el área mediante polígonos formados por estas líneas.

### 2.1. Esquematización de los principales métodos de observación.

Para establecer las diferencias de gravedad entre las estaciones, existen diversos métodos, que se distinguen uno de otro en: a) grado de control sobre el efecto de mareas y, b) rapidez con que permite avanzar sobre el terreno. En forma general, el criterio para aplicar uno u otro método, estará en función del objetivo que se persiga, es decir,

ESTACION BASE  
ANTIGUA



$\Delta g_1$

A  
O

$\Delta g_2$

B  
O

$\Delta g_3$

C  
O

AREA DE  
TRABAJO



FIGURA N<sup>o</sup>. 3

A, B y C SON ESTACIONES AUXILIARES  
"E" ES LA NUEVA ESTACION DE REFERENCIA  
LOCAL.

$$g_A = g_P + \Delta g_1$$

$$g_B = \Delta g_A + \Delta g_2$$

$$g_C = \Delta g_B + \Delta g_3$$

$$g_D = \Delta g_C + \Delta g_4$$

del grado de claridad y detalle con que se requiera definir las anomalías y en todo caso, de las condiciones de acceso del área.

El primer método que debería usarse siempre es ilustrado en la Fig. No. 4, el cuál es considerado como el más exacto en el control del efecto por mareas, debido a que todas las lecturas son referidas a una misma estación base.

Las lecturas para dicho método, se llevan a cabo en la siguiente forma de acuerdo al esquema de la Fig. No.4:

- (1) Se hace la primera lectura en la estación base 1 y se translada a la estación 2.
- (2) Se hace la lectura en la estación 2 y se regresa a la estación base 1.
- (3) Se hace nuevamente la lectura en la estación base 1 y se translada a la estación 3.

La desventaja que presenta este método es que, no obstante ser teóricamente el más exacto en el control por efecto de mareas, también es el de más lento avance.

En la práctica se han desarrollado muchos métodos de observación, los cuáles son variantes del método antes mencionado y su aplicación ha estado siempre en función del criterio y experiencia de las compañías dedicadas a la exploración. De estos métodos, se explican tres de los más conocidos:

El primero de éstos, es representado en la Fig. No. 5, en donde el procedimiento de lecturas esta de acuerdo a la numeración y es el siguiente:

- (1) Se hace la lectura en la estación base A y

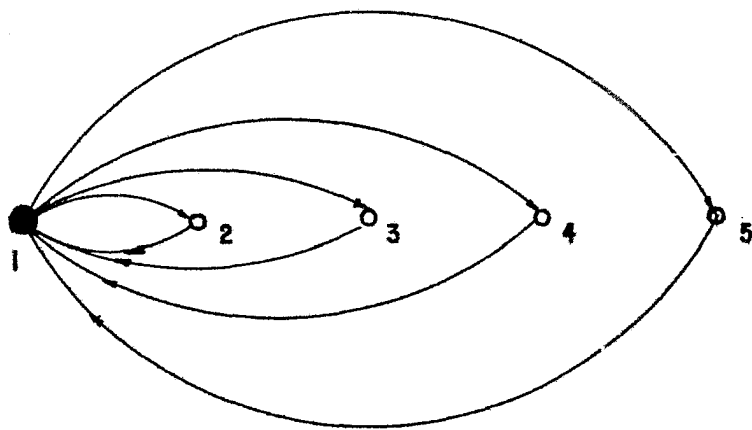


FIGURA N<sup>o</sup>. 4 .

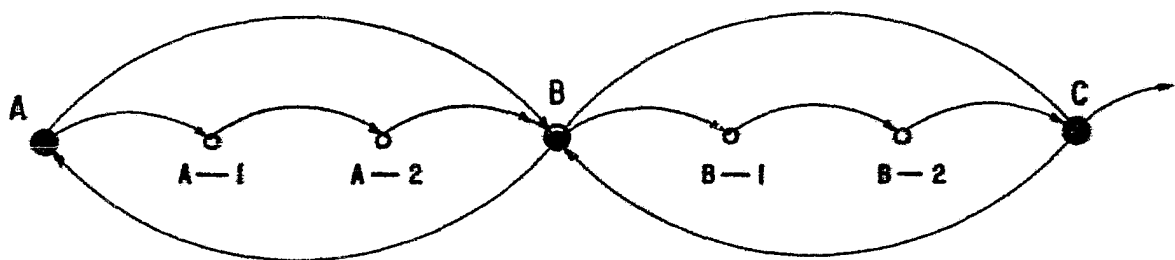


FIGURA N<sup>o</sup>. 5 .

se procede ha hacer las lecturas en las esta\_ ciones intermedias hasta obtener la lectura\_ en la estación base B.

- (2) Se regresa a la estación base A y se repite\_ la lectura.
- (3) Se regresa a la estación base B y se repite\_ la lectura.
- (4) Se continua con las lecturas en las estacio- nes intermedias hasta llegar a la siguiente\_ estación base, en este caso, la estación C.
- (5) Se regresa a la estación B y se repite nueva\_ mente la lectura.
- (6) Se regresa a la estación base C y se repite\_ nuevamente la lectura.
- (7) Se repiten en igual forma el procedimiento\_ del (1) al (4) hasta terminar con la línea.

Los siguientes dos metodos resultan de la combina\_ ción del método anterior y el método ideal o teórico.

El segundo de éstos, suele ser denominado como mé\_ todo de cadenamiento con estaciones intermedias (Fig. No.6), cuyo procedimiento es el siguiente:

- (1) Se parte de la primera lectura en la esta--- ción base A, para después hacer las lecturas en las estaciones intermedias, fijando en el trayecto a B como estación base intermedia\_ hasta llegar a la estación base C.
- (2) Se regresa hasta la estación base A y se re- pite la lectura.
- (3) Se pasa directamente a la estación base B y\_

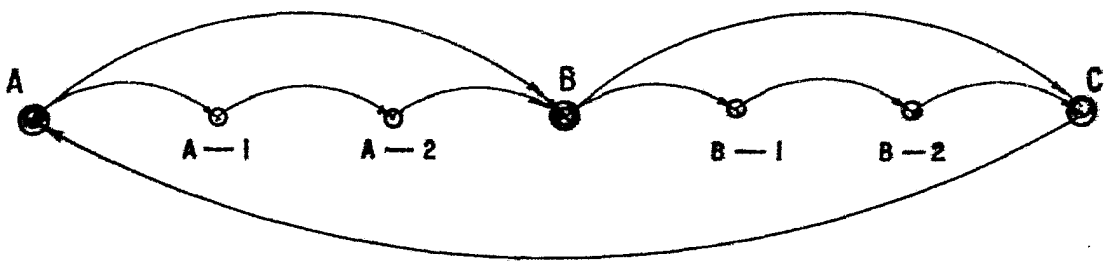


FIGURA N<sup>o</sup>. 6 .

se repite la lectura.

- (4) Se traslada nuevamente a la estación base C\_ repitiendo la lectura. En este punto es posible seguir con las demás estaciones de la línea o bien, cambiar de dirección o hacer\_\_ las lecturas de otra línea.

El tercer método implica una pequeña variante respecto a el anterior y cabe mencionar, que es el más usado\_\_ en áreas de difícil acceso, ya que las lecturas de cierre,\_\_ o segundas lecturas, solo son efectuadas una sola vez.

El procedimiento es esquematizado a continuación, y está representado en la Figura No. 7 :

- (1) Se hace la primera lectura en la estación base A y se procede a hacer todas las lecturas en las estaciones intermedias fijando en el trayecto, a B como estación base intermedia, hasta llegar a la estación base C, dejando\_\_ pasar un lapso de aproximadamente media hora
- (2) Se regresa a la estación base B y se repite\_\_ la lectura.
- (3) Se regresa a la estación base A, se repite\_\_ la lectura, y se continúa con la siguiente\_\_ línea de observación



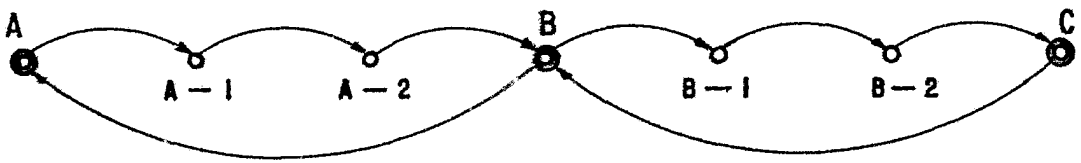


FIGURA N<sup>o</sup>. 7

#### IV. CONTROL GRAFICO DE LA CALIDAD Y AVANCE DEL LEVANTAMIENTO

Al empezar a generarse los primeros polígonos, deberán iniciarse también las actividades en el gabinete relacionadas con el cálculo y control del grado de error en los mismos, para que de esta forma, pueda ser detectado oportunamente cualquier error.

##### 1. Cálculo gráfico de la deriva y de los valores base.

Esta etapa tiene por objeto llevar un control gráfico, cuando es posible diario, de la deriva y de la divergencia máximas por hora durante las observaciones.

Por otro lado, se determinan tanto los valores base en estaciones intermedias, como las diferencias de gravedad entre estaciones consideradas como bases.

De todos los métodos que existen para calcular la deriva, se detallan dos de los más usados en la práctica, \_\_el primero denominado como drift en forma de pino y el se--gundo como drift en forma de escalera.

##### 1.1 Drift en forma de pino.

El uso de uno u otro método, dependerá de la forma en que se efectuaron las lecturas y del tiempo que transcurrió entre las mismas, debido a que, las condiciones del \_\_área pueden dificultar trasladarse de un lugar a otro. Cuando se presenta este problema, se deja transcurrir un \_\_lapso de aproximadamente media hora y se hacen las lecturas de regreso después de la lectura en la estación base final, dichas lecturas se harán solo en las estaciones base fijas como tales en el trayecto de ida. Si los datos de cam-

po han sido generados en esta forma, (Fig.No.7 ), el cálculo gráfico del drift para esa línea podrá hacerse de acuerdo al siguiente procedimiento (Fig. No. 8 ):

- a) Usando una hoja de papel milimétrico, a fin de obtener la mayor exactitud gráfica, se elige como eje de tiempo, el eje de las abscisas, siendo una de las escalas más convenientes asignar a cada milímetro el valor de dos minutos. En el eje de las ordenadas se fijan los valores de las lecturas, asignando por lo regular a cada milímetro el valor de una décima de división.

El primer paso consistirá, en situar de acuerdo a las escalas cada par de lecturas efectuadas en las estaciones base, uniendo estos puntos con una línea recta y suponiendo como lineal la variación por mareas, se obtiene lo que se define como línea base.

En un intervalo de tiempo se tendrán tantas líneas base como lo permita la escala de tiempo, ya que la escala de lecturas es ajustada independientemente para cada línea base, pero el eje de tiempo es común a ellas.

- b) En este tipo de gráficas, las líneas base que darán una a continuación de otra, para cada línea observada. Partiendo de la línea base superior, se traza una recta paralela al eje de las ordenadas que intersecte a las líneas base inferiores, asignando a cada punto de in

tersección, el valor que corresponda según la escala de lecturas en cada caso. Dicha línea no necesariamente pasará por el centro de todas las líneas base (excepto la línea base superior) y tiene por objeto agrupar todas las observaciones, como si hubieran sido hechas al mismo tiempo.

- c) Para obtener las diferencias de gravedad entre las estaciones base, restamos del valor promedio de la línea base superior, el valor promedio de la línea base siguiente, y así sucesivamente. Este valor es anotado a la izquierda de cada punto de intersección (Fig.No. 8) El valor así obtenido es multiplicado por la constante del gravímetro, y anotado a la derecha de cada punto de intersección, quedando en unidades gravimétricas.
- d) Para obtener el valor base de las estaciones intermedias, se hace referencia a la línea base correspondiente, buscando sobre la escala de tiempo, la hora a la que fué hecha la lectura y proyectandola sobre la línea base correspondiente.
- e) El drift máximo se obtiene trazando, a partir de la línea base de máxima pendiente, una recta paralela al eje de las abscisas que se prolonge por una hora. Partiendo de esta línea,

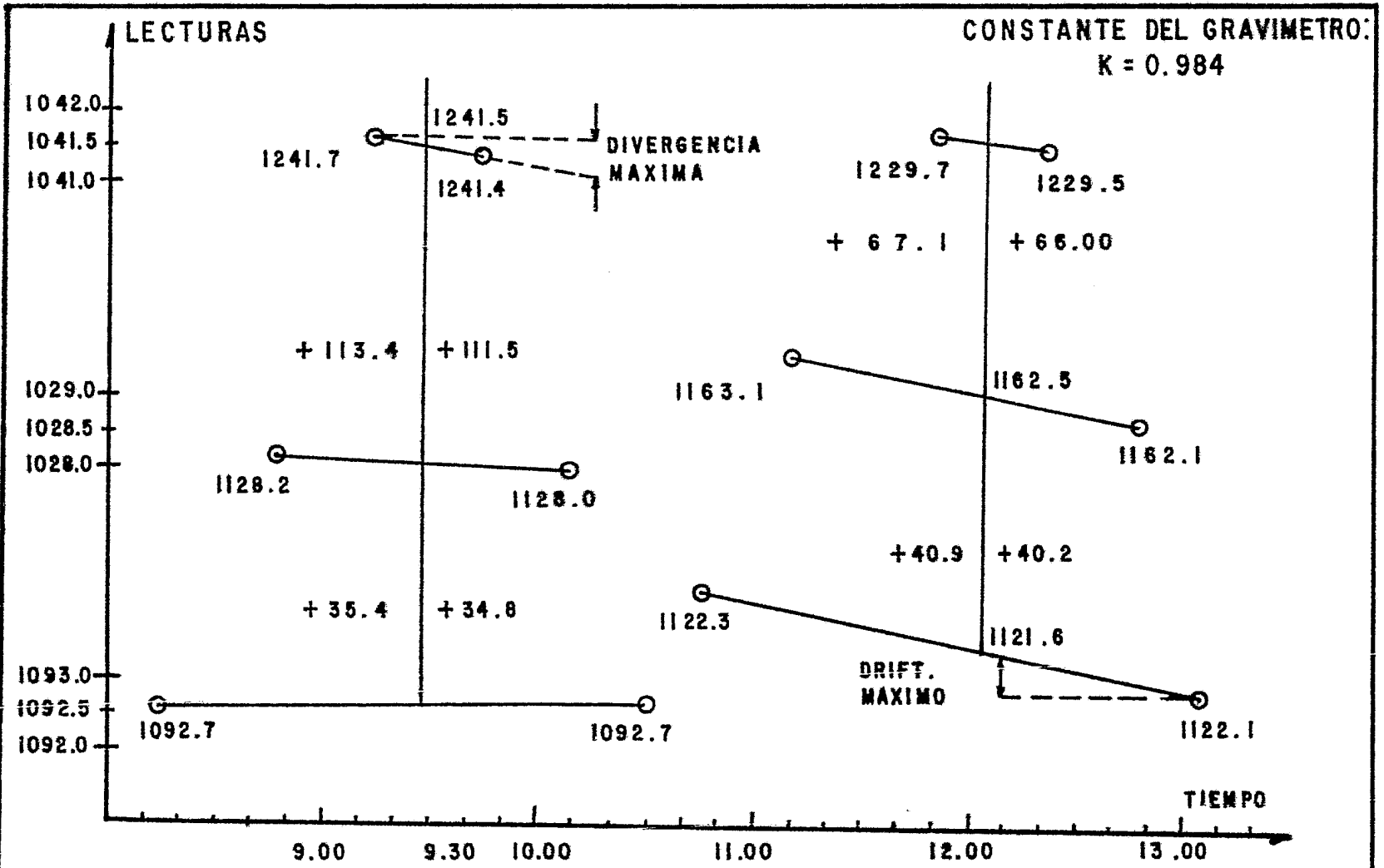


FIGURA N<sup>o</sup>. 8. DRIFT EN FORMA DE PINO.

se traza una recta vertical que intersecte a la línea base. La distancia obtenida es el drift máximo por hora.

- f) La divergencia máxima por hora es la máxima variación en paralelismo entre las líneas base de máxima y mínima pendiente, prolongadas por una hora.

## 1.2 Drift en forma de escalera.

La forma de hacer las lecturas que origina este tipo de gráfica, se emplea cuando las condiciones topográficas son más favorables que en el caso anterior (Fig. No. 6). Para el cálculo se procede en igual forma que en el inciso a), para el cálculo del drift en forma de pino y, posteriormente, de acuerdo al siguiente procedimiento (Fig. No. 9).

- a) Partiendo de la segunda lectura de las estaciones base, se traza una recta paralela al eje de las ordenadas, hasta intersectar la línea base inmediata superior. El valor en este punto, es obtenido según la escala de la línea base intersectada y anotado a la izquierda de dicho punto.

Se obtiene la diferencia entre el valor en el punto de intersección y el valor a partir del cual se trazó dicha recta, anotándolo a la izquierda del valor de intersección.

La diferencia de gravedad es obtenida multiplicando este valor por la constante del graví

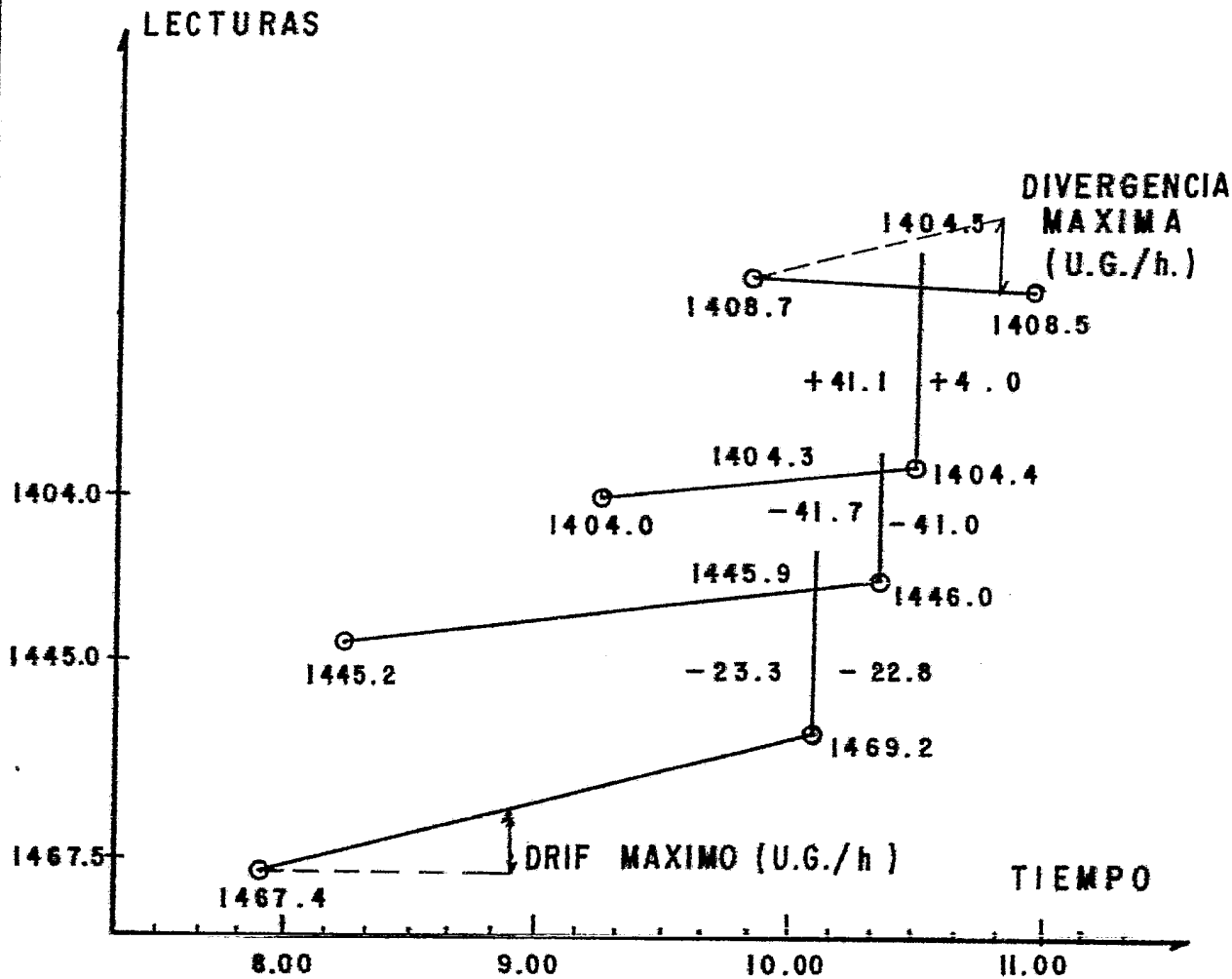


FIGURA Nº.9. DRIFT EN FORMA DE ESCALERA.

metro, la cuál, está anotada del lado derecho de la recta de intersección, quedando en unidades gravimétricas.

- b) El drift y la divergencia máximas por hora se obtienen en igual forma que en el caso del drift en forma de pino.

Cabe mencionar, como ejemplo, que en los estudios realizados por PEMEX, las tolerancias son del orden de 0.8 u.g./h. y 0.04 u.g./h. para el drift y la divergencia máximas por hora respectivamente.

La diferencia principal entre estos dos tipos de cálculos gráficos es que, en el caso del drift en forma de pino, es posible considerar una lectura promedio entre las estaciones base, mientras que en el caso del drift en forma de escalera, es necesario proyectar cada una de las segundas lecturas, las que de todas formas, han tenido un intervalo de tiempo más corto.

## 2. Planos de avance diario.

Con el fin de llevar un control adecuado del número de estaciones leídas, así como del número de estaciones base fijadas, es conveniente dibujar en forma esquemática en un plano, cada una de las líneas observadas, fijando en forma vectorial el sentido en que han sido leídas, así como la fecha y el número de identificación de cada estación, incluyendo en cada caso la diferencia de gravedad entre estaciones base.

Este plano podrá dar una idea de los polígonos



terminados y del error de cierre en cada uno de ellos (Fig. No. 10).

Existen básicamente dos formas de compensar las estaciones base, en una de ellas se compensan las que pertenecen a una sola línea de observación, la cuál es identificada de otra por su correspondiente fecha, respetando los valores de las estaciones base que hayan sido compensados para alguna otra línea. Este método permite un control diario de la calidad de las lecturas, facilitando además la detección y corrección oportunas de algún error de lectura o de cálculo. Un segundo método es empleado en los casos en que se ha acumulado una gran cantidad de trabajo de gabinete, desconociéndose la fecha y por tanto, el orden en que han sido efectuadas dichas observaciones. La compensación se hará tomando en cuenta solo polígonos cerrados, solo que al detectar algún cierre poligonal fuera de tolerancia, será más complejo hacer la correspondiente corrección ya que se alterarían los demás polígonos.

## 2.1 Compensación de polígonos.

De acuerdo a lo anterior, la compensación de estaciones base o compensación de polígonos, consistirá en determinar un valor de gravedad compensado para cada estación base. El método empleado es análogo al usado para la compensación de cotas en topografía.

Partiendo de las gráficas de drift, tomamos la diferencia de gravedad en la estación inicial y le sumamos algebraicamente cada una de las demás diferencias, debiendo llegar al mismo valor de la estación inicial. Como en la mayoría de los casos esto no ocurrirá, el error es repartido

equitativamente entre cada una de las estaciones, anotando en paréntesis las diferencias de gravedad compensadas, para posteriormente sumarlas al valor de gravedad de cada una de las estaciones y obtener así, los valores compensados de gravedad (Fig. No. 10 ).

En la actualidad existen gran variedad de formas y métodos para llevar a cabo el control del levantamiento en aspectos como el cálculo de la deriva en las lecturas de áreas, o el cálculo del error en los cierres poligonales (Ing. Fidencio García, 1981, tesis profesional).

Como una explicación adicional a la Fig. No.10, se hace referencia a un ejemplo ilustrado en la Fig.10/a en el cuál se obtiene la compensación de polígonos de acuerdo al siguiente procedimiento.

Se parte de la estación base E-5675, cuyo valor ya está compensado, y fué previamente determinado para alguna otra línea o polígono observado.

En éste caso, la compensación se hará para el polígono completo aunque, como ya se mencionó, es más recomendable compensar las estaciones para las líneas observadas cada día.

Al valor de la estación base E-5675 se le suman las diferencias de gravedad obtenidas previamente en las gráficas de Drift, considerando positivas las que están en una trayectoria coincidente con las manecillas del reloj y negativas, las que están en sentido contrario.

Al llegar nuevamente a la estación E-5675 se observa que se tiene una diferencia de  $-0.3 \text{ ug}$ , es decir, se llegó con  $0.3 \text{ ug}$  de más con respecto al valor inicial de partida. Como el error fué positivo, es decir, en el sentido de las manecillas del reloj, se indicará en el centro del polígono con un segmento circular orientado en igual forma.

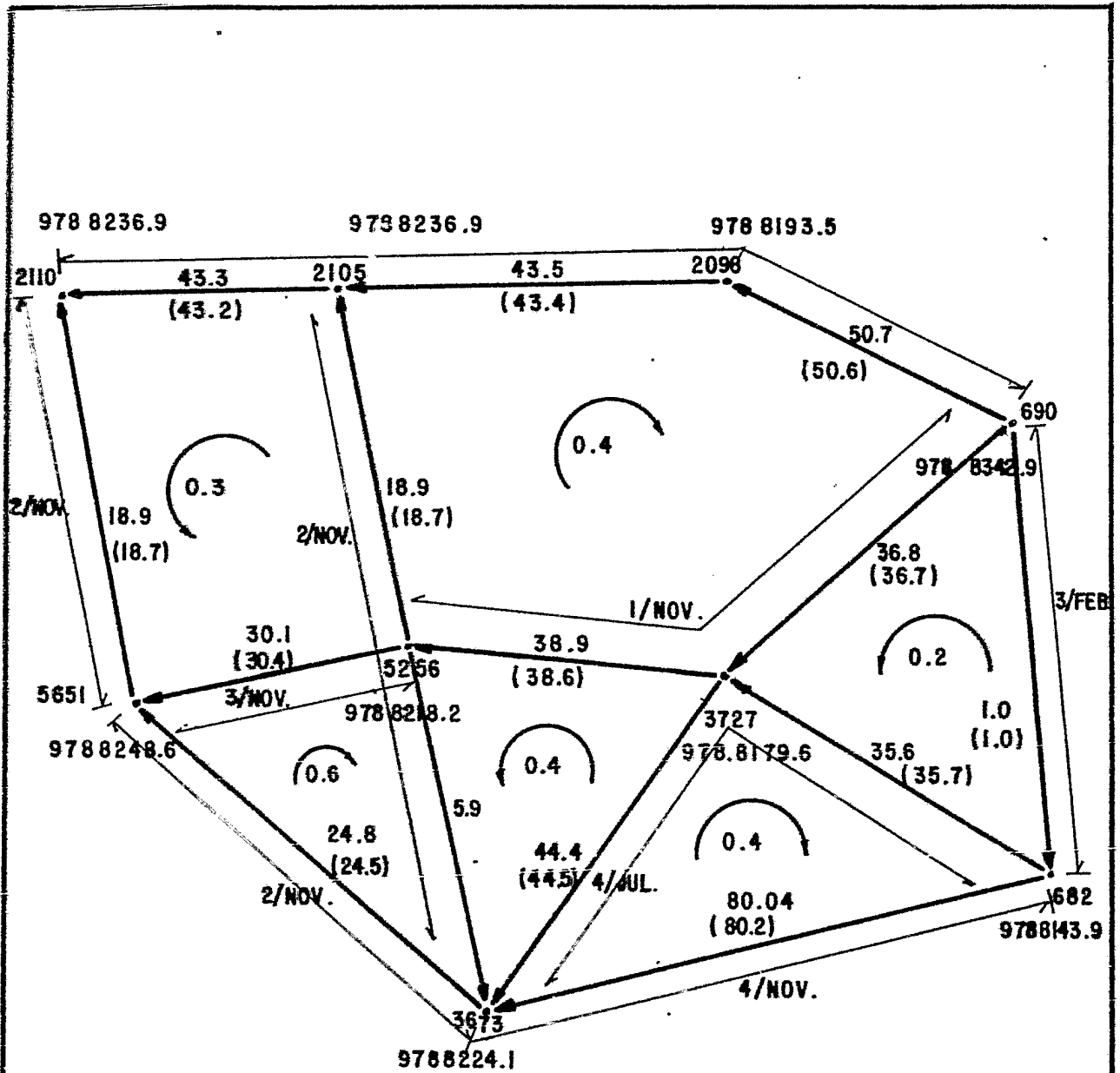


FIGURA N<sup>o</sup>. 10.  
 FRAGMENTO DE UN PLANO DE AVANCE CON  
 COMPENSACION DE POLIGONOS.

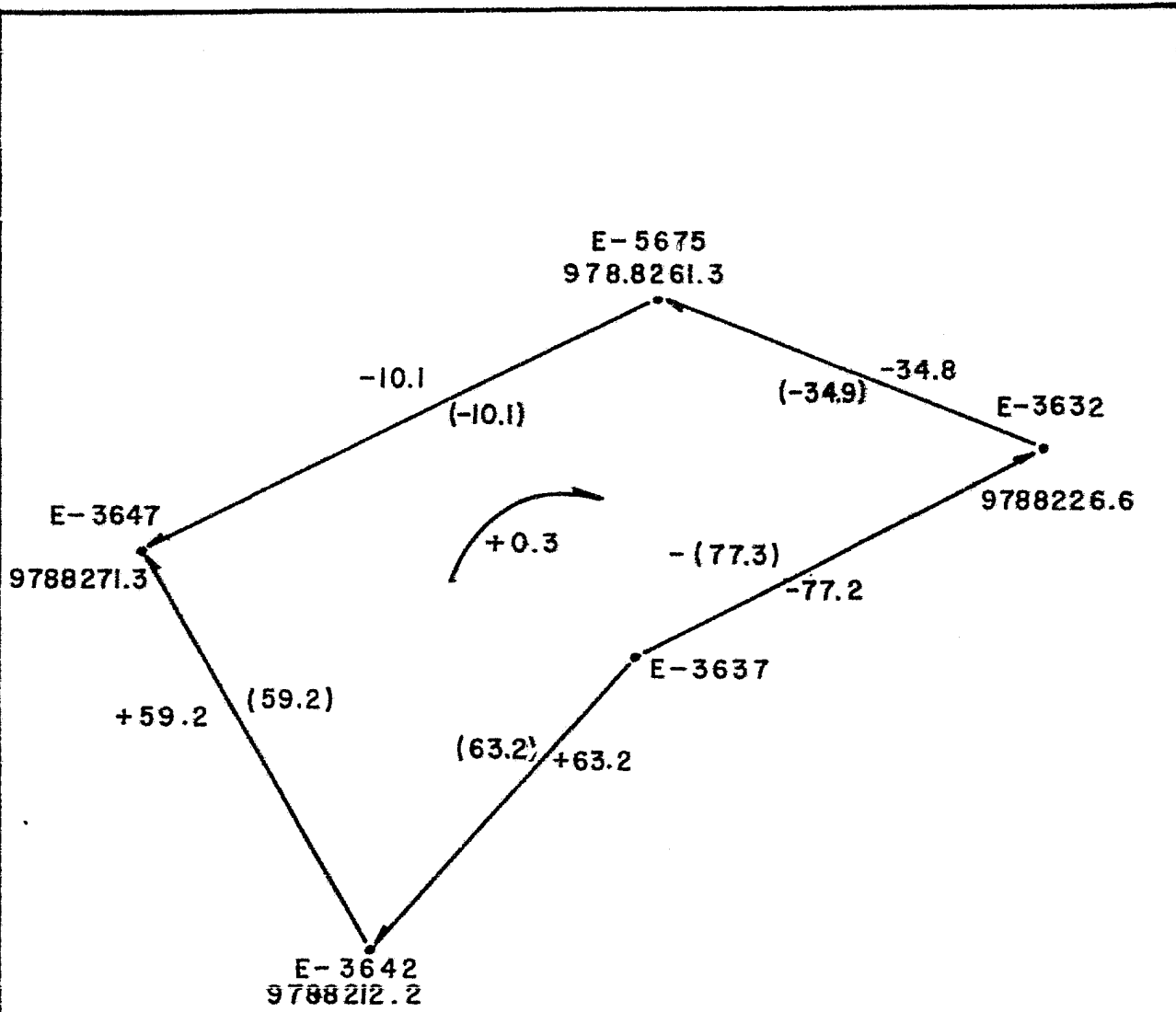


FIGURA No.10 (a)  
 COMPENSACION DE ESTACIONES BASE

El error calculado es dividido entre el número de líneas que forman el polígono y, debido a que es positivo, se resta a cada una de las diferencias de gravedad y se anota un paréntesis. Las diferencias compensadas, son finalmente sumadas algebraicamente a los valores base de las demás estaciones que forman el polígono, obteniéndose, un polígono con estaciones base compensadas.

Cabe mencionar, que debido a la aproximación en las cifras decimales, si se vuelve a repetir el procedimiento anterior, empleando las diferencias compensadas, el error inicial se reducirá notablemente, aproximándose a cero. Si se desea compensar nuevamente este error, se puede repetir el procedimiento anterior hasta obtener un valor que pueda ser considerado satisfactorio.

## V CORRECCIONES GRAVIMETRICAS

Al generarse las correspondientes lecturas gravimétricas, se presenta el problema de que el gravímetro es extremadamente sensible a otros efectos físicos que no están relacionados directamente con la componente vertical de la gravedad, dichos factores, de no eliminarse, originarían interpretaciones erróneas debido a la gran influencia que tienen sobre las lecturas.

Las correcciones que se aplican a los datos de campo, pueden clasificarse de acuerdo al cuadro de la Fig.

### 1. Correcciones instrumentales.

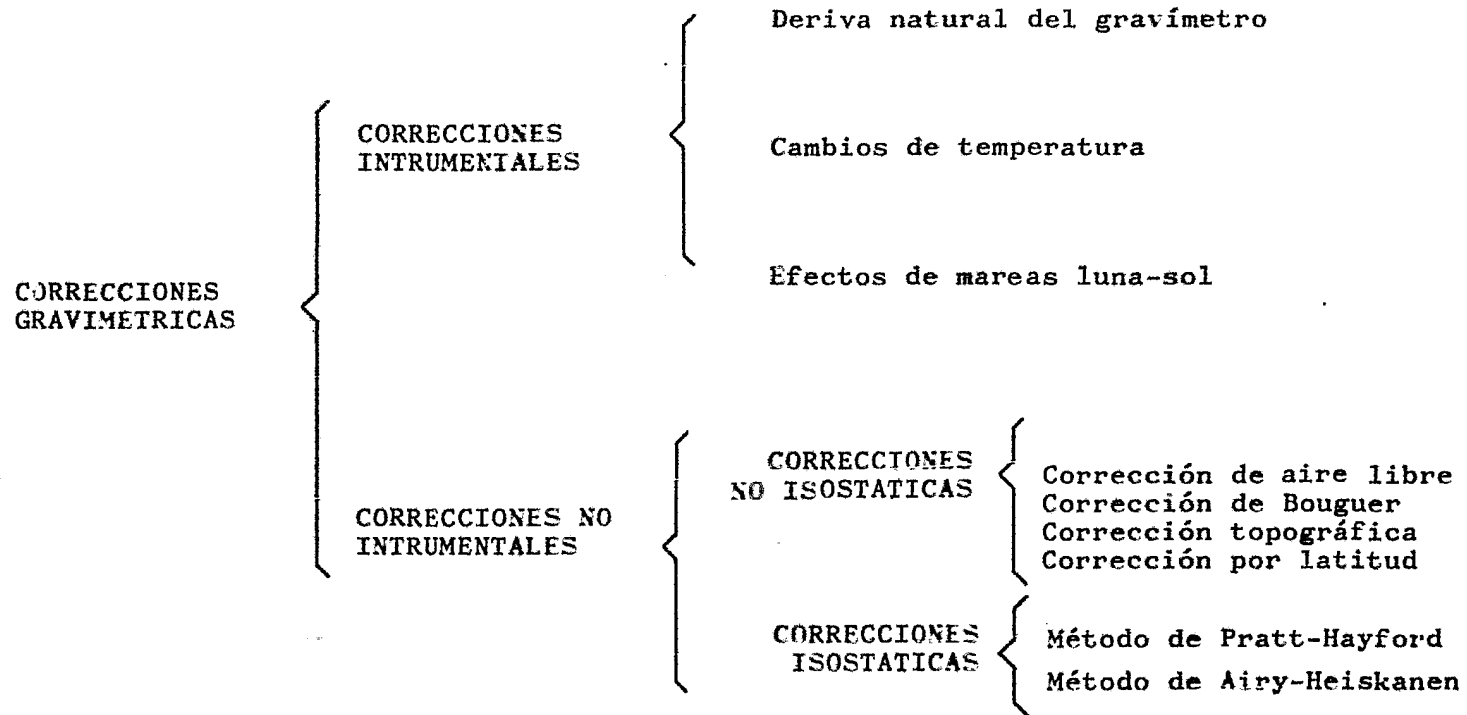
Suponiendo que el gravímetro no presenta ningún desperfecto y que ha sido sometido a todas las verificaciones correspondientes, las lecturas se verán alteradas por tres factores que se explican a continuación.

El primero, es debido a la deriva o declinación natural de los componentes del gravímetro. Esta alteración, es corregida mediante el uso de las gráficas de deriva ya explicadas, ya que, si ésta es excesiva, deberá ser corregida en un laboratorio.

El segundo factor, es debido al efecto gravitacional luna-sol, sin embargo, ésta alteración en muchos casos, puede no ser tomada en cuenta ya que solo es considerada en trabajos de gran escala y para fines de investigación.

El tercer factor, se refiere a los cambios de temperatura que afectan los mecanismos del gravímetro. Este problema ha sido resuelto, en gran parte, por los fabricantes de equipo de medición, los cuáles han diseñado el gravímetro en forma tal que pueda ser mantenido al vacío en empaques sellados, los cuáles en algunos casos, cuentan con un

ESQUEMA No. I  
CLASIFICACION DE LAS CORRECCIONES  
GRAVIMETRICAS .



compensador térmico que responde a cambios de temperatura de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Otros fabricantes proveen de tablas en las que se puede encontrar el valor de la constante, para diferentes temperaturas.

## 2. Correcciones no instrumentales.

### 2.1 Correcciones no isostáticas.

#### 2.2.1 Corrección de aire libre.

Debido a la topografía del terreno, resulta evidente que las estaciones gravimétricas se encuentren a diferentes alturas, por lo que se hace necesario considerar un plano de referencia, ya que de lo contrario, los datos indicarían estructuras que en realidad no existen, debido a que la gravedad varía con el inverso de la distancia.

La aceleración de la gravedad (Telford, 1976), está dada por:

$$g = \frac{F}{m^2} = -\gamma \frac{M_e}{R_e^2} r^1 \text{----- (1)}$$

donde,  $M_e$  y  $R_e$  son la masa y el radio de la tierra respectivamente y  $r$  es la distancia al centro de la tierra.

Si se calcula la variación de  $g$  respecto de  $R_e$ , obtenemos:

$$\frac{dg}{dR_e} = \frac{2 \gamma M_e}{R_e^3} \text{----- (2)}$$



lo cuál, en forma aproximada puede ser expresado como:

$$\frac{dg}{dRe} = -\frac{2g}{Req} \approx -0.3086 \text{ m gal / Km} \text{ ----- (3)}$$

El signo negativo implica que la corrección por aire libre será sumada cuando la estación se encuentre por encima del plano de referencia y restada en caso contrario.

Es común tomar como plano de referencia el nivel del mar, particularmente en trabajos de investigación, pero en la exploración se toma cualquier nivel de referencia.

Esta corrección recibe su nombre, debido a qué, no toma en cuenta la atracción que produciría el material entre la estación y el plano de referencia.

### 2.2.2 Corrección de Bouguer.

En esta corrección, a diferencia de la de aire libre, se toma en cuenta la atracción que ejerce el material que se encuentra entre la estación y el plano de referencia, considerando dicho material como si fuera una placa horizontal de espesor  $h$  y extensión infinita que pasa por el punto  $P$ , en el cuál se encuentra la estación (Fig. No. 11).

La atracción gravitacional en miligales producida por una placa de estas características está dada por -- (Dobrin, 1976)

$$g = 2 \pi \gamma \rho h \text{ ----- (4)}$$

en donde:

|          |                     |   |
|----------|---------------------|---|
| $\gamma$ | $66.07 \times 10^8$ | Constante de gravitación universal                            |
| $\rho$   |                     | Densidad media del área ( $\text{gr/cm}^3$ )                  |
| $h$      |                     | Altura entre la estación y el plano <u>de</u> referencia. (m) |

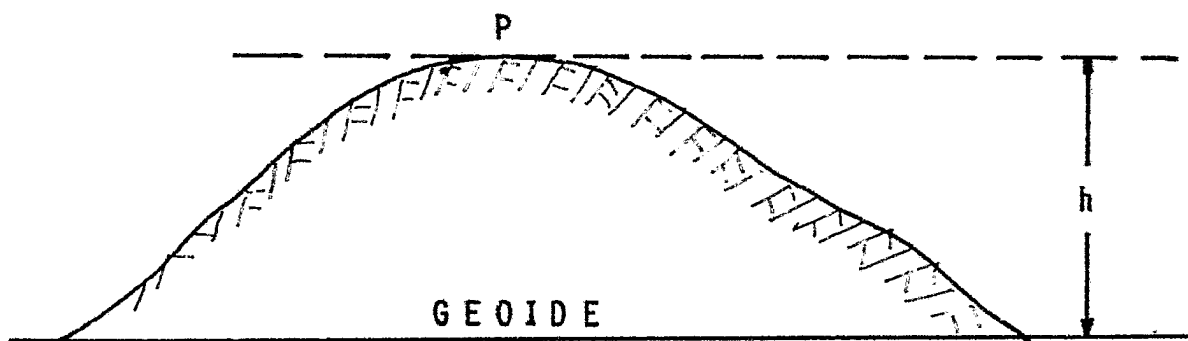


FIGURA No. II.

CAPA LONGITUDINAL INFINITA DE ESPESOR  
"h" y QUE PASA POR EL PUNTO "P".

substituyendo estos valores en la ecuación (4), obtenemos:

$$C_B = 0.04185Qh \text{ mgales} \text{-----} (5)$$

De acuerdo a lo anterior, la corrección de Bouguer será aplicada en sentido opuesto a la corrección de aire libre, es decir, será restada cuando la estación esté por encima del nivel de referencia y sumada en caso contrario.

Debido a que las correcciones de aire libre y de Bouguer, están en función de h, es común aplicarlas simultáneamente, llamandosele a esta corrección, corrección por altitud.

$$C.ALTITUD = (0.3086 - 0.04185Q)h \text{ mgales} \text{-----} (6)$$

La convención usada para h, es que, será positiva si la estación está por encima del nivel de referencia y negativa en caso contrario.

### 2.2.3 Corrección por latitud.

Debido a que la gravedad terrestre varía en razón inversa al cuadrado de la distancia hacia el centro de la tierra, si se efectúan mediciones a lo largo de un paralelo no habrá cambio en la gravedad, pero si en cambio, se hacen a lo largo de un meridiano, se tendrá una variación debida al cambio en el radio terrestre, es decir, la gravedad será máxima en los polos y mínima en el ecuador.

Es común aplicar esta corrección en áreas donde se tengan variaciones de latitud, de por lo menos 1 minuto, ya que en áreas más pequeñas el efecto en las lecturas es

considerado de poca importancia.

Cuando el esferoide terrestre es determinado a partir de mediciones de gravedad, se obtiene una fórmula mediante la cuál, pueden calcularse las variaciones de la gravedad con la latitud.

En el transcurso de los años, se han hecho diversas mediciones, y de éstas, la fórmula más aceptada por la Comisión Geodésica Internacional, es la llamada fórmula internacional de la gravedad, o fórmula de la gravedad teórica, la cuál está dada por:

$$g = 978.049 (1 + 0.0052884 \text{ sen}^2 \phi - 0.0000059 \text{ sen}^2 2\phi) \text{ gales} \dots (7)$$

en donde:

$g$  = Gravedad teórica en la latitud  $\phi$

$\phi$  = Latitud

978.049 = Gravedad en el ecuador ( $\phi = 0^\circ$ )

0.0052884 = Radio terrestre mayor

0.0000059 = Radio terrestre menor

Derivando la ecuación (7), respecto a la latitud  $\phi$ , obtenemos (Grant and West, 1976).

$$\frac{dg}{ds} = \frac{1}{R_e} \frac{dg}{d\phi} = \frac{1}{R_{eq}} \frac{dg}{d\phi} \approx 1.307 \text{ sen } 2\phi \text{ mgales/mile}$$

O BIEN

$$\frac{1}{R_{eq}} \frac{dg}{d\phi} \approx 0.8122 \text{ sen } 2\phi \text{ mgal/Km.} \quad \text{----- (8)}$$

en donde:

$ds$  = Distancia horizontal N-S

$R_e$  = Radio de la tierra en la latitud  $\phi$

$R_{eq}$  = Radio ecuatorial

Debido a que la gravedad se incrementa con la latitud, la corrección será sumada a medida que el desplazamiento sea hacia el ecuador.

Una forma práctica de obtener esta corrección para cada estación, es auxiliarse de tablas que calculadas para incrementos en  $\phi$  cada  $10^\circ$ , y dibujando una red de líneas E-W a través del mapa con un espaciamiento equivalente a incrementos en la gravedad de  $1 \text{ u.g.}$ , con lo que se consigue mayor facilidad en la interpolación.

En latitudes medias, donde se requiere una mayor precisión, será necesario reducir los intervalos de variación entre estas líneas.

#### 2.2.4 Corrección topográfica.

En muchos casos la topografía en el área cercana a la estación, es lo suficientemente plana como para efectuar solo la corrección por altitud, pero en algunas ocasiones, dicha área presenta depresiones o elevaciones que alteran significativamente las lecturas.

Lo anterior es representado en la Fig.No.12, en la cual se observa que, para la componente vertical de la atracción gravitacional, en el punto P, la componente  $\Delta g_z_1$  para la masa 1, hace que el gravímetro registre un efecto menor, siendo necesario sumar ésta diferencia al valor medido en P. Por otra parte,  $\Delta g_z_2$  es un efecto que se restó de más al hacer la corrección de Bouguer, el cuál es necesario sumarlo al valor obtenido en P. En esta forma, debido a que el efecto de la topografía en ambos casos, se opone a la gravedad en el punto, la corrección topográfica será sumada.

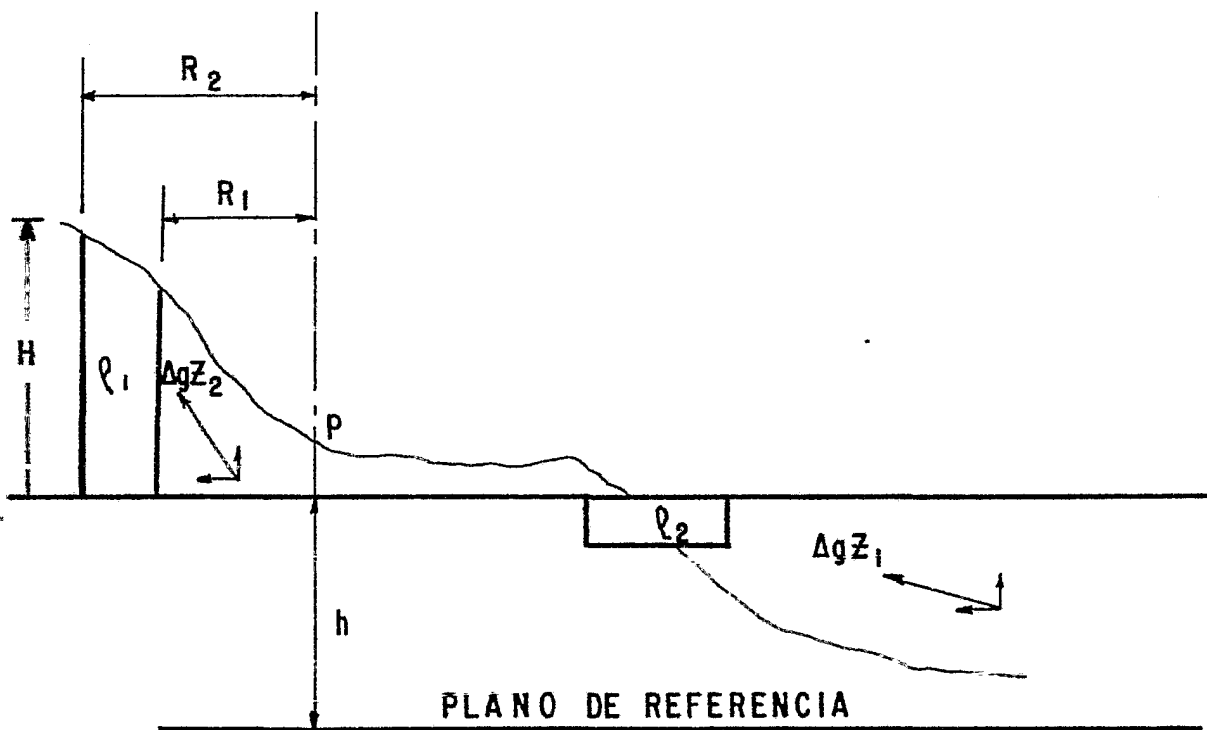


FIGURA N<sup>o</sup>. 12 .

CORRECCION TOPOGRAFICA .

El procedimiento para hacer esta corrección, consiste en calcular la atracción de la masa teórica necesaria para rellenar las depresiones, así como la que sería necesario suprimir en las elevaciones, para originar una superficie plana con la misma elevación en cada estación.

En la práctica se han desarrollado diversos métodos para facilitar el cálculo de esta corrección, ya que sería extremadamente difícil hacerla mediante el uso de elementos topográficos irregulares.

De estos métodos, el más usado es el propuesto por Hammer, el cual consiste en dividir el área cercana a la estación en anillos cilíndricos concéntricos denotados por las letras D, E, F, G, H, (Fig. No.13), cuyo centro coincide en la estación, los cuáles a su vez, están divididos en compartimentos cuya área se incrementa a medida que se alejan del centro, teniendo así, para cada uno de los anillos un radio interior y exterior;  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente.

Es decir, el área es dividida en anillos concéntricos superficiales y se calcula su efecto por zonas, superponiendo las que se conocen como plantillas de Hammer en cada una de las estaciones (Fig. No.13).

La atracción para un anillo concéntrico está dada por:

$$g = 2\pi \gamma \rho \left[ \sqrt{R_1^2 + h_2^2} - \sqrt{R_1^2 + h_1^2} - \sqrt{r_2^2 - h_2^2} + \sqrt{r_2^2 + h_1^2} \right] \quad (10)$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son los radios externo e interno de acuerdo a la Fig. No.13.

Si en la ecuación (9), hacemos  $h = 0$ , tendríamos un anillo extendiéndose hasta la superficie, cuyo efecto en un anillo  $n$  estará dado por:

$$\frac{g}{R} = \frac{2\pi \gamma \rho}{R} \left[ \sqrt{R_1^2 + h_2^2} - \sqrt{R_2^2 + h_2^2} + r_2 - r_1 \right] \quad (11)$$

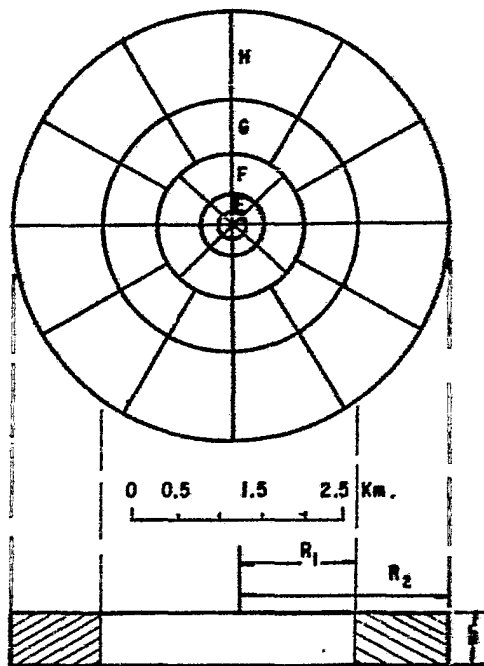


FIGURA Nº. 13 .

PLANTILLA DE HAMMER PARA LA CORRECCION  
TOPOGRAFICA .



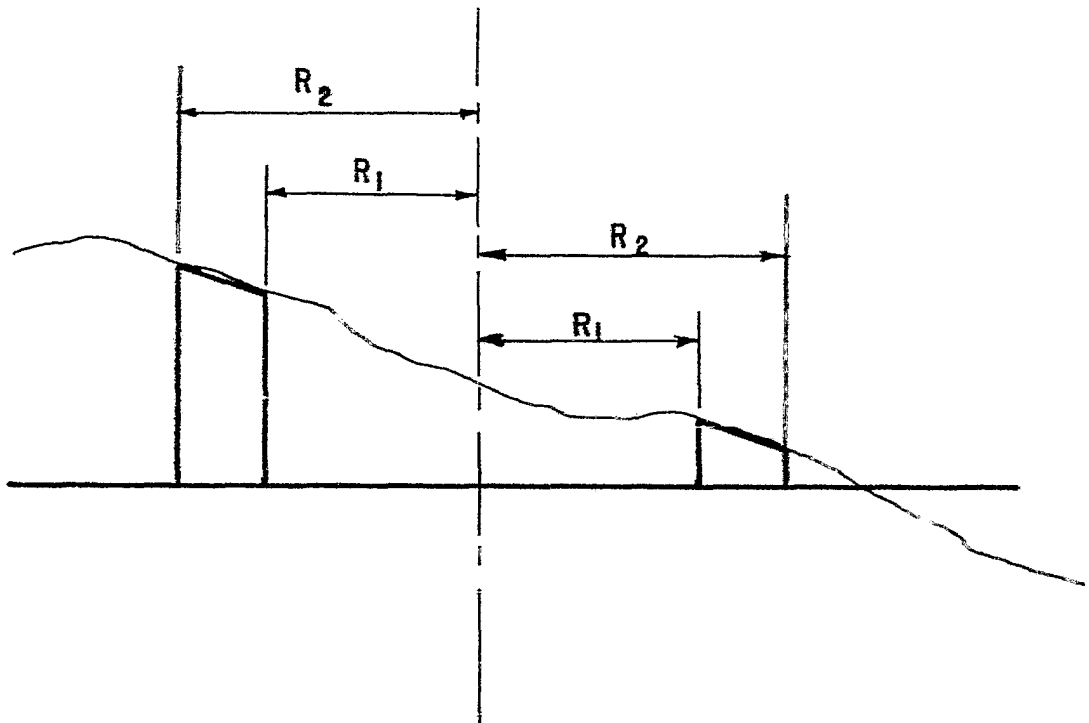


FIGURA N<sup>o</sup>. 14 .

CORRECCION TOPOGRAFICA  
 ELEMENTOS TOPOGRAFICOS CON LA PARTE SUPERIOR  
 AJUSTADA A LA PENDIENTE TOPOGRAFICA .

les:

- 1) Dependiendo del carácter del estudio, se deberá contar con planos topográficos de buena calidad en los que se tengan curvas de nivel a una escala conveniente.
- 2) Es necesario obtener siempre una buena aproximación de la altura promedio del sector a calcular, ya que de esto depende el grado de exactitud en el cálculo de esta corrección.
- 3) Un último factor que afecta tanto a la corrección de Bouguer, como a la corrección topográfica, es la elección de una densidad de corrección adecuada, debido a que, una densidad incorrecta provocaría anomalías inexistentes.

En la última década, se han desarrollado métodos aplicables en computadoras, haciendo con esto, más eficiente el cálculo y aumentando el grado de aproximación. Dichos métodos consisten básicamente en aproximar la topografía mediante prismas de distintas formas, cuyo efecto gravimétrico es calculado en forma interativa (Hernández, Tesis Profesional 1978).

## 2.2 Correcciones isostáticas.

Las características y fines de algunos estudios gravimétricos hacen que deba considerarse, además de las correcciones no isostáticas, una corrección adicional que tome en cuenta el equilibrio isostático del área.

Los diferentes métodos para la corrección isostática sustraen el efecto de la masa arriba del nivel del mar y lo insertan directamente abajo para eliminar las raíces de las montañas, o bien, las antiraíces en los océanos.

Las diferentes formas que existen en la aplicación de esta corrección, dependen del modelo isostático propuesto.

### 2.2.1 Método de Pratt-Hayford.

El método recibe este nombre debido a que se basa, por una parte, en el modelo isostático de Pratt, y por otra, en la interpretación y cálculos hechos por Hayford. El método puede resumirse en la siguiente forma:

- a) La compensación isostática es uniforme, es decir, la densidad bajo las montañas es uniformemente menor en comparación con la densidad bajo las tierras de poca elevación, la cuál es uniformemente mayor. (Fig. No.15).
- b) La capa en la que se mantiene el equilibrio isostático, es uniforme y se localiza directamente bajo las montañas a una profundidad constante D (Fig. No.15).
- c) La densidad  $\rho$  de una sección con elevación topográfica h, y la densidad  $\rho_1$  de la sección con elevación al nivel del mar D, satisfacen la ecuación:

$$D = (D + h) \rho_1 \quad \text{----- (13)}$$

es decir:

$$\Delta \rho = - \frac{h \rho_1}{D} \quad \text{----- (14)}$$

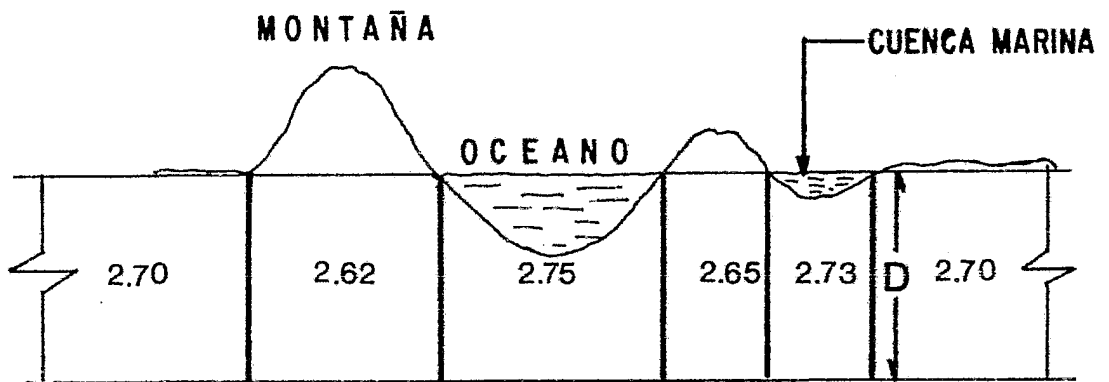


FIGURA N<sup>o</sup>. 15 .

MODELO DE PRATT-HAYFORD

Esta corrección se aplica en forma similar a la corrección topográfica, solo que en este caso, Hayford introdujo un sistema de zonas circulares de distintos radios, y divididas en zonas, debiendo calcular para cada zona la atracción vertical ejercida por la topografía y su correspondiente compensación isostática. La corrección mediante este método puede ser aplicada hasta una distancia de 30 Km., sin tomar en cuenta la curvatura de la tierra. Para distancias entre 30 y 170 Km., el efecto es considerado de poca importancia y puede ser corregido mediante tablas en donde se encuentra tabulado.

Para grandes distancias se emplean fórmulas esféricas, ya que a una distancia de 170 Km., el punto que se esté considerando estará a 1370m., abajo del plano horizontal que contiene a la estación.

#### 2.2.2 Método de Airy-Heiskanen.

Al igual que el método anterior, Heiskanen perfeccionó los cálculos para el modelo de Airy usando fórmulas planas para las zonas cercanas a la estación.

Este método se encuentra entre los más modernos y es considerado como una combinación de los modelos básicos de Airy y Pratt; admite la existencia de bloques de distinta densidad y longitud, tomando en cuenta la variación de la densidad con la profundidad. El método de Airy-Heiskanen puede resumirse en la siguiente forma:

- a) La compensación isostática es completa y local, es decir, la corteza terrestre es considerada como una capa rígida que flota en un

sustrato plástico (magma) de mayor densidad, lo que implica que, por debajo de las montañas la base de la corteza habrá penetrado más en el sustrato de una llanura cercana al nivel del mar; las ligeras raíces de los continentes y las pesadas raíces de los océanos compensan las masas topográficas (Fig. No. 16).

- b) Las densidades de la corteza y el sustrato son constantes e iguales y tienen un valor de  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  y  $3.27 \text{ gr/cm}^3$  respectivamente.

### 2.2.3 Discusión.

El modelo de Pratt-Hayford que considera a la densidad como uniforme en cualquier columna por encima del nivel de compensación, es considerado como una aproximación burda, puesto que datos geológicos y sismológicos indican una distribución de las densidades de las rocas más compleja.

Hayford al ensayar algunos valores de profundidad del nivel de compensación, partiendo de la teórica de Pratt, encontró un valor de 113.7 Km., y sin embargo, Heiskanen, partiendo de la teoría de Airy encontró un espesor para la corteza entre 30 y 40 Km., cerca del nivel del mar, los que concuerdan más con los datos sismológicos disponibles.

Desde un punto de vista geológico, el modelo de Airy y los cálculos ensayados por Heiskanen, son los más apegados a la realidad, puesto que se basan en la variación de la densidad con la profundidad, asignando un gradiente de  $0.004 \text{ gr/cm}^3$ , por cada kilómetro de profundidad en las rocas de la superficie y  $0.002 \text{ gr/cm}^3$ , en materiales con mayor densidad; el cálculo de este gradiente se hace en forma

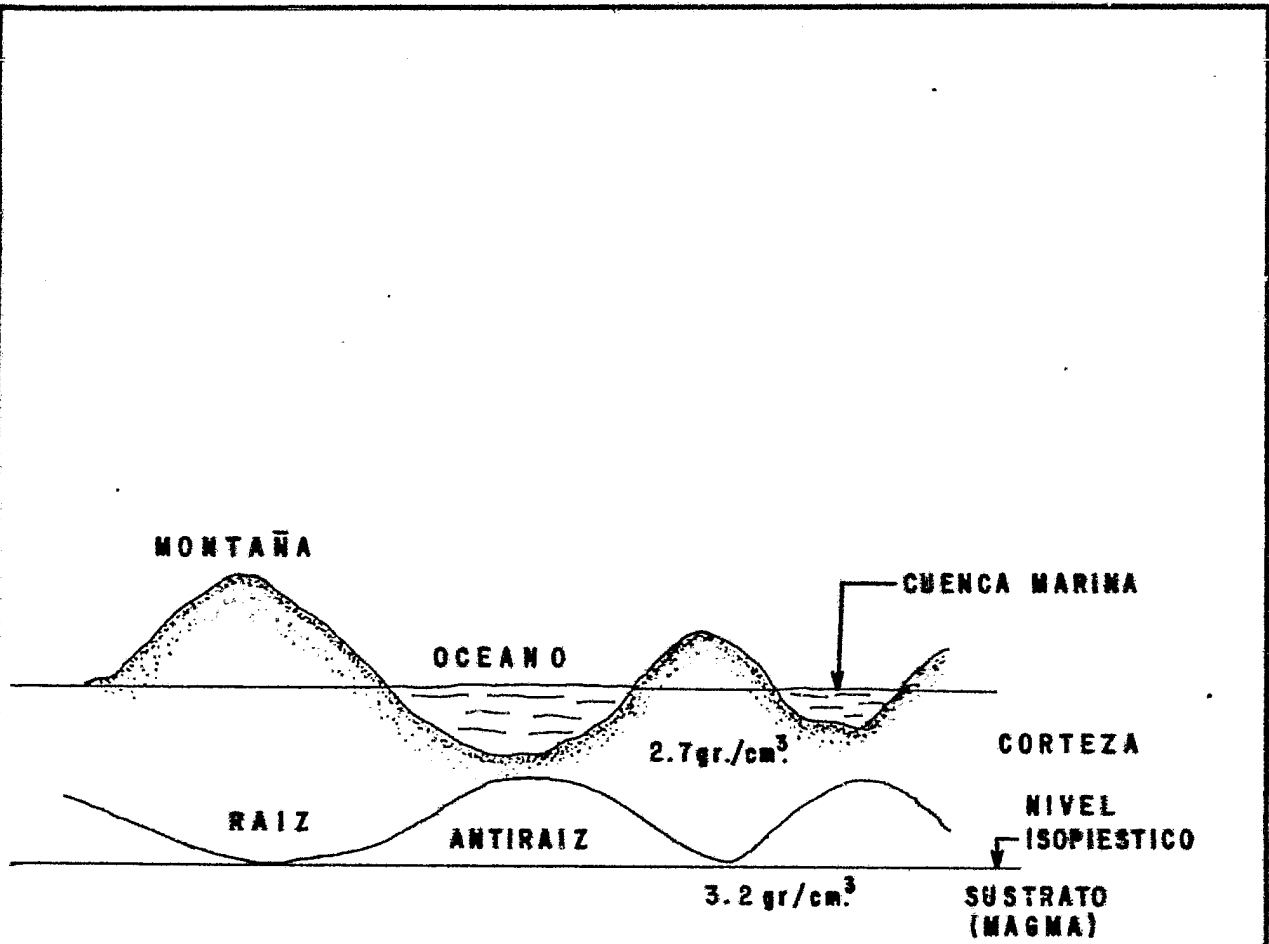


FIGURA N<sup>o</sup>. 16.

MODELO DE AIRY-HEISKANEN.

en donde h es la elevación promedio del área, para un anillo y un compartimento dados.

Para facilitar el cálculo, Hammer ha publicado tablas en las que se ha calculado esta corrección, en función de la elevación media de cada compartimento arriba o abajo de la estación, suponiendo para ello una densidad de  $\rho = 2.0 \text{ gr/cm}^3$ .

De acuerdo a lo anterior al aplicar la corrección topográfica con este método, se debe tener en cuenta la relación de la densidad promedio respecto a la densidad de referencia, es decir,

$$C_T = C_{TC} \frac{\rho_P}{\rho_V} = C_{TC} \frac{\rho_P}{2} \quad \text{-----(12)}$$

en donde:

$C_T$  = CORRECCION TOPOGRAFICA FINAL.

$C_{TC}$  = CORRECCION TOPOGRAFIA CALCULADA CON LA PLANTILLA.

Una variante de este método, es aplicada en los casos en que el terreno presenta una pendiente constante, la cual se aproxima mediante elementos topográficos cuyo plano superior tiene la misma pendiente (Fig.No.14).

En estos casos, en vez de estimar la corrección mediante las tablas de Hammer, se usan las calculadas por Sendberg, las cuales están previstas para todas las pendientes de números enteros comprendidas entre  $1^\circ$  y  $30^\circ$  inclusive. Estos métodos deben considerar tres factores esencia -



independiente de las mediciones de la gravedad.

Este método afirma la existencia de un número infinito de posibles distribuciones de masas y en consecuencia, de densidades.

En algunas regiones tectónicamente activas, las anomalías son casi siempre de gran intensidad, lo que sugiere que las fuerzas tectónicas son capaces de romper el equilibrio isostático. Si en un área se puede asumir que no hay influencias dinámicas que causen que se encuentre fuera de equilibrio isostático, entonces el modelo con el que se calculó la anomalía isostática promedio mínima, podría indicar en gran parte, el tipo de mecanismo isostático de compensación de dicha área.

Cualquier anomalía isostática que no pueda interpretarse por distribuciones razonables de densidad, constituye una desviación de la tierra de su equilibrio isostático.

En la actualidad continúa aún el desarrollo de nuevos métodos e hipótesis que se ajusten más a la realidad, tendiendo cada vez más a la automatización de los cálculos.

### 3. Cálculo de la densidad de corrección.

Este cálculo es considerado tan importante como las mediciones mismas, debido a que, este valor se aplica tanto en la corrección topográfica, como en la corrección de Bouguer.

Toda la precisión que se haya alcanzado en las me

diciones con el gravímetro, será en vano si el cálculo de la densidad representativa del área o densidad de corrección, no ha sido efectuado con la precisión adecuada.

Una forma común de estimar dicha densidad es haciendo mediciones en muestras de material superficial. Este método de cualquier modo, no es satisfactorio para la precisión que se requiere en un levantamiento gravimétrico, ya que las densidades de las muestras superficiales individuales varían en un rango muy extenso, y sería necesario un gran número de muestras para tener un valor promedio adecuado. Además, a menudo es difícil obtener dichas muestras, las que con frecuencia, se encuentran muy por debajo de la superficie, para que las obtenidas, puedan ser representativas del material rocoso del área; lo anterior es particularmente cierto si existe alternancia de miembros de la formación duros y suaves, ya que los segundos, generalmente arenas, pueden tener una cubierta exterior dura, lo cuál generalmente se presenta como una pequeña fracción de la sección total.

Existen otros métodos para calcular con mayor precisión dicha densidad, los cuáles pueden ser analíticos o gráficos, y de éstos, los más usados son el de mínimos cuadrados y el de Nettleton (1939).

Dichos métodos parten de un punto en común, éste es, la obtención de la densidad de corrección mediante un perfil gravimétrico a través de un accidente topográfico, que puede ser una loma de pendientes suaves. La loma seleccionada, no deberá estar asociada con estructuras geológicas que pudieran causar una anomalía gravimétrica coexistiendo con el accidente topográfico en sí.

Es recomendable además, que los perfiles o líneas

de densidad no crucen contactos geológicos, debido a que la curva mostrará en diferentes partes un cambio real en la densidad del material muestreado. Si las condiciones son favorables, es preferible hacer perfiles de densidad a lo largo de cuerpos homogéneos y sobre capas expuestas de diferente litología.

Desde un punto de vista operativo, el accidente topográfico seleccionado deberá tener una cima suave con un relieve de 50 a 150 ft. y un ancho de .5 a 1 millas (Nettleton, 1939).

### 3.1 Método de Nettleton.

Este método consiste en hacer mediciones de ida y regreso a través de una loma de pendientes suaves y dibujar dichos perfiles con sus respectivas correcciones de latitud y aire libre, calculando la corrección Boguer con diferentes densidades. De esta forma, el perfil gravimétrico que más se aproxima a una línea recta, será el calculado con la densidad más representativa del área (Fig. No. 17.).

La ventaja de este método es que, en muchas ocasiones, se puede suponer que el gradiente vertical, la densidad y la calibración del gravímetro, son constantes para el total del área para la cuál un perfil de densidad dado es considerado representativo.

Además, la densidad determinada mediante este método, es tal que los efectos producidos por una elevación aparente son reducidos a un mínimo y aún, suponiendo un error en la calibración del equipo, los valores de densidad determinados, tendrán un error constante con respecto a la densidad verdadera del área.

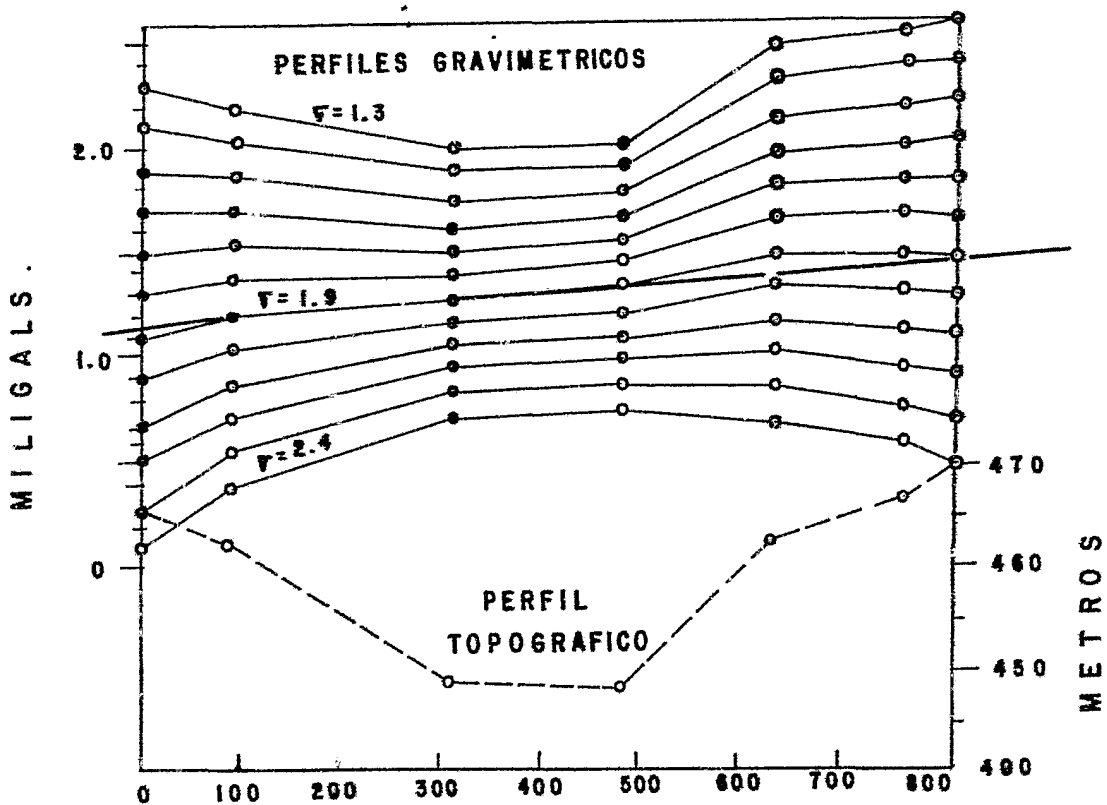


FIGURA N<sup>o</sup>. 17.

METODO DE NETTLETON.

COMPARACION DEL PERFIL TOPOGRAFICO CON  
 PERFILES GRAVIMETRICOS CALCULADOS CON  
 DIFERENTES DENSIDADES .

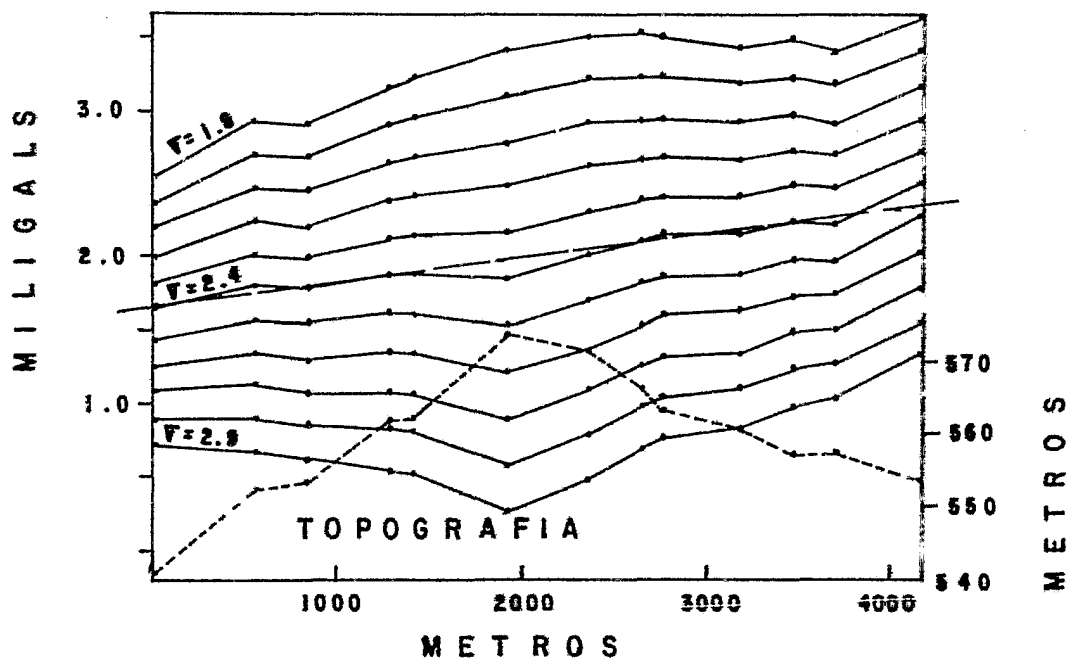


FIGURA No. 18  
 METODO DE NETTLETON PERFIL  
 SELECCIONADO CON  $V = 2.4$

Con frecuencia se presenta el caso de que algunas estaciones no se ajustan a ninguna curva ni densidad (Fig. No.18), teniendo diferencias de algunas décimas de miligal. En estos casos, la experiencia indica que éstas irregularidades son causadas por inhomogeneidades reales en el material rocoso, siendo preferible ignorar dichos puntos y tratar de ajustar los demás en una línea recta.

### 3.2 Método de mínimos cuadrados.

#### 3.2.1 Algunas definiciones.

De los métodos analíticos, éste es uno de los más usados y como en el método anterior, parte también, de los perfiles gravimétricos, solo que en éste caso, la densidad es determinada a partir de una aproximación lineal de mínimos cuadrados.

Con el objetivo de dar una idea más clara se citan algunas definiciones usadas por éste método.

La observación de un determinado fenómeno, origina un número de observaciones que puede ser expresado en la forma:

$$X_1, X_2, X_3, X_4, \dots, X_n \quad \text{-----} (15)$$

el valor promedio o en su caso, el valor más probable estará dado por:

$$X = \frac{X + X + X + X + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{-----} (16)$$

dichos valores tendrán una desviación respecto al valor medio  $\bar{X}$ , la cuál es representada en la Fig. No. 19.

Es decir, la desviación  $d_i$  estará dada por

$$d_i = X_i - \bar{X} \quad \text{-----} \quad (17)$$

En estadística es costumbre usar el promedio cuadrático de esta desviación, a la que se le da el nombre de desviación standard o desviación cuadrática media, la cuál está dada por

$$V = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad \text{-----} \quad (18)$$

Por último, es evidente que al efectuar las mediciones se tendrá un error, el cuál es definido en función de la desviación standard y del número de observaciones en la siguiente forma:

$$\xi = \frac{V}{\sqrt{n}} \quad \text{-----} \quad (19)$$

### 3.2.2 Aproximación mediante mínimos cuadrados.

La aproximación mediante este método parte de la observación de un fenómeno físico, en este caso, la obtención de los perfiles topográfico y gravimétrico (Fig. No. 20).

Estas mediciones pueden ser representadas como un fenómeno de dos variables,  $\Delta h_i$  y  $\Delta g_i$  (Fig. No. 21.), y su comportamiento podrá ser aproximado mediante una ecuación, en este caso, la de una recta de la forma:

$$-Y = mX_i \quad \text{-----}(20)$$

Debido a que gráficamente se pueden ajustar muchas rectas, es necesario calcular la recta de pendiente óptima, que represente el comportamiento con un error mínimo, es decir, la desviación di deberá ser mínima.

En términos gravimétricos lo que se debe calcular es el valor óptimo de la pendiente k de la recta:

$$K = 3.086 - 0.4185 \rho \quad \text{-----}(21)$$

Para que dicha recta sea óptima, se deberá cumplir con la condición necesaria y suficiente implícita en este método:

$$\sum_{i=1}^n (d_i)^2 = \text{MINIMO} \quad \text{-----}(22)$$

en donde:

$$d_i = g_i - g \quad \text{-----}(23)$$

con el objetivo de una mayor claridad, se define a di como:

$$d_i = Y_i - Y \quad \text{-----}(24)$$

substituyendo la ecuación (24) en la (22), tenemos:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - Y) = \text{MINIMO} \quad \text{-----}(25)$$



pero, y, es la ecuación de la recta con la que se desea \_\_\_\_\_  
 aproximar (ecuación 20):

$$Y = m X_i \text{ -----(26)}$$

substituyendo la ecuación (20) en la (25) tenemos:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - m X_i)^2 = \text{MINIMO} \text{ -----(27)}$$

Debido a qué,  $Y_i$  y  $X_i$  son valores conocidos ( $\Delta$ gi y  $\Delta$ hi en nuestro caso), la variable a optimizar es  $m$  ( $k$  en \_\_\_\_\_  
 nuestro caso).

Para optimizar efectuamos el siguiente desarrollo:  
 Si:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - m X_i)^2 = \text{MINIMO} \text{ -----(29)}$$

entonces:

$$\frac{d}{dm} \sum_{i=1}^n (Y_i - m X_i)^2 = 0 \text{ -----(30)}$$

calculando la derivada:

$$2 \sum_{i=1}^n (Y_i - m X_i) (-X_i) = 0 \text{ -----(31)}$$

$$- \sum_{i=1}^n Y_i X_i + m \sum_{i=1}^n X_i^2 = 0 \text{ -----(32)}$$

$$m \cdot \sum_{i=1}^n X_i = \sum_{i=1}^n Y_i X_i \text{ -----(33)}$$

Despejando m en la ecuación (33), obtenemos:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \text{-----} (34)$$

la ecuación (34), es entonces la pendiente óptima de la recta mediante la cuál podemos aproximar las observaciones del fenómeno. En el caso que nos ocupa, la ecuación (34), puede expresarse en términos de gravedad y altura de la estación, en la forma:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta g_i \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i^2} \text{ U.G./m.} \text{-----} (35)$$

Donde k es la pendiente óptima definida en (21), que pasa por el origen, el signo negativo se debe tan solo, a la representación gráfica del fenómeno (Fig. No.20).

Si graficamente se observa que la recta que ajusta el mayor número de datos, no pasa por el origen, entonces se tendrán dos variables a optimizar; la pendiente k y la ordenada al origen denotada por  $\gamma$ , (Fig. No. 22).

Nuevamente, la condición necesaria y suficiente definida en la ecuación (22), deberá cumplirse, por lo que tenemos:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta g_i + K\Delta h_i + \gamma)^2 = \text{MINIMO} \text{-----} (36)$$

Procediendo en forma análoga al caso planteado en la ecuación (30), solo que, para este caso se deriva parcialmente respecto a cada una de las variables a optimizar, es decir:

$$\frac{\partial}{\partial K} \sum_{i=1}^n (\Delta g_i + K\Delta h_i + \gamma)^2 = 0 \text{-----} (37)$$

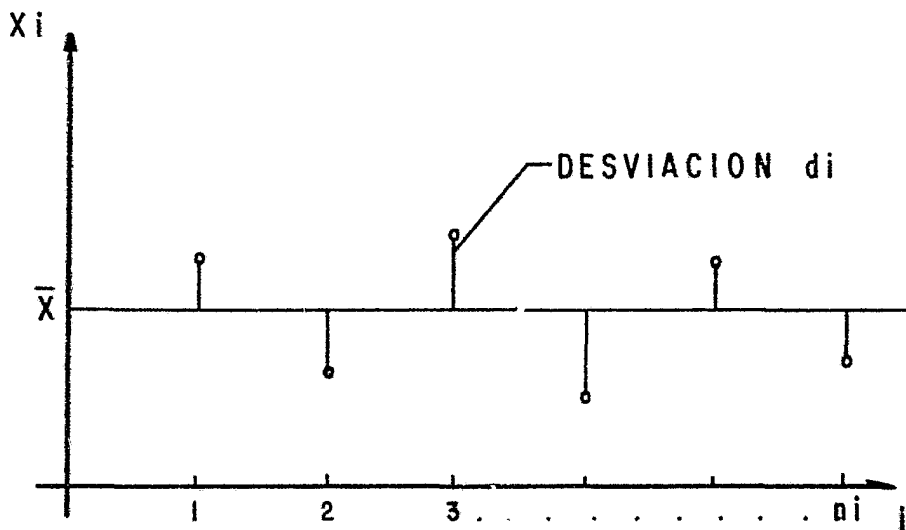


FIGURA N<sup>o</sup>. 19.  
DESVIACION DE LAS MEDICIONES RESPECTO AL VALOR MEDIO  $\bar{X}$

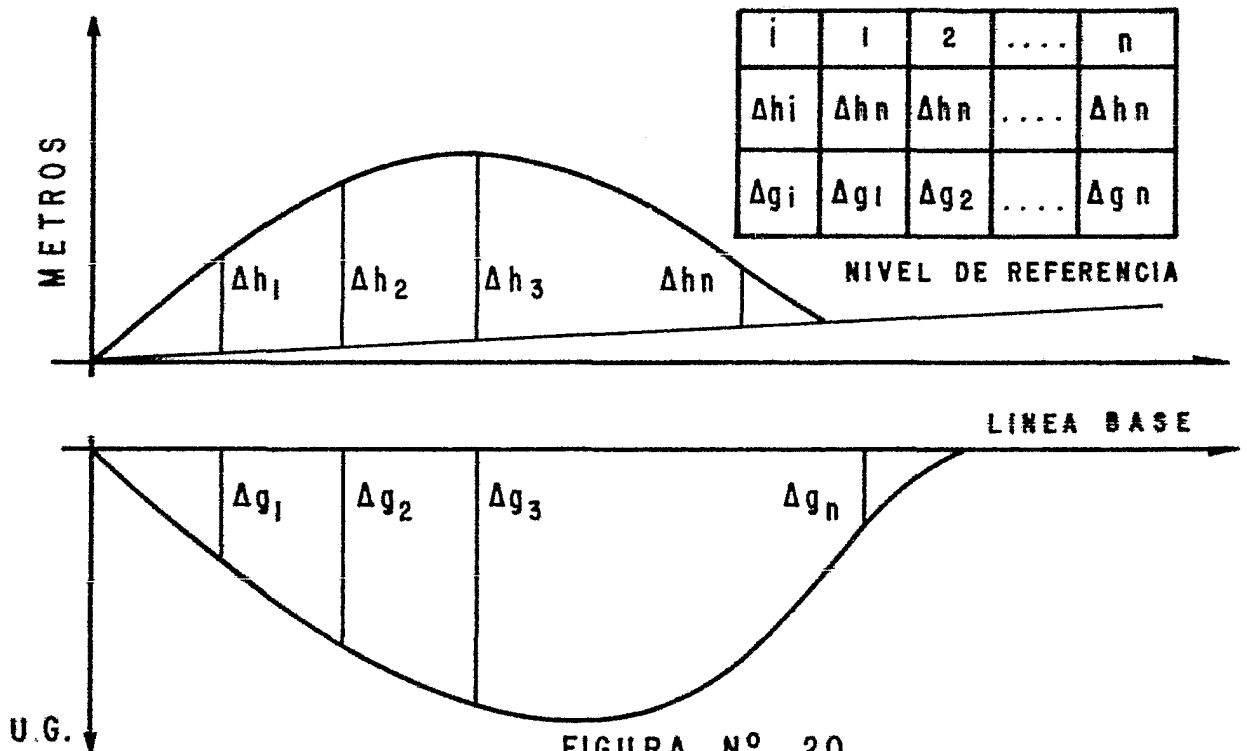


FIGURA N<sup>o</sup>. 20.  
MEDICION DE LOS PERFILES TOPOGRAFICOS Y GRAVIMETRICOS

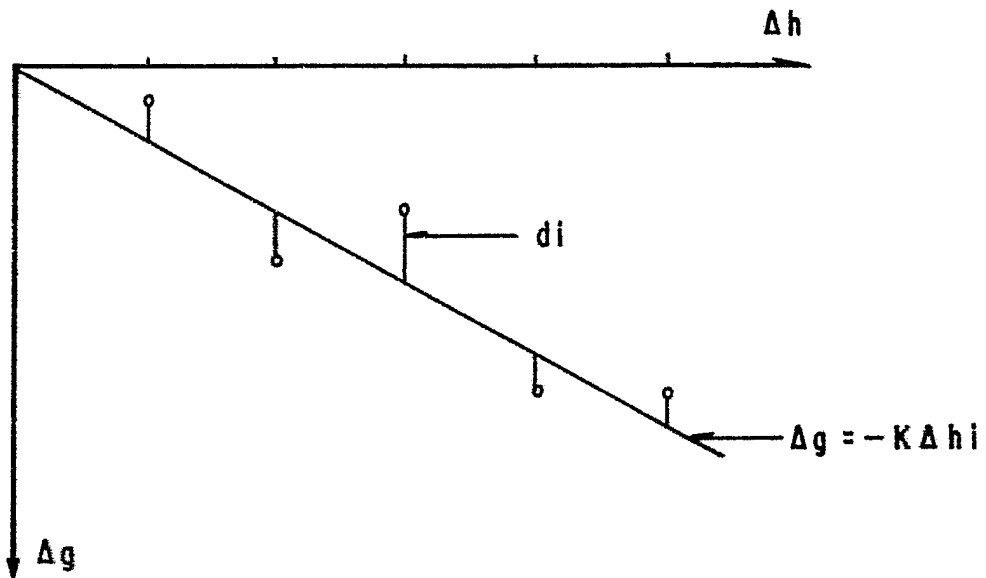


FIGURA N<sup>o</sup>. 21.  
 REPRESENTACION ANALITICA DEL FENOMENO.

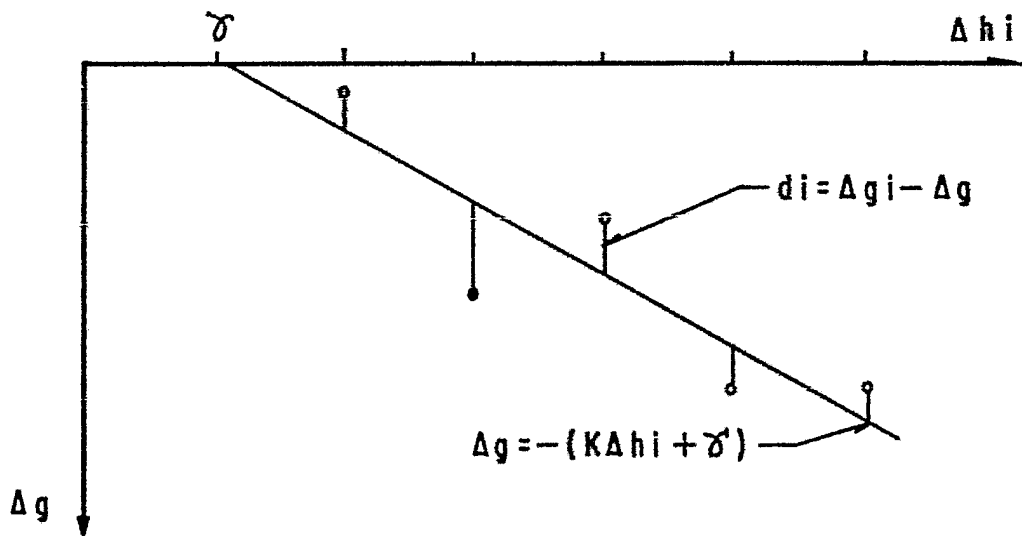


FIGURA N<sup>o</sup>. 22 .  
 RECTA OPTIMA CON ORDENADA AL ORIGEN .

$$\frac{\partial}{\partial \gamma} \sum_{i=1}^n (\Delta g_i + K \Delta h_i + \gamma)^2 \text{ ----- (38)}$$

Desarrollando el sistema de ecuaciones (37) y (38), tenemos:

$$2 \sum_{i=1}^n (\Delta g_i + K \Delta h_i + \gamma) (\Delta h_i) = 0 \text{ ----- (39)}$$

$$2 \sum_{i=1}^n (\Delta g_i + K \Delta h_i + \gamma) = 0 \text{ ----- (40)}$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta g_i \Delta h_i + K \sum_{i=1}^n \Delta h_i + \gamma \sum_{i=1}^n \Delta h_i = 0 \text{ ----- (41)}$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta g_i + K \sum_{i=1}^n \Delta h_i + \sum_{i=1}^n \gamma = 0 \text{ ----- (42)}$$

$$K \sum_{i=1}^n \Delta h_i + \gamma \sum_{i=1}^n \Delta h_i = - \sum_{i=1}^n \Delta g_i \Delta h_i \text{ ----- (43)}$$

$$K \sum_{i=1}^n \Delta h_i + \gamma n = - \sum_{i=1}^n \Delta g_i$$

el sistema de ecuaciones (43), es posible resolverlo para las variables  $k$  y  $\gamma$  aplicando la regla de Cramer, debido a que el determinante principal es diferente de 0:

$$K = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta g_i \Delta h_i & \sum_{i=1}^n \Delta h_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta h_i & - \sum_{i=1}^n n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2 & \sum_{i=1}^n \Delta h_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta h_i & n \end{vmatrix}} \quad (44)$$

desarrollando el determinante(44), obtendremos finalmente:

$$K = \frac{-n \sum_{i=1}^n \Delta g_i \Delta h_i + \sum_{i=1}^n \Delta g_i \sum_{i=1}^n \Delta h_i}{n \sum_{i=1}^n \Delta h_i - \left( \sum_{i=1}^n \Delta h_i \right)^2} \quad \text{V.g. / m.} \quad (45)$$

es decir, la ecuación (45), es la pendiente óptima de la recta con ordenada al origen  $\gamma$  definida en la ecuación (37).

En forma análoga, se calcula la ordenada al origen óptima  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2 & - \sum_{i=1}^n \Delta g_i \Delta h_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta h_i & - \sum_{i=1}^n \Delta g_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2 & \sum_{i=1}^n \Delta h_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta h_i & n \end{vmatrix}} \quad (46)$$

resolviendo el determinante (46), obtendremos:

$$\gamma = \frac{- \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2 \sum_{i=1}^n \Delta g_i + \sum_{i=1}^n \Delta h_i \sum_{i=1}^n \Delta g_i \Delta h_i}{n \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \Delta h_i \right)^2} \quad (47)$$

substituyendo la expresión obtenida para k, en las ecuaciones (35) y (45), según sea el caso, se obtiene finalmente, la densidad de corrección mediante una aproximación de mínimos cuadrados, en la cuál, el error estará definido como:

$$\rho = \frac{3.086 - K}{0.4185} \text{ gr/cm}^3 \quad \text{----- (48)}$$

$$0.67 \sqrt{\frac{l}{n} \left( \frac{\sum_{i=1}^n \Delta g_i^2}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i^2} \right)} \quad \text{--- K}^2 \text{ ERROR ----- (49)}$$

### 3.2.3 Cálculo de los incrementos de altura y gravedad ( $\Delta h_i$ y $\Delta g_i$ ).

Partiendo de la Fig. No.20, del perfil topográfico se observa que la línea base o línea de referencia de dicho perfil no siempre es horizontal, sino por el contrario, es común que presente cierta pendiente debido a que la última estación topográfica no está a la misma altura que la estación inicial. Dicha pendiente puede expresarse como:

$$\text{tg } \theta = \frac{X}{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n d_i} = K_t \text{ o } p \text{ ----- (50)}$$

Para calcular la altura de cada estación topográfica ( $\Delta h_i$ ), respecto a la línea base, será necesario restar en cada caso la distancia:

$$\text{DISTANCIA} = K_t \text{ o } p \cdot d_i \text{ ----- (51)}$$

con lo que, la expresión para el término  $\Delta h_i$  finalmente queda:

$$\Delta h_i = \sum_{i=1}^n h_i - K \cdot t \cdot o \cdot p \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (52)$$

donde:

$h_i$  = Altura respecto a la línea base del perfil topográfico, en la estación  $i$ .

$m$  = Número de estación en la cuál se calcula la altura.

Similarmente, para el cálculo del término  $\Delta g_i$  se observa que la línea base del perfil gravimétrico tendrá una pendiente definida por:

$$\tan. \alpha = \frac{X}{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{\sum_{i=1}^n d_i} = K \cdot \text{GRAV.} \quad (53)$$

quedando la expresión para el término  $g_i$  como:

$$\Delta g_i = \sum_{i=1}^m g_i - K \cdot \text{GRAV.} \cdot \sum_{i=1}^m d_i \quad (54)$$

donde:

$g_i$  = Incremento de gravedad para la estación  $i$ .

$m$  = Estación gravimétrica  $i$  para la que se calcula  $\Delta g$  respecto a su línea base.



## VI ANOMALIAS DE BOUGUER, REGIONAL Y RESIDUAL

### 1. Definiciones.

Habiendo aplicado las correcciones necesarias a las lecturas de campo, obtenemos finalmente el valor de anomalía de Bouguer, definida por la relación:

$$\begin{aligned} \text{Anomalia de Bouguer} = & \text{grav. observada} + \text{correc. aire libre} \\ & - \text{correc. Bouguer} + \text{correc. topográfica} \\ & - \text{grav. teorica.} \end{aligned}$$

La etapa final consiste entonces, en resolver el problema directo, es decir, encontrar la fuente que produce un cambio en el comportamiento del campo gravitacional en un área específica. Esto puede ser analizado a la luz de las siguientes definiciones.

La anomalía de Bouguer, es el resultado final de una serie de efectos gravimétricos provocados por el material existente abajo del nivel de referencia usado (M. en C. R. D. Navarro, 1981), Fig. No. 23. Dicho efecto es el resultado de dos componentes principales. La primera de ellas, es de tendencia suave y uniforme, cubriendo grandes extensiones, y es producida por el basamento o por inhomogeneidades propias del mismo; esta componente recibe el nombre de anomalía regional. La segunda componente es considerada como la más importante en la prospección, su tendencia es muy irregular, dando la impresión en algunos casos, de definir alguna estructura específica, y es provocada por estructuras locales y comparativamente someras en comparación con el basamento, dicha componente es definida como anomalía residual.

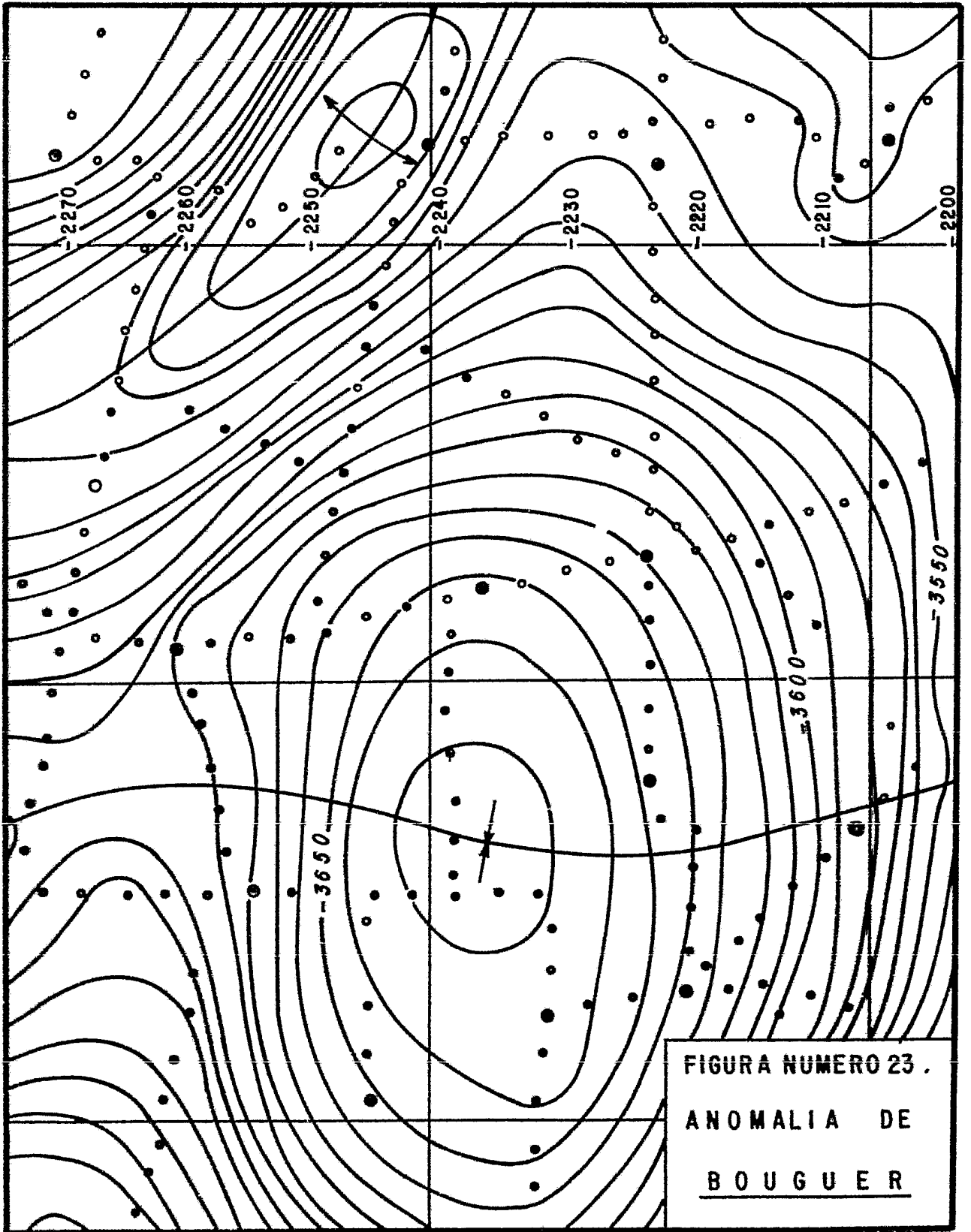


FIGURA NUMERO 23 .  
ANOMALIA DE  
BOUGUER

## 2. Métodos de separación.

El problema específico es separar la anomalía de Bouguer en sus dos componentes: regional y residual.

Los primeros tratamientos a un regional fueron hechos mediante curvas sin variación sin embargo, recientemente han sido desarrollados métodos que dependen del tratamiento numérico del valor en puntos en un orden regular.

Antes de analizar los métodos de separación, se debe tomar en cuenta un aspecto muy importante, éste es, la incertidumbre inherente a los métodos geofísicos que miden campos naturales o inducidos (métodos gravimétricos, eléctricos, magnéticos y radiométricos), los cuáles, no podrán tener una solución exacta debido a la propia definición de un campo potencial, es decir, dada una función de distribución de gravedad sobre la superficie de la tierra, o cualquier otro nivel de referencia, no es posible justificar las variaciones de dicha función, mediante una distribución de masa que pueda ser considerada como única.

Cuando el estudio gravimétrico se hace apoyado en estudios geológicos de buena calidad, existirá un mayor número de parámetros que puedan ser fijados y, por tanto, la incertidumbre en la solución será menor.

Esta incertidumbre no depende de la separación o precisión de las mediciones, ya que entre más espaciadas estén las observaciones, mayor será el rango de posibles soluciones, sin embargo, un espaciamiento menor no eliminará la incertidumbre fundamental en los métodos basados en la medición de campos naturales.

Dentro de los métodos para la separación de las componentes regional y residual se distinguen dos grandes

grupos, 1) métodos gráficos y 2) métodos analíticos, a los cuáles se les han dado nombres de "Smothers" y "Gridders" respectivamente (Staalund, 1952).

## 2.1 Métodos gráficos.

Este primer grupo considera que el regional esta compuesto por efectos demasiado oscuros o demasiado claros, o bien, demasiado grandes, para que puedan ser representativos de estructuras de algún interés.

El residual es considerado simplemente, como el resultado gráfico obtenido a partir de restar a la anomalía de Bouguer, el efecto regional.

La naturaleza del mapa residual estará en función de la experiencia individual, ya que de esta depende inicialmente, la elección del regional más adecuado.

Existen básicamente tres formas de aplicar este método, de acuerdo con las características del mapa de anomalía de Bouguer y el grado de precisión deseado.

El primer método es considerado como el más simple y consiste en dibujar contornos de igual valor, los cuales son restados del mapa de anomalía de Bouguer. Posteriormente dichos valores son configurados a través de las intersecciones entre las configuraciones de Bouguer, y regional, obteniéndose en esta forma, una configuración del efecto residual. Este método puede ser útil en los casos donde se presentan formas residuales agudas, y en donde el tren de residuales tiene una tendencia totalmente diferente al regional, sin embargo, cuando la tendencia de los residuales es muy semejante a la regional, no se aprecian resultados claros.

El segundo método consiste en trazar secciones a lo largo de líneas aproximadamente perpendiculares a la dirección de las estructuras geológicas, cuya presencia pueda ser determinada en el mapa de anomalía de Bouguer. Sobre estas secciones, se trazan curvas para determinar los contornos regionales; si los perfiles están bien definidos, es posible correlacionar caracteres residuales de un perfil a otro, o bien, en la configuración regional, es posible interpolar un valor para cada estación y restarlo del valor de anomalía de Bouguer, obteniéndose así, una configuración de valores de residual con estas diferencias.

El tercer método contiene una pequeña, pero importante variante respecto al segundo, en este caso, se trazan secciones sobre una red de líneas que se intersectan. Si el control en las líneas observadas es bueno, la red de líneas, para trazar las secciones, puede estar en un arreglo simétrico, aunque la localización de dichas líneas puede estar determinada por las mismas observaciones o por la forma de la configuración original. En este método; los valores en cada punto de intersección pueden ajustarse o modificarse, con el objetivo de obtener el regional más adecuado.

No obstante que los ajustes de estos valores son totalmente empíricos, son de gran utilidad cuando los campos regionales son muy complicados, debido a que dichos ajustes se realizan en tres dimensiones.

Todos estos métodos dependen, en alto grado, de la experiencia y juicio de la persona que los aplica.

## 2.2 Métodos analíticos.

Estos métodos se basan, principalmente, en una va

riedad de operaciones numéricas con las cuáles, es posible aislar en forma automática, mediante cálculos iterativos, los efectos regionales. Se agrupan en dos grandes ramas; a) empíricos y b) analíticos, y consisten básicamente, en la obtención de un promedio de valores observados en un radio dado, asignandolo a la respectiva estación. Si los valores interpolados o las observaciones, están en un arreglo regular, este método es denominado de "rejilla cuadrada" en la cuál se hace variar la longitud por lado.

Resulta evidente que, en cualquiera de estos métodos, la naturaleza del residual resultante dependerá directamente, del número de puntos promediados y del radio del círculo.

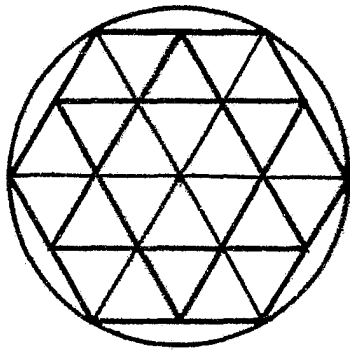
Debido a lo empírico de estos métodos, existe una gran variedad de rejillas que consideran diferentes longitudes de radios, así como número de puntos. Un ejemplo es presentado en la Fig. No.24, en dónde se presentan una rejilla cuadrada de 8 puntos y una de 6 puntos con líneas de  $60^\circ$ .

Sin embargo, estos métodos han hecho posible dar un fundamento matemático al uso de las rejillas descritas, (Peters, Ziel 1949, Elkins 1951).

Los desarrollos matemáticos han sido reducidos a esquemas prácticos de cálculo para determinar la longitud y número de radios a emplear.

### 3. Discusión.

La determinación de los coeficientes por los cuáles serán multiplicados los valores leídos de un mapa, involucren elecciones empíricas en algunos pasos del desarrollo matemático para su reducción al uso práctico.



REJILLA DE 6 PUNTOS CON LINEAS A 60°.

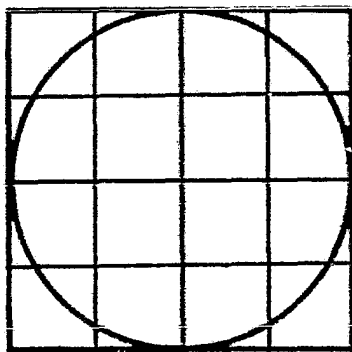


FIGURA N<sup>o</sup>. 24.  
REJILLA DE 8 PUNTOS.

Esto se manifiesta claramente en lo dicho por autores como:

Elkins, 1951:

" De lo anterior es evidente que cualquier número de juegos de coeficientes puede ser desarrollado. Sus méritos relativos pueden ser determinados solamente por la prueba de ellos ".

Peters, 1949.

" Estos métodos siendo aproximaciones, dan resultados que dependen en gran parte del espacio usado. Los resultados son más cualitativos en valor, pero estos métodos han probado ser algunas de las mejores armas útiles para la producción en masa de análisis ".

D. Navarro, 1981.

" Numerosos esquemas han sido usados para tratar los efectos regionales y una cierta sensación de misterio y oposición, pretenden haber llegado a rodear estos tratamientos. La ambigüedad fundamental, en el problema del regional no parece ser muy bien apreciado, aún en estas últimas fechas. Esto se demuestra por la variedad de esquemas para eliminar estos efectos regionales, los cuáles han sido derivados por diferentes personas en tiempos diferentes y particularmente, por la idea que prevalece de que algún esquema en particular es superior debido a su base matemática ".

Dentro de otro grupo de métodos analíticos, se encuentran los llamados de segunda derivada, los cuáles hacen uso directo de que estructuras someras, aún pequeñas, tienen tanta influencia en el gradiente gravitacional como la gravedad en sí. De acuerdo con esto, es factible esperar, que las estructuras locales se muestren más claramente en el mapa de una de las derivadas de  $\Delta g$  que en el mapa original. Este tipo de métodos, hacen posible la obtención de anomalías residuales cuya tendencia hace que los métodos tradi--



cionales fallen.

En la práctica, las derivadas son calculadas de los valores de anomalía de Bouguer y si las estaciones están distribuidas simétricamente, el cálculo podrá ser hecho en computadora.

Sin embargo, los resultados de estos métodos tienen la desventaja de ser difíciles de interpretar, debido a que los errores son incrementados en cada diferenciación, por lo que este método debe ser siempre complementario y nunca sustituto de otros métodos en la separación de los efectos regionales y residuales.

La teoría y aplicación de este método, se encuentran desarrollados en la literatura concerniente al caso (Wrand and West, "Interpretation theory in applied Geophysics", 1965 p.225; W.M. Telford, "Applied Geophysics", 1976, p.53 ).

## COMENTARIOS.

Debido a la ambigüedad implícita en los métodos de exploración que emplean campos potenciales, es importante \_mencionar, que en el caso de la prospección gravimétrica, \_ toda interpretación deberá siempre ajustarse al mayor número de datos geológicos confiables de que se disponga, ya que de lo contrario, no se tendrá la adecuada correlación entre los mapas geológicos y de anomalías para que el estudio pueda tener un uso práctico.

Resulta clara la importancia que representa la obtención de los datos de campo siempre con el mínimo error, y dentro de las tolerancias adecuadas, ya que de esta forma, \_ podrán efectuarse tantas interpretaciones como sea necesario, variando tan sólo la densidad promedio del área y el tipo de filtrado para separar efectos anómalos, o bien, en los casos en que se considere necesario, aplicar correcciones adicionales con el fin de evitar algún efecto que no fué considerado en interpretaciones anteriores.

El hecho de que el método gravimétrico no sea determinante, hace que en la mayoría de los casos, sea usado \_ como un método de primera aproximación para determinar \_ zonas de algún interés, en el caso más desfavorable, y, tratándose de objetivos someros, como un método de buena resolución, debido a que, en gran número de casos, el método de \_ prospección gravimétrica es comparativamente más rápido y eficiente que otros métodos geofísicos de exploración con mayores necesidades de personal y equipo de medición.

## BIBLIOGRAFIA

- F.S. Grant; G. F. West, 1965; Interpretation Theory in Applied Geophysics, International series in the earth science, Ed. Mc Graw-Hill, U.S.A. 1976.
- Jacques Schoeffler, 1975; Gravimétrie Appliquée, Ed. Editions Technip, Paris, 1975.
- W. M. Telford; L. P. Geldart; R. E. Sheriff; D.A. Keys, 1976; Applied Geophysics, Ed. Cambridge University Press, New York, 1976.
- Milton B. Dobrin, 1975; Introducción a la prospección geofísica, Ed. Ediciones Omega, Barcelona, 1975.
- L. L. Nettleton, 1971; Elementary Gravity and Magnetics for Geologist and Sismologist, Society of Exploration Geophysicist. Monograph Series, Num.1, U.S.A. 1976.
- Ketelaar A. C. R., 1976; A system for computer-calculation of the terrain correction in gravity surveying, geoexploration, V.14, Num.1 pp.56-65.
- Hammer Sigmund, 1977; Graticule Espacing Versus Depth Discrimination in Gravity Interpretation, Geophysics, V.42, pp. 60-65.
- R. Vajk R., V. Van Der Sleen, 1959; Standard Iization of Gravity Survey Procedures. Geophysics. V24 pp.679-484.

- F. K. Leving, J. F. Bayhi, J. W. Dunkin, J. D. Lea, D. B. More, R. K. Warren, G. M. Webster, 1976; Developments in Exploration Geophysics 1969-74, Geophysics V. 41 pp. 209-218.
  
- L. L. Nettleton, 1939; Determination of Density for Reduction of Gravimeter Observations; Geophysics V. 04 pp. 176-183.
  
- Hammer Sigmund, 1939; Terrain Corrections for Gravimeter Stations; V. 4, pp. 184-193.
  
- El Método Gravimétrico en la Exploración Geofísica, 1982; Curso de La División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
  
- Marines Campos Rodolfo, 1979; Reporte Técnico sobre el Estudio Gravimétrico en el área de Aldama, prospecto Maijoma ( Norte y Sur), Chihuahua.
  
- Fidencio García, 1981; Tesis Profesional, Universidad Nacional Autónoma de México.
  
- R. Hernández, 1978; Tesis Profesional, Universidad Nacional Autónoma de México.