

EMPLEO DE UNA COMPUTADORA ELECTRONICA PARA EL CALCULO Y ELABORACION DE MAPAS GRAVIMETRICOS UTILIZADOS EN PROSPECCION PETROLIFERA

JUVENAL LLORDEN RAMIREZ

Gerencia de Exploración Yacimientos Petrolíferos Fiscales

Es corriente en la prospección petrolífera el empleo de mapas gravimétricos de diferentes clases, elaborados con ayuda de calculadoras eléctricas de mesa y con intervención manual en todas sus etapas.

El presente informe reseña un proceso de cálculo y elaboración de los mismos empleando en todas sus etapas una calculadora electrónica, la que permite la ejecución con rapidez y exactitud, partiendo de los datos de campo de la zona en estudio: cotas, coordenadas Gauss-Krüger y valor gravimétrico compensado de las estaciones.

A current practice in petroleum prospecting was the use of different types of gravity maps, made with the help of electric desk calculators and with personal intervention in all the stages.

The present report describe a procees of computation and elaboration using an electronic computer, to make maps fast and precisely, starting from the field data: elevation, Gauss-Krüger coordinates and compensated gravity values of the stations.

INTRODUCCION

En la exploración geofísica para la búsqueda de yacimientos petrolíferos, es de aplicación corriente el método de prospección gravimétrica.

A grandes rasgos, el método consiste en determinar los valores de gravedad relativa de un conjunto de puntos de una zona de terreno, de los cuales se conoce la ubicación planialtimétrica, someterlos a correcciones adecuadas con el objeto de obtener sus anomalías de Bouguer, volcarlos en el plano de los puntos de medida y trazar luego las curvas de isoanómalas.

El mapa de gravedad obtenido, denominado de "Anomalías gravimétricas de Bouguer" proporciona información acerca de los cambios de densidad en el interior de la tierra y también sobre las superficies que limitan regiones de densidad diferente.

Estos contrastes de densidad son provocados en parte por configuraciones geológicas relativamente próximas a la superficie, a las cuales suelen estar asociados yacimientos petrolíferos; de aquí la importancia de poder evidenciarlos.

Con el objeto de magnificar y/o precisar con más detalle esos contrastes, es común la elaboración de nuevos mapas, a partir de los datos del de Bouguer, basados en consideraciones teóricas o bien empíricas apoyadas en informaciones de otro tipo disponibles en la zona. Ejemplos de estos mapas son los denominados: Residual, Segunda derivada, Gradientes, Prolongación vertical de la gravedad, etc.

Como en esencia, los nuevos valores de estos mapas son combinaciones lineales del valor de gravedad de Bouguer en el punto considerado, con promedios ponderados o no, de uno o varios grupos de valores que le equidistan y vecinos; resulta conveniente transformar el mapa original de Bouguer de puntos de medida, por lo general con distribución planimétrica irregular, en otro mapa idéntico pero ahora con puntos de medida ficticios distribuidos en los vértices de una malla regular cuadrada, de "paso" prefijado. Este proceder facilita la tarea de elaboración de los nuevos mapas.

El presente informe muestra que a partir de los datos del relevamiento de campo, todas las etapas posteriores hasta obtener los mapas deseados, pueden realizarse con máquina computadora electrónica con las siguientes ventajas respecto del procedimiento clásico: mayor rapidez en la preparación del documento final dada la extremada velocidad de cálculo de la máquina, seguridad en los cálculos pues se eliminan los errores debidos a factores humanos y prolijidad en la confección del mapa ya que la máquina entrega los valores definitivos en fajas impresas de fácil armado para obtener el plano de valores. El trazado manual de las curvas isoanómalas es prácticamente automático y exento del factor personal.

Se pueden obtener datos impresos de las diversas etapas de cálculo.

La etapa básica del procesado reside en la elaboración del mapa de Bouguer sobre los vértices de la malla. Se incluye en este informe un procedimiento matemático para obtenerlo. También se detalla la posibilidad de realizar un control previo de posibles valores de campo dudosos o errados, o bien, mal pasados a las tarjetas perforadas que usa la computadora en el proceso.

A – ETAPAS DE LA ELABORACION DE MAPAS GRAVIMETRICOS POR EL PROCEDIMIENTO CLASICO.

Con el objeto de destacar las ventajas del procedimiento electrónico, reseñemos las distintas fases del proceso clásico:

A.1 – Se dispone inicialmente de los puntos A_i medidos en el terreno, dados por sus coordenadas Gauss-Krüger, su cota referida al nivel del mar y el valor medido y compensado de su gravedad relativa. Es decir, conocemos:

$$A_i (x, y, h, g)$$

Las estaciones A_i tienen, en general, una distribución planimétrica irregular.

A.2 – A los valores g_i de los puntos medidos se les aplican correcciones adecuadas a fin de obtener las anomalías de Bouguer en la zona. Emplanillado de todos los valores de los puntos.

A.3 – Confección del plano topográfico de los A_i , volcados en él los valores g_i correspondientes. Trazado de las curvas isoanómalas. Se obtiene el mapa de Bouguer de anomalías.

El trazado de las curvas requiere cierta pericia del especialista, sobre todo cuando los puntos de medida están distribuidos muy irregularmente.

A.4 – Fijado el tipo de malla y su paso p —en general se emplea malla cuadrada con $p = 1$ km— se hace su trazado sobre el mapa de Bouguer de A.3 o bien sobre papel transparente y se procede a determinar el valor de g en los vértices, interpolando a ojo. Esta tarea requiere buena habilidad en el operador. Los valores obtenidos quedan influenciados de los errores personales. Emplanillado de los valores de toda la cuadrícula.

A.5 – Se calcula para cada vértice el valor "regional" o sea el promedio de los valores g de vértices de malla ubicados a la distancia r prefijada del vértice en cálculo. Se suelen calcular varios regionales variando r . Emplanillado de valores.

A.6 – Cálculo de los valores, en cada vértice, de residuales, gradientes, etc. Como ya se dijo, se los obtiene mediante combinaciones lineales entre el valor del vértice y los diversos regionales ponderados o no. Para cada mapa de anomalías, será necesario el cálculo respectivo y emplanillado de los valores.

A.7 – Volcado de los valores en cada mapa de anomalías y trazado de las curvas respectivas.

B – ELABORACION DE LOS MAPAS DE ANOMALIAS POR EL PROCEDIMIENTO DE CALCULO CON COMPUTADORA ELECTRONICA.

B.1 – Se dispone de los datos iniciales, como en A.1.

B.2 – Se perforan los datos en tarjetas. Con el programa adecuado se efectúa el control previo de los datos perforados. La máquina produce un listado de los puntos dudosos, con sus datos; se corrigen las tarjetas de los puntos que así lo permitan.

B.3 – Con el programa del cálculo correspondiente se realizan las correcciones normales, como en A.2.

B.4 – Se efectúa la interpolación para cada vértice M_j de la malla, con la función matemática elegida; se produce un listado de los vértices, con sus valores. Se calculan para cada vértice los valores de los mapas deseados: regional, residual, gradiente, etc.

B.5 – Se efectúa ahora un "relleno" de valores entre vértices según la dirección de los ejes coordenados, usando una interpolación cuadrática, que toma como datos los valores de tres vértices consecutivos por vez. La cantidad de puntos interpolados viene dada por el tamaño de los caracteres, alto y ancho, de la impresora de la máquina. Se consigue así un reticulado de puntos con los valores respectivos del mapa deseado.

De estos valores sólo se emplea el dígito de sus unidades. En consecuencia la máquina imprime el mapa de dígitos del reticulado, fraccionado en varias fajas de fácil armado. Para mayor claridad del mapa sólo se imprimen los dígitos de valor par. Trazado manual de las curvas isoanómalas.

Se han detallado las diversas etapas de los cálculos, que pueden llevarse a término en sólo dos o tres pasadas por la computadora electrónica.

C – SOLUCION USADA PARA LA INTERPOLACION MATEMATICA INDICADA EN B.4.

C.1 – De una distribución irregular de puntos A_i dados por sus coordenadas $A_i(x_i, y_i)$ se conocen sus valores g_i de gravedad corregida los cuales nos determinan una superficie experimental. El problema consiste en establecer un método de cálculo que atribuya matemáticamente un valor g_M a todo punto M_j del plano de manera tal que aplicado a un punto medido deba reproducirlo, (La Porte). Los puntos M a calcular son los de la malla adoptada.

La solución usada consiste en delimitar, alrededor del punto M con un círculo de radio R prefijado, a un grupo de puntos A_i , los que intervendrán únicamente en la determinación del g_M .

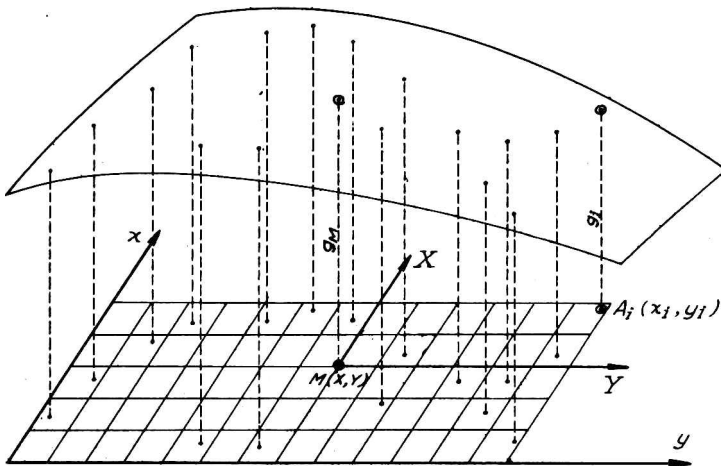


Figura 1

Se hace un traslado de ejes con centro M y referidos a éstos se toma la superficie matemática:

$$G(x,y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f$$

que es del tipo paraboloide de eje vertical. Se determinan las constantes a, b, c, d, e, f imponiendo la condición que la superficie $G(x,y)$ "ajuste" lo mejor posible a la superficie experimental de esos puntos A_i , afectados previamente de un peso P_i en función de su distancia d_i a M .

Los apartamientos entre ambas superficies, para cada punto A_i valdrán:

$$E_i = G(x_i, y_i) - g_i$$

y la condición impuesta se escribirá:

$$S = \sum P_i E_i^2 = \sum P_i [G(x_i, y_i) - g_i]^2 = \text{mínima}$$

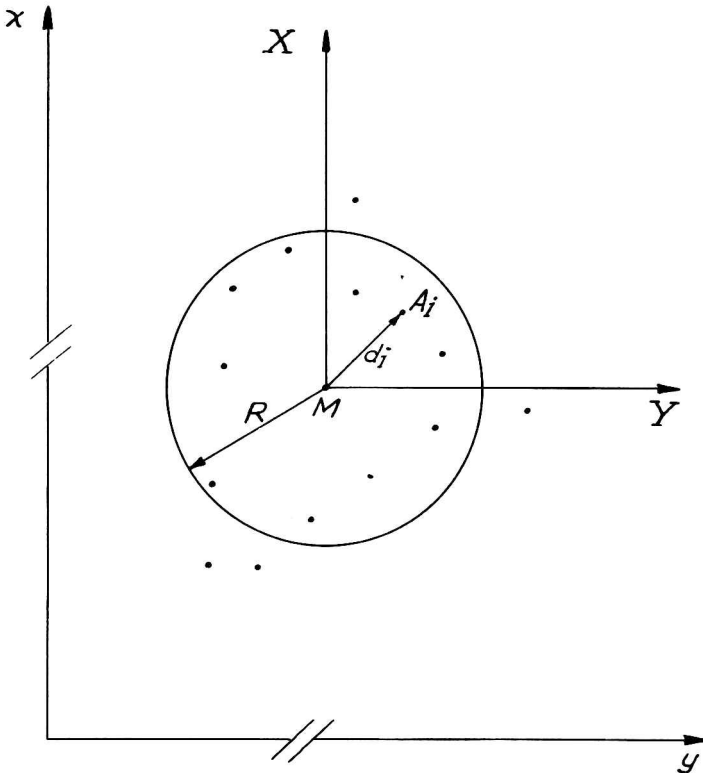


Figura 2

Esta condición determina un sistema simétrico de seis ecuaciones con las seis incógnitas a, b, c, d, e, f , el que puede resolverse por métodos conocidos:

$$\left\{ \begin{array}{l} a\Sigma Px^4 + b\Sigma Px^3 y + c\Sigma Px^2 y^2 + d\Sigma Px^3 + e\Sigma Px^2 y + f\Sigma Px^2 = \Sigma Px^2 g \\ a\Sigma Px^3 y + b\Sigma Px^2 y^2 + c\Sigma Pxy^3 + d\Sigma Px^2 y + e\Sigma Pxy^2 + f\Sigma Pxy = \Sigma Pxyg \\ a\Sigma Px^2 y^2 + b\Sigma Pxy^3 + c\Sigma Py^4 + d\Sigma Pxy^2 + e\Sigma Py^3 + f\Sigma Py^2 = \Sigma Py^2 g \\ a\Sigma Px^3 + b\Sigma Px^2 y + c\Sigma Pxy^2 + d\Sigma Px^2 + e\Sigma Pxy + f\Sigma Px = \Sigma Pxg \\ a\Sigma Px^2 y + b\Sigma Pxy^2 + c\Sigma Py^3 + d\Sigma Pxy + e\Sigma Py^3 + f\Sigma Py^2 = \Sigma Pyg \\ a\Sigma Px^2 + b\Sigma Pxy + c\Sigma Py^2 + d\Sigma Px + e\Sigma Py + f\Sigma P = \Sigma Pg \end{array} \right.$$

Para resolverlo por la computadora se ha usado el método iterativo de Gauss-Seidel.

El valor g_M buscado es:

$$g_M = G(0,0) = f$$

Este proceso de cálculo se aplica para cada uno de los puntos M de la malla.

C.2 – Expresión del peso. Debe ser infinito cuando el punto A_i coincida con el M y debe anularse cuando el A_i esté sobre el círculo de radio R, luego la expresión de P_i :

$$P_i = \left(\frac{R^2 - d_i^2}{d_i^2} \right)^2$$

cumplirá teóricamente con esos supuestos y la superficie experimental pasará por todos los puntos medidos. Como en un cálculo numérico no podemos hacer intervenir una variable que tome valor infinito, se introduce en la fórmula de P_i , en el denominador, un término pequeño u y nos queda:

$$P_i = \left(\frac{R^2 - d_i^2}{d_i^2 + u^2} \right)^2$$

el valor asignado a u permitirá una suavización de la superficie experimental tanto más intensa cuanto mayor sea u. Esta suavización resulta plausible si se admite una cierta imprecisión en los valores medidos:

$$h_i, x_i, y_i, g_i$$

C.3 – Elección del valor del radio R. Una vez adoptado se lo mantiene constante para toda la interpolación de la zona. No debe ser muy reducido pues no habría exactitud en la determinación de las constantes a, b, c, d, e, f y si se lo toma muy grande no se agrega precisión en el cálculo y en cambio se incrementa rápidamente el tiempo de computación; debe tenerse en cuenta también el grado de dispersión de los puntos medidos. En general se lo fija entre cinco y diez kilómetros.

El factor de suavización u puede oscilar entre 0,01 y 0,1 km.

D – METODO PARA LA DETECCION DE LOS PUNTOS DUDOSOS

Todo error significativo que puedan tener originariamente los datos de campo: x_i, y_i, h_i, g_i , o que se produzcan al volcarlos a las tarjetas perforadas que usa la computadora, debe ser determinado y corregido antes del pasaje definitivo para los cálculos con la máquina, pues producirían resultados finales falsos.

Para evitar este inconveniente se sigue un procedimiento de control aplicado

a cada uno de los puntos medidos. La máquina entrega un listado de los puntos que resulten dudosos, dando sus parámetros.

Se verifica manualmente con los datos originales y se corrigen las tarjetas respectivas de los puntos equivocados.

D.1 – El procedimiento de detección consiste en comparar el dato g_i que se investiga con un valor promedio g_p de una pequeña zona de valores que rodean al g_i , si la diferencia entre ambos supera a un tope prefijado, el punto se considera dudoso.

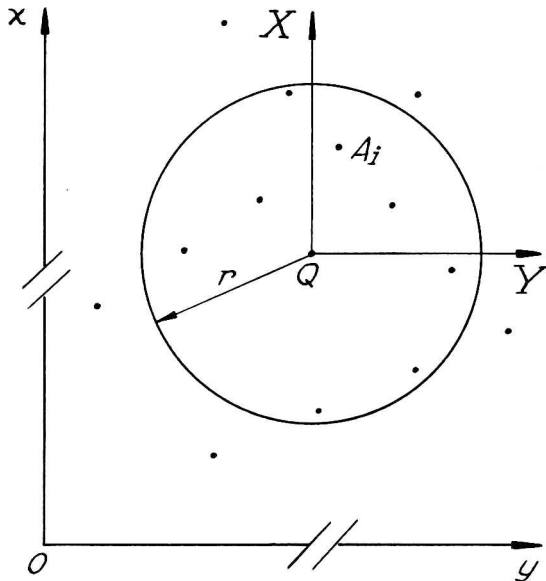
El g_p se lo obtiene siguiendo el método de interpolación ya visto, pero simplificado.

Sea Q el punto de medida a verificar.

Se considera sólo el grupo de n puntos A_i que caen dentro de la circunferencia de radio r prefijado. Se hace un traslado de ejes a Q y se considera el plano:

$$P(x, y) = ax + by + c$$

que deberá ajustar lo mejor posible a la superficie experimental de los g_i .



La diferencia entre ambas superficies, para cada A_i vale:

$$e_i = P(x_i, y_i) - g_i$$

y la condición que debe cumplirse, es:

$$S = \sum e_i^2 = \sum [P(x_i, y_i) - g_i]^2 = \text{mínima}$$

la que se traduce en un sistema de tres ecuaciones simétricas con tres incógnitas: a , b y c .

El valor buscado para g_p es:

$$g_p = P(0,0) = c$$

Un primer control consiste en comparar la diferencia:

$$D = g_Q - g_p$$

Con un valor tope t prefijado, constante para toda la zona.

Si es $|D| > t$, el punto se considera dudoso.

Se lo somete a un segundo control, ahora con la diferencia promedio de los g_i con sus correspondientes del plano:

$$e_m = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n}}$$

Si es $|D| > s.e_m$, se considera dudoso al punto. El valor que se fija para s se lo mantiene constante en la zona.

El primer control puede resultar insuficiente o muy enérgico en puntos distintos de una misma zona, por eso se adopta el segundo control sobre D , teniendo en cuenta ahora la irregularidad local, a través de e_m .

D.2 – Valores de r , t y s . Para fijar el valor de r valen las mismas consideraciones que para R . Se puede adoptar $r = 0,5 R$; en cuanto a t y s dependerán del tipo de irregularidad a detectar, se pueden adoptar, por ejemplo: $t = 0,8$ miligal y $s = 2$ a 5 .

E – CALCULO DE LOS VALORES EN VERTICES DE LA MALLA, PARA LOS DIVERSOS MAPAS DE ANOMALIAS.

Como ya se dijo, estos valores son sólo combinaciones lineales de valores de Bouguer, (Baranov, 1952).

Por ejemplo:

$$\text{Regionales: } \text{Reg} = \frac{1}{n} \sum_1^n g_i$$

Consisten en el promedio de los valores que equidistan del vértice en cálculo; se suelen adoptar distintos radios de equidistancia.

$$\text{Residuales: } \text{Res} = g_M - \frac{1}{n} \sum_1^n g_i$$

al valor del vértice M en cálculo, se le resta el valor del regional correspondiente, que se adopte.

Segunda derivada, gradiente, etc.:

$$\text{Anomalía} = a_0 g_M + a_1 g_1 + \dots + a_n g_n = \sum_0^n a_i g_i$$

los coeficientes a_0, \dots, a_n son constantes conocidas, un juego para cada tipo de anomalía, g_M es el valor Bouguer del vértice en cálculo y los g_1, g_2, \dots, g_n son regionales de radios diferentes.

Todas estas expresiones son fáciles de calcular por medio de la computadora.

F – MAPAS DE ANOMALIAS

Con la idea de producir directamente con la computadora los diversos mapas de anomalías se realiza ahora una interpolación de los valores de malla en am-

bas direcciones: se intercalan m puntos entre vértices consecutivos de filas y n puntos entre los de columnas.

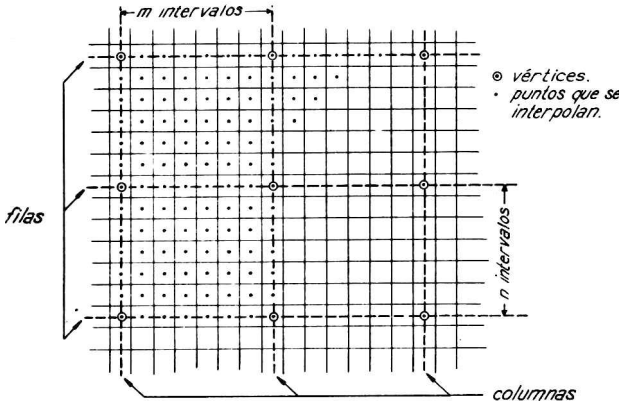


Figura 3

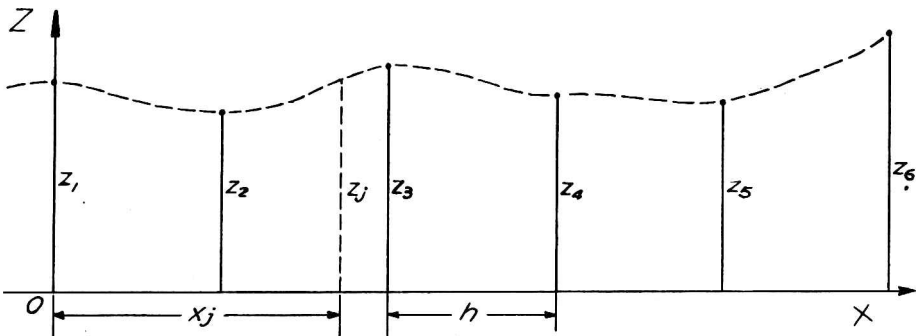
Se obtienen así los valores del reticulado de puntos en que queda convertida la malla inicial.

De cada uno de estos valores se utiliza sólo el dígito que indica el número de sus unidades; estos dígitos, representativos en última instancia del valor de los puntos del reticulado. El plano impreso dará la imagen del mapa de anomalías en estudio.

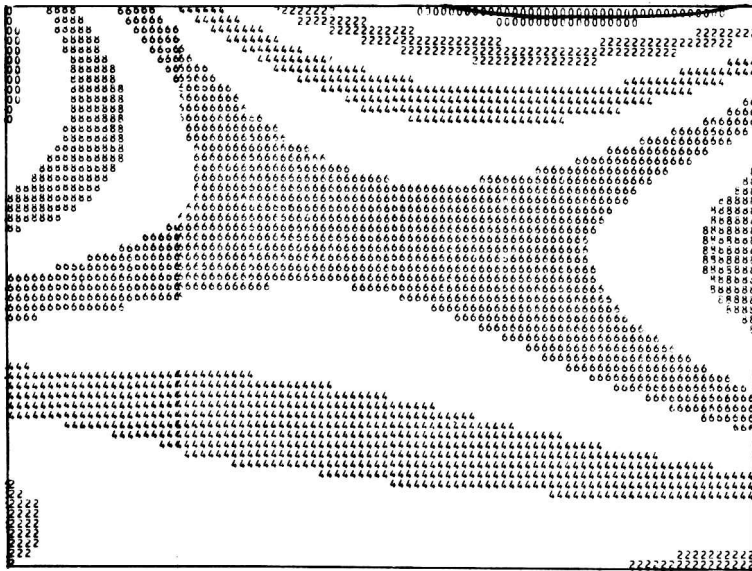
En consecuencia la elección de las cantidades m y n de los puntos a interpolar está regulada por el ancho y alto de los caracteres de la impresora de la máquina y de la escala en que se deseen los mapas.

F.1 – Interpolación entre vértices. Se toman los valores de tres vértices consecutivos y se interpolan mediante la fórmula de Gregory-Newton para ordenadas conocidas equidistantes y la condición de pasar por dichas ordenadas:

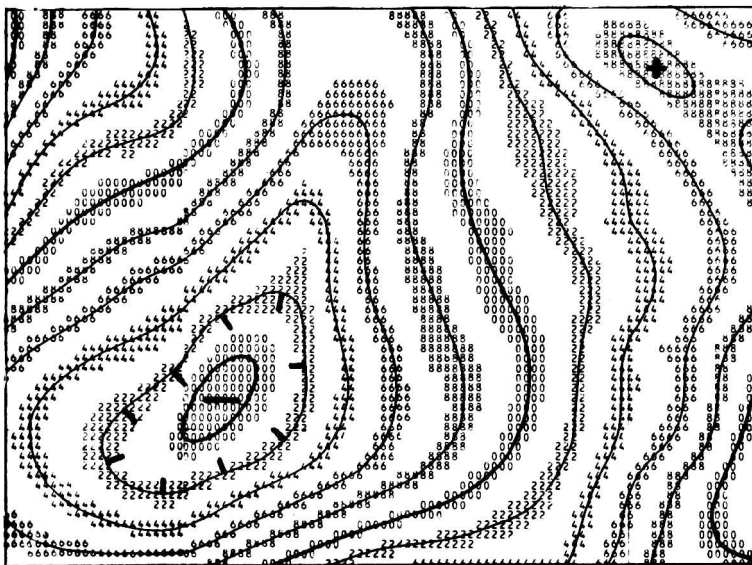
$$Z_j = Z_1 + x_j(Z_2 - Z_1)/h + x_j(x_j - h)(Z_3 - 2Z_2 + Z_1)/2h^2$$



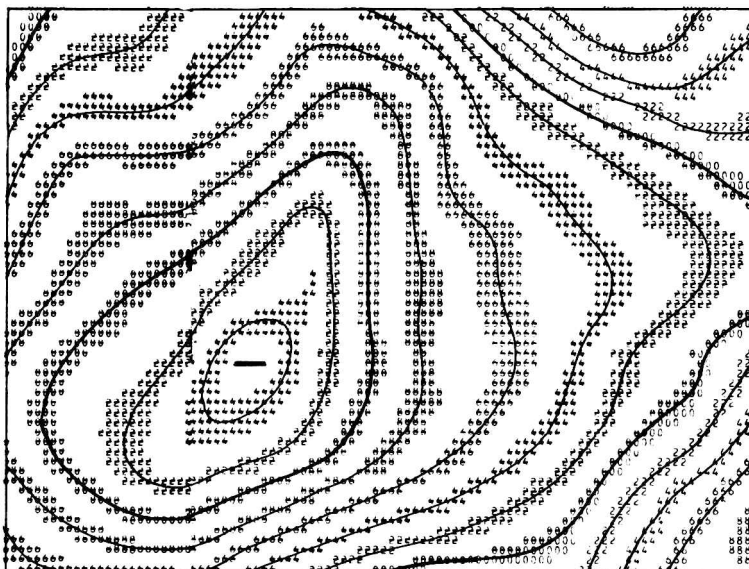
donde h es la equidistancia, Z₁, Z₂, Z₃, las ordenadas conocidas —valores de los vértices— y Z_j uno de los valores interpolados, X_j varía de 1 hasta 2n ó 2m según el caso.



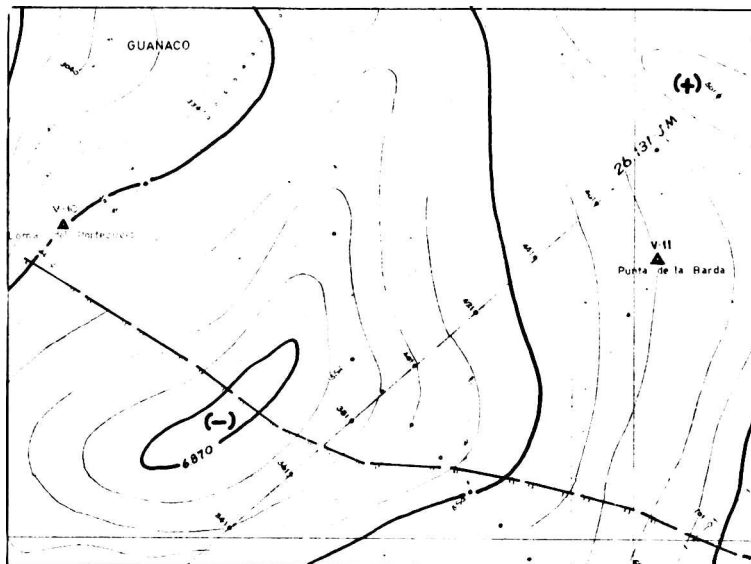
VALORES DE GRAVEDAD RELATIVA. La Pampa - Zona: Curacó Oeste. * Malla de 31 por 45 vértices. * Coord. Diag.: 5724; 3369 km. * 5754; 3413 km.



VALORES DE GRAVEDAD REGIONAL. La Pampa - Zona: Curacó Oeste. * Malla de 31 por 45 vértices. * Coord. Diag.: 5724; 3369 km. * 5754; 3413 km.



VALORES DE GRAVEDAD RESIDUAL. La Pampa - Zona: Curacó Oeste. * Malla de 31 por 45 vértices. * Coord. Diag.: 5724; 3369 km. * 5754; 3413 km.



PLANOS DE GRAVEDAD RELATIVA. La Pampa - Zona Curacó Oeste. * Efectuado por procedimiento manual.

Completada la interpolación entre esos tres vértices, se repite el cálculo tomando ahora en la fórmula Z_3 por Z_3 , Z_4 por Z_2 y Z_5 por Z_3 . Así se procede hasta completar la interpolación de una columna y luego de todas ellas.

Se repite el proceso ahora fila por fila, incluidas las filas nuevas producidas.

F.2 – Con un cálculo adecuado se obtienen los dígitos representativos de las unidades de cada valor del reticulado, fila por fila, y también su signo. Se imprimen estos dígitos y previamente el signo negativo cuando corresponda. Para mayor claridad se imprimen sólo los dígitos pares.

El trazado manual de las curvas es prácticamente automático, debido a la guía que significa tener el plano impreso de los dígitos.

OBSERVACIONES

1.– El procedimiento de interpolación detallado en C.1 no descubrirá las pequeñas anomalías que pudieran "filtrarse" a través de la red de los puntos medidos, pero tiene la ventaja de no eliminar ninguna de las informaciones producidas por ellos, ya que las reproduce fielmente; el procedimiento manual no siempre sería capaz de hacerlo así.

2.– A título informativo se da una estimación de los tiempos empleados para la ejecución del mapa de Bouguer y dos mapas de otras anomalías, de una misma zona, por ambos procedimientos:

Cantidad de puntos medidos	Superficie cubierta	Procedimiento clásico con dos especialistas	Usando calculadora electrónica. $R=8$ km $r=4$ km
2500	$44 \times 90 =$ 3960 km^2	No menos de 90 días de labor	No más de dos horas.

Al tiempo neto de la computadora hay que agregarle unos treinta días de labor insumidos en el emplanillado de los datos, control y corrección de las tarjetas perforadas, ensamblado de los mapas, trazado de las curvas y volcado de información topográfica accesoria para identificación de los mismos.

3.– Se incluyen como ejemplo del procesado por computadora tres mapas: de gravedad Bouguer, Regional y Residual y el mapa de gravedad Bouguer obtenido por el procedimiento manual.

4.– El autor desea expresar su agradecimiento a la Gerencia de Exploración de Y.P.F., por la autorización para la publicación del presente trabajo

BIBLIOGRAFIA

LA PORTE, M.: "Procédé Mathématique d'Interpretation". Institute Français du Pétrole.

BARANOV, V. (1952): "Sur une methode analytique de calcul de l'Anomalie regionale". Compagnie Générale de Géophysique.