



01179
2
20

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

**EL METODO DE DECONVOLUCION WERNER
EN LA INTERPRETACION MAGNETICA
ALEJANDRO CERON FERNANDEZ**

T E S I S

**PRESENTADA, A LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA**

(EXPLORACION DEL SUBSUELO)

CIUDAD UNIVERSITARIA

MEXICO, D. F.

1993

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Arose



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

DEPTO. DE EXPLORACION Y EXPLOTACION
DE RECURSOS ENERGETICOS DEL SUBSUELO

AREA EXPLORACION

DR. FELIPE LARA ROSANO
Jefe de la División de
Estudios de Posgrado
P r e s e n t e .

En atención a su oficio en el que me informa que he sido designado Director de Tesis del señor ALEJANDRO CERON FERNANDEZ, inscrito en la Maestría de Ingeniería en Exploración de Recursos Energéticos del Subsuelo, manifiesto a usted la aceptación de esta designación. El nombre de la Tesis a desarrollarse es:

"EL METODO DE DECONVOLUCION WERNER
EN LA INTERPRETACION MAGNETICA"

Quedo enterado de que formaré parte del jurado del Examen de Grado en la fecha y hora que me comunicarán posteriormente.

A l e n t a m e n t e ,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 4 de junio de 1993

[Handwritten signature]
M. EN C. JUAN M. BRANDI PURATA

c. c. p. DR. JAIME BARCELO DUARTE - Jefe del área de Exploración
c. c. p. Interesado.

JMBP#esa

*Recibi
4-Junio-93
[Signature]*

CONTENIDO

	PAGINA
AGRADECIMIENTOS.	
RESUMEN	1
Capítulo I INTRODUCCION	2
Capítulo II CONSIDERACIONES TEORICAS DEL METODO DE DECONVOLUCION WERNER	4
II.1 Método de Talwani para el Efecto de un Dique	4
II.2 Deconvolución Werner	10
II.3 Aplicación de la Deconvolución Werner al Gradiente Horizontal	14
II.4 Operadores Empleados para el Cálculo del Gradiente Horizontal	17
Capítulo III CRITERIOS PARA EL EMPLEO DEL OPERADOR WERNER	19
III.1 Intervalo de Muestreo Apropiado del Perfil Magnético	19
III.2 Tamaño Apropiado del Operador Werner	20
III.3 Evaluación de la Susceptibilidad Magnética y Echado	22
Capítulo IV MODELOS HIPOTETICOS	25
IV.1 Modelo I	26
IV.1a. Modelo Ia.	26
IV.1b. Modelo Ib.	27
IV.1c. Modelo Ic.	28

IV.2	Modelo II	29
IV.2a.	Modelo IIa.	29
IV.2b.	Modelo IIb.	31
IV.2c.	Modelo IIc.	31
Capítulo V	APLICACIONES DE LA DECONVOLUCION WERNER A CASOS REALES	33
V.1	Modelo de Basamento I	35
V.2	Modelo de Basamento II	37
Capítulo VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	39

BIBLIOGRAFIA

RESUMEN

Se analiza primero el algoritmo para calcular las anomalías magnéticas causadas por un dique en dos dimensiones y sección transversal.

Se sabe que un dique o cualquier otro cuerpo, no se encuentran solos en la naturaleza, sino que están asociados a otros cuerpos. Las interferencias causadas por estos cuerpos se agregan considerando un polinomio, con el cual se simulan los cuerpos asociados. A partir de esto se desarrolla el algoritmo de Deconvolución Werner.

Por otro lado se analiza la aplicación del proceso de Deconvolución Werner al Gradiente Horizontal del Campo de Intensidad Magnética Total, para la resolución de las interfases de los cuerpos que se encuentran actuando.

El método se aplica a seis modelos hipotéticos y con esto se determina que la Deconvolución Werner de buenos resultados en cuerpos que se encuentran a profundidades menores de 10 kilómetros.

A partir de esto, se analizan varios factores para la obtención de buenos resultados; estos factores son: intervalo de muestreo apropiado del perfil magnético, tamaño apropiado del operador Werner, evaluación de la susceptibilidad magnética y echado.

Así mismo la Deconvolución Werner se aplica a dos secciones reales ubicadas en la provincia Geológica de la Cuenca del Papaloapan, en donde los resultados obtenidos son bastante satisfactorios.

C A P I T U L O I

INTRODUCCION

En la Prospección Geofísica, el método aeromagnético es un auxiliar para el descubrimiento de minerales magnéticos como la magnetita, pirrotita, entre otros; en Prospección Petrolera nos facilita la determinación de la profundidad y estructura del basamento magnético, fallas en la columna sedimentaria y el basamento, cuerpos intrusivos, cambios de susceptibilidad magnética en el basamento, cuerpos intrabasamentales, etc.

En los levantamientos aéreos modernos se mide la intensidad magnética total del campo, obteniéndose un perfil continuo del mismo y algunas veces el gradiente vertical del campo magnético. La interpretación de los datos aeromagnéticos se encuentra limitada por la ambigüedad, debido a que varias distribuciones de material magnético a profundidades diferentes, pueden producir una misma anomalía.

Durante mucho tiempo los geofísicos se han interesado en buscar métodos cada vez más resolutivos para la interpretación.

En el año de 1953, S. Werner propuso el proceso de Deconvolución Werner con el cual a partir de las anomalías magnéticas, se obtiene como solución las profundidades, susceptibilidades magnéticas y buzamientos; al analizar diques mineralizados en su natal Suecia.

Esta técnica de Deconvolución Werner se ha venido aplicando sobre planos aeromagnéticos por varias compañías en E. U. para la interpretación de los datos aeromagnéticos, y el objetivo de analizar esta técnica en este trabajo fué para entenderla y aplicarla en su forma más óptima conociendo

tanto sus alcances como limitaciones en la interpretación de perfiles magnéticos.

Para alcanzar el anterior objetivo se efectúa un análisis matemático del proceso de Deconvolución Werner y una serie de pruebas en seis modelos sintéticos para determinar los criterios adecuados en su uso en la interpretación de perfiles magnéticos, asimismo se aplica esta técnica en dos secciones reales obtenidas del plano de intensidad magnética total del prospecto Jalapa-Mata Verde.

C A P I T U L O I I

CONSIDERACIONES TEORICAS DEL METODO DE DECONVOLUCION WERNER.

II.1. METODO DE TALWANI PARA EL EFECTO DE UN DIQUE.

El desarrollo de las fórmulas para la atracción de un prisma de dos dimensiones semi-infinito fué tratado de una forma ligera por Helland (1945), estas fórmulas son aplicables para la obtención de la anomalía calculada causada por un cuerpo de dos dimensiones de forma irregular y sección transversal, ya que es posible aproximar cualquier cuerpo irregular de sección transversal por medio de un polígono.

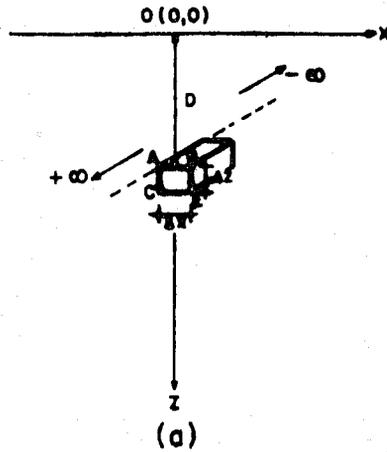
El siguiente análisis lo consideró Talwani (Talwani M. and Heristzler J. R. 1964) para el desarrollo de su algoritmo, con el cual se calculan anomalías causadas por polígonos en dos dimensiones de forma irregular y sección transversal, de tal forma que cualquier formación y estructura geológica se puede aproximar por medio de los polígonos.

Primero vamos a considerar la anomalía magnética causada por una sección elemental dada por los puntos A,B,C y D mostrada en la figura 1b, la cual aparece en tres dimensiones en la figura 1a.

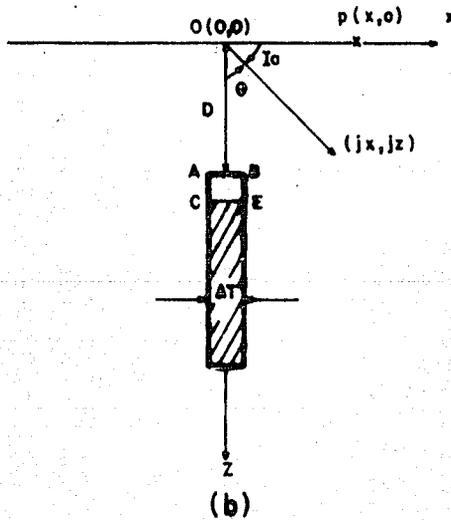
Si consideramos a \vec{J} como la intensidad de magnetización, tenemos que el momento magnético (\vec{M}) de volumen elemental $\Delta x' \Delta y' \Delta z'$ esta dado por:

$$\vec{M} = J \Delta x' \Delta y' \Delta z'$$

El potencial magnético del volumen elemental que actúa



Elemento de volumen



Parámetros de un dique delgado vertical en 2-D

Figura 1

sobre un punto cualquiera está dado por la integral del momento magnético multiplicado por el gradiente de $(1/r)$ en donde r es la distancia del volumen elemental al origen, por lo tanto se tiene:

$$\omega(x, y, z) = \int_v \vec{M} \nabla \left(\frac{1}{r} \right)$$

$$\text{Si: } \nabla \left(\frac{1}{r} \right) = \frac{\vec{r}}{r^3} = \frac{J_x(x'-x) + J_y(y'-y) + J_z(z'-z)}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2]^{3/2}}$$

entonces el potencial magnético para una sección transversal ABCD de la figura 1b, la cual está en la dirección 'y' y se extiende, infinitamente es:

$$\omega(x, y, z) = \Delta x' \Delta z' \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_x(x'-x) + J_y(y'-y) + J_z(z'-z)}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2]^{3/2}} \right] dy'$$

$$\omega(x, y, z) = \Delta x' \Delta z' \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[J_x(x'-x) + J_z(z'-z)]}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2]^{3/2}} dy' +$$

$$+ \Delta x' \Delta z' \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_y(y'-y)}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2]^{3/2}} dy'$$

Considerando la primera integral como A y la segunda como B tenemos:

$$B = \frac{\Delta x' \Delta z'}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2J_y(y'-y)}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2]^{3/2}} dy' =$$

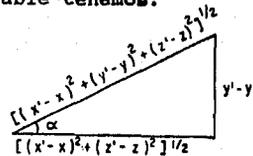
$$= - \frac{J_y \Delta x' \Delta z'}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2]^{1/2}} \Bigg|_{-\infty}^{\infty} = 0$$

$$A = 2\Delta x' \Delta z' \int_0^{\infty} \frac{[J_x(x'-x) + J_z(z'-z)]}{[(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2]^{3/2}} dy' =$$

Considerando el siguiente cambio de variable tenemos:

$$y-y' = [(x'-x)^2 + (z'-z)^2]^{1/2} \tan \alpha$$

$$dy' = [(x'-x)^2 + (z'-z)^2]^{1/2} \sec^2 \alpha d\alpha$$



$$\begin{aligned} [(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-z)^2]^{1/2} &= \\ &= [(x'-x)^2 + (z'-z)^2]^{1/2} \sec \alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Para:} \quad y'-y &= 0 & ; & \quad \alpha = 0 \\ y'-y &= \infty & ; & \quad \alpha = \pi/2 \end{aligned}$$

Sustituyendo en A se tiene:

$$A = 2\Delta x' \Delta z'$$

$$\int_0^{\pi/2} \frac{[J_x(x'-x) + J_z(z'-z)] [(x'-x)^2 + (z'-z)^2]^{1/2} \sec^2 \alpha d\alpha}{[(x'-x)^2 + (z'-z)^2]^{3/2} \sec^3 \alpha}$$

$$A = \frac{2\Delta x' \Delta z' [J_x(x'-x) + J_z(z'-z)]}{(x'-x)^2 + (z'-z)^2} \int_0^{\pi/2} \cos \alpha d\alpha$$

$$A = \frac{2\Delta x' \Delta z' [J_x(x'-x) + J_z(z'-z)] \text{sen } \alpha}{(x'-x)^2 + (z'-z)^2} \Big|_0^{\pi/2}$$

$$A = \frac{2\Delta x' \Delta z' [J_x(x'-x) + J_z(z'-z)]}{(x'-x)^2 + (z'-z)^2}$$

Por lo tanto el potencial magnético de la sección transversal es:

$$\omega(x,y) = \frac{2\Delta x' \Delta z' [J_x(x'-x) + J_z(z'-z)]}{(x'-x)^2 + (z'-z)^2} \quad (1)$$

Las componentes vertical y horizontal del campo producidas por el volumen elemental, están definidas por:

$$H_z(x, z) = \frac{\partial [\omega(x, z)]}{\partial z} \quad H_x(x, z) = \frac{\partial [\omega(x, z)]}{\partial x}$$

Para la componente vertical se tiene:

$$H_z(x, z) = \frac{\partial [\omega(x, z)]}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{2\Delta x' \Delta z' [J_x(x'-x) + J_z(z'-z)]}{(x'-x)^2 + (z'-z)^2} \right]$$

$$H_z(x, z) = 2\Delta x' \Delta z' \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{J_x 2(x'-x)(z'-z) + J_z [(z'-z)^2 - (x'-x)^2]}{[(x'-x)^2 + (z'-z)^2]^2} \right] \quad (2)$$

Haciendo lo mismo para $\omega(x, z)$, pero derivando con respecto a x tenemos la componente horizontal:

$$H_x(x, z) = 2\Delta x' \Delta z' \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{J_x 2(x'-x)(z'-z) - J_z [(z'-z)^2 - (x'-x)^2]}{[(x'-x)^2 + (z'-z)^2]^2} \right] \quad (3)$$

Analizando el dique sombreado de la figura 1b, se tiene que los valores para la fuerza horizontal y vertical del campo se obtienen de la integración de las expresiones (2) y (3) con respecto a x' y z' en donde los límites para x' van de $-\Delta t/2$ a $\Delta t/2$ y para z' de D a ∞ ; así tenemos:

$$V(x, z) =$$

$$= 2 \int_D^{\infty} \int_{-\Delta t/2}^{\Delta t/2} \left\{ \frac{2J_x(x'-x)(z'-z) + J_z[(z'-z)^2 - (x'-x)^2]}{[(x'-x)^2 + (z'-z)^2]^2} \right\} dx' dz'$$

Considerando que $\Delta t \ll D$, y de acuerdo al teorema del valor medio podemos aproximar la integral anterior.

$$V(x, z) \approx 2\Delta t \int_D^{\infty} \frac{J_x(-2x)(z'-z) + J_z[(z'-z)^2 - x^2]}{[x^2 + (z'-z)^2]^2} dz'$$

Para puntos sobre la superficie o sea sobre el eje x tenemos (en este caso $z = 0$)

$$V(x, 0) \approx 2\Delta t \int_D^{\infty} \left[\frac{-2J_x x z'}{(x^2 + z'^2)^2} + \frac{J_z [(z'^2 - x^2)]}{(x^2 + z'^2)^2} \right] dz'$$

Separando la integral anterior en dos integrales y considerando la primera como A y la segunda como B tenemos:

$$A = - \int_D^{\infty} \frac{-2J_x x z'}{(x^2 + z'^2)^2} dz' = \frac{x J_x}{x^2 + z'^2} \Big|_D^{\infty} = - \frac{x J_x}{x^2 + D^2}$$

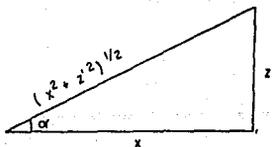
Para B se tiene

$$B = \int_D^{\infty} \frac{J_z (z'^2 - x^2)}{(x^2 + z'^2)^2} dz'$$

Considerando un cambio de variable en la integral anterior $z' = x \tan \alpha$

$$dz' = x \sec^2 \alpha d\alpha$$

$$(x^2 + z'^2)^{1/2} = x \sec \alpha$$



Para los límites se tiene:

$$\begin{aligned} z' = D & ; & \alpha = \alpha' \\ z' = \infty & ; & \alpha = \pi/2 \end{aligned}$$

Además:

$$\begin{aligned} \sec^2 \alpha &= 1 + \tan^2 \alpha \\ \cos 2\alpha &= 2 \cos^2 \alpha - 1 \end{aligned}$$

Sustituyendo en B se tiene:

$$B = \int_{\alpha'}^{\pi/2} \frac{J_z x^2 (\tan^2 \alpha - 1) x \sec^2 \alpha}{x^4 \sec^4 \alpha} d\alpha = \frac{J_z D}{x^2 + D^2}$$

Finalmente, tenemos que la componente vertical es:

$$V(x, 0) = 2\Delta T \left[\frac{J_z D - x J_x}{x^2 + D^2} \right] \quad (4)$$

Siguiendo un procedimiento similar para la componente horizontal se tiene:

$$H(x, 0) = - 2\Delta T \left[\frac{J_x D + J_z x}{x^2 + D^2} \right] \quad (5)$$

Considerando que el dique se encuentra sobre la dirección de la línea de vuelo, en donde el eje x del dique coincide con la dirección de la línea de vuelo, asimismo el eje y es transversal a la línea de vuelo y z se encuentra verticalmente; por otro lado el vector de campo total \vec{T} guarda la posición mostrada en la figura 2, se tiene que el campo total estará dado por la siguiente expresión:

$$T(x, 0) = H(x, 0) \cos I \cos(C - D_0) + V(x, 0) \operatorname{sen} I \quad (6)$$

en donde I, es la inclinación de campo magnético, D_0 es la declinación del campo magnético y C es el azimut de la línea de vuelo.

Si sustituimos las expresiones 4 y 5 en la ecuación 6 se tiene:

$$T(x, 0) = \frac{-2\Delta T [J_x D \cos I \cos(C - D_0) + J_z x \cos I \cos(C - D_0)]}{x^2 + D^2} + \frac{2\Delta T (J_z D \operatorname{sen} I - J_x x \operatorname{sen} I)}{x^2 + D^2}$$

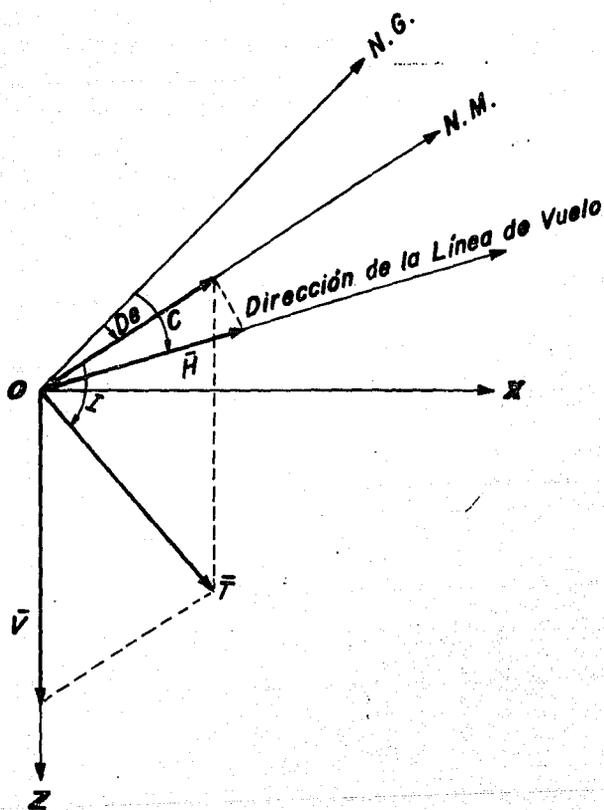


FIG. 2 .- CAMPO MAGNETICO TOTAL Y SUS COMPONENTES VERTICAL Y HORIZONTAL EN 2-D

$$T(x, 0) = \frac{-2\Delta T(-J_x \cos I \cos(C-D_0) + J_z \sin I)D}{x^2 + D^2} - \frac{2\Delta T(J_x \cos I \cos(C-D_0) + J_z \sin I)x}{x^2 + D^2}$$

Si hacemos $A = -2\Delta T(J_x \cos I \cos(C-D_0) + J_z \sin I)$ (7)

$$B = 2\Delta T(-J_x \cos I \cos(C-D_0) + J_z \sin I) \quad (8)$$

Se tiene que la expresión del campo total del dique es:

$$T(x, 0) = \frac{Ax + BD}{x^2 + D^2} \quad (9)$$

Expresando J_x y J_z en términos de A y B , al resolver el sistema de ecuaciones que forman 7 y 8 se tiene:

$$J_x = \frac{-BV_x - AV_z}{2\Delta T(V_x^2 + V_z^2)} \quad (10)$$

$$J_z = \frac{-AV_x + BV_z}{2\Delta T(V_x^2 + V_z^2)}$$

en donde: $V_x = \cos I \cos(C - D_0)$

$$V_z = \sin I$$

II.2. DECONVOLUCION WERNER.

La ecuación del campo total para un dique, es la ecuación básica usada por el método de Deconvolución Werner (Werner S., 1949) para la interpretación magnética.

Se puede observar que esa ecuación está desarrollada para el caso en que el centro del dique está localizado en (0,D), para una localización horizontal arbitraria (x₀,D), la ecuación 9 se escribe como:

$$T(x, 0) = \frac{A(x-x_0) + BD}{(x-x_0)^2 + D^2} \quad (11)$$

Esta ecuación considera solo el efecto magnético total para un dique.

Si consideramos la anomalía del dique con interferencias asociadas a otros cuerpos, se tiene un problema magnético más complejo donde la Deconvolución Werner tiende a linealizar de estos problemas no lineales.

Esta linealidad se conserva aún cuando se agreguen términos que nos representan las interferencias.

La interferencia se agrega en forma de un polinomio a la anomalía magnética total (Chao, C. Ku and John A. Sharp 1983), tomando en consideración el campo del dipolo principal y el gradiente regional como sigue:

$$T(x, 0) = \frac{A(x-x_0) + BD}{(x-x_0)^2 + D^2} + C_0 + C_1x + C_2x^2 \quad (12)$$

Desarrollando la ecuación anterior en forma algebraica tenemos:

$$\begin{aligned} (T(x, 0) - C_0 - C_1x - C_2x^2)(x^2 - 2xx_0 + x_0^2 + D^2) &= \\ &= Ax - Ax_0 + BD \\ x^2T(x, 0) - x^2C_0 - x^3C_1 + x^4C_2 + x_0^2T(x, 0) - x_0^2C_0 - \\ - x_0^2x C_1 - x_0^2x^2C_2 - 2xx_0T(x, 0) + 2xx_0C_0 + 2x^2x_0C_1 + \\ + 2x^3x_0C_2 + D^2T(x, 0) - D^2C_0 - D^2C_1x - D^2C_2x^2 &= \\ &= Ax - Ax_0 + BD \end{aligned}$$

Si hacemos que:

$$a_0 = -Ax_0 + BD + CoD^2 + x_0^2 Co$$

$$a_1 = A - 2Cox_0 + C_1D^2 + C_1x_0^2$$

$$a_2 = Co - 2C_1x_0 + C_2x_0^2 + C_2D^2$$

$$a_3 = C_1 - 2x_0C_2$$

$$a_4 = C_2$$

$$b_0 = -x_0^2 - D^2$$

$$b_1 = 2x_0$$

Sustituyendo en el desarrollo anterior se tiene:

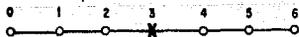
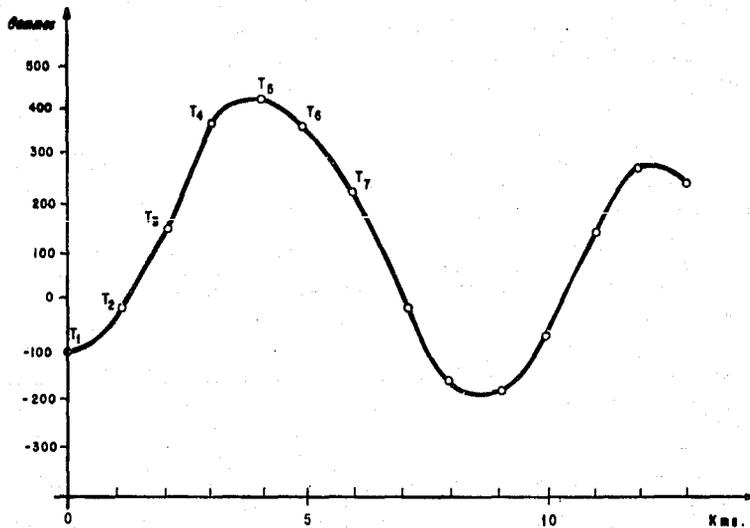
$$x^2T(x,0) =$$

$$= a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + b_0T(x,0) + b_1xT(x,0) \dots (13)$$

En base a la expresión 13 se desarrollo un operador Werner de siete puntos, tenemos que se establece un sistema de ecuaciones de 7x7 para cada estación en donde se aplique la Deconvolución Werner.

Supóngase que se tiene el siguiente perfil magnético, como se muestra en la figura 3. De acuerdo a la ecuación 13 podemos establecer un sistema de ecuaciones para la estación 3, así se tiene:

1	0	0	0	0	T_1	0	a_0	0
1	1	1	1	1	T_2	T_2	a_1	T_2
1	2	4	8	16	T_3	$2T_3$	a_2	$4T_3$
1	3	9	27	81	T_4	$3T_4$	a_3	$= 9T_4$
1	4	16	64	256	T_5	$4T_5$	a_4	$16T_5$
1	5	25	125	625	T_6	$5T_6$	a_5	$25T_6$
1	6	36	216	1296	T_7	$6T_7$	a_6	$36T_7$



**PERFIL MAGNETICO PARA ESTABLECER
EL SISTEMA DE ECUACIONES**

FIGURA 3

en donde

$$T_1 = T(0,0)$$

$$T_2 = T(1,0)$$

$$T_3 = T(2,0)$$

$$T_4 = T(3,0)$$

$$T_5 = T(4,0)$$

$$T_6 = T(5,0)$$

$$T_7 = T(6,0)$$

En este caso se está considerando un intervalo de muestreo unitario, para el operador y para el muestreo de la anomalía.

Para cada estación se establece un sistema de ecuaciones, con la solución de cada sistema se tiene:

$$x_0 = 0.5b_1$$

$$D = (-bo^2 - x_0^2)^{1/2}$$

$$C_2 = a_4$$

$$C_1 = a_3 + 2x_0C_2$$

$$C_0 = a_2 + 2C_1x_0 - C_2x_0^2 - C_2D^2$$

$$A = a_1 + 2C_0x_0 - C_1D^2 - C_1x_0^2$$

$$B = (a_0 + Ax_0 - C_0D^2 - C_0x_0^2)/D$$

$$SM = (J_x^2 + J_z^2)^{1/2}/|F|$$

$$ECH = \tan^{-1}(J_x/J_z) + I_a$$

En donde

x_0 = Posición horizontal

D = Profundidad

SM = Susceptibilidad magnética

ECH = Angulo de echado

Suponiendo que se tiene un operador Werner apropiado cuyo tamaño es comparable al tamaño de una anomalía y barremos el operador a lo largo de la anomalía, obtenemos un grupo de soluciones continuas cuando el operador está dentro de dicha anomalía. Las soluciones variarán más o menos

dependiendo del tamaño y localización del operador con respecto a la anomalía.

II.3. APLICACION DE LA DECONVOLUCION WERNER AL GRADIENTE HORIZONTAL

La técnica de Deconvolución Werner es válida si aplicamos el operador Werner al gradiente horizontal del campo total, (Chao, C. Ku and John A. Sharp 1983).

La justificación física de esto es simple, si tenemos una interfase en donde existe un cambio de susceptibilidad magnética, podemos considerar que se tiene en la interfase un gran número de diques delgados y paralelos. Por lo tanto conceptualmente la anomalía magnética causada por el límite involucra una integración de las anomalías magnéticas causadas por los diques delgados. Si tomamos una diferenciación en la forma de un gradiente horizontal, entonces la diferenciación y la integración se cancelan. Por lo tanto se tiene la misma expresión para la anomalía magnética de un dique delgado, excepto por una posible diferencia en el signo, dependiendo esto de donde esté localizado el límite del cuerpo, ya sea a la izquierda o a la derecha de la interfase del cuerpo ancho.

En otras palabras, el gradiente horizontal del campo total causado por el límite de una interfase de un cuerpo ancho, es igual al campo total causado por un dique delgado. Esto es un concepto muy útil cuando aplicamos el operador Werner al gradiente horizontal calculado del campo total con el propósito de resolver el límite de una interfase de un cuerpo ancho.

A continuación analizaremos lo anterior formalmente; considerando el límite de una interfase de un cuerpo ancho buzando, el cual se considera infinito en la dirección

positiva del eje z, como se muestra en la figura 4a.

Se puede pensar que la interfase del cuerpo ancho está compuesta de un número infinito de diques delgados infinitesimales, buzando paralelos a la interfase. En las ecuaciones 7 y 8 se tiene:

$$A = A' \Delta T$$

$$B = B' \Delta T$$

y de la figura 5 se tiene:

$$\Delta T = \Delta x' \text{sen } \theta'$$

$$A = A' \text{sen } \theta' \Delta x' = A'' \Delta x' \quad (14)$$

$$B = B' \text{sen } \theta' \Delta x' = B'' \Delta x'$$

De las ecuaciones 11 y 14, se tiene que la anomalía magnética total causada por el límite de la interfase está dada por:

$$T(x, 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{A''(x - x') + B''D}{(x - x')^2 + D^2} dx'$$

Obteniendo el gradiente horizontal de la anomalía magnética total se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{dT(x, 0)}{dx} &= \frac{d}{dx} \int_{-\infty}^0 \frac{A''(x - x') + B''D}{(x - x')^2 + D^2} dx' = \\ &= \int_{-\infty}^0 \frac{d}{dx} \frac{A''(x - x') + B''D}{(x - x')^2 + D^2} dx' \end{aligned}$$

Si $f(x - x')$ entonces $\frac{d}{dx} = -\frac{d}{dx'}$
por lo tanto:

$$\frac{dT(x; 0)}{dx} = - \int_{-\infty}^0 \frac{d}{dx'} \frac{A''(x - x') + B''D}{(x - x')^2 + D^2} dx' =$$

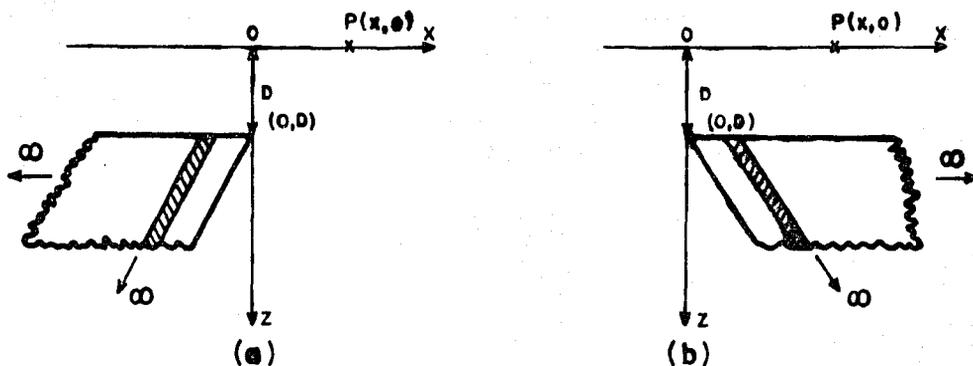


FIG. 4

Parámetros del borde de la interfase de un cuerpo en 2D

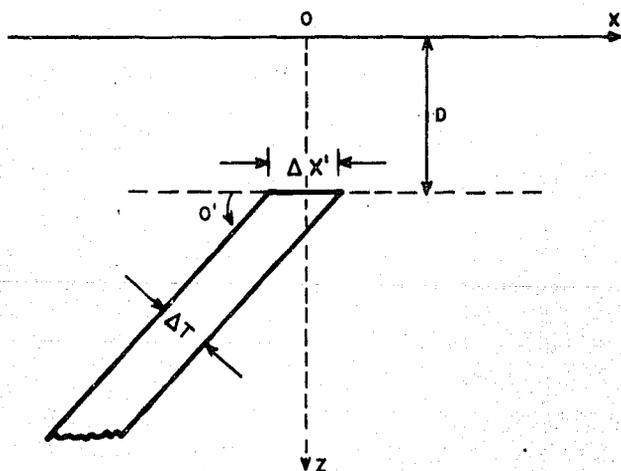


FIG. 5

Parámetros de un dique inclinado delgado en 2-D

$$= - \frac{A''(x - x') + B''D}{(x - x')^2 + D^2} \Big|_{-\infty}^0$$

$$\frac{dT(x,0)}{dx} = - \frac{A''x + B''D}{x^2 + D^2}$$

Para un punto localizado arbitrariamente $(x_0, 0)$ se tiene:

$$\frac{dT(x,0)}{dx} = - \frac{A''(x - x_0) + B''D}{(x - x_0)^2 + D^2} \quad (15)$$

Como se puede ver las ecuaciones 15 y 11 son idénticas excepto por el signo, por lo tanto se puede emplear la solución del gradiente horizontal para determinar la profundidad, localización horizontal, ángulo de echado y susceptibilidad magnética de una interfase, teniendo en mente que el ángulo de echado calculado, está en la dirección opuesta al ángulo de echado verdadero de la interfase.

También se debe notar que el cálculo de la susceptibilidad magnética debe dividirse por el $\sin \theta$ como se observa en las ecuaciones 10 y 14. Por otro lado, si la interfase del cuerpo se extiende hacia el infinito en la dirección positiva del eje x como se muestra en la figura 4b, entonces el gradiente horizontal del campo total está dado por:

$$\frac{dT(x,0)}{dx} = \frac{A''(x - x_0) + B''D}{(x - x_0)^2 + D^2} \quad (16)$$

esta ecuación es idéntica a la ecuación 11, en este caso, el cálculo del ángulo de echado del gradiente horizontal es el mismo que el ángulo de echado verdadero de la interfase.

II.4. OPERADORES EMPLEADOS PARA EL CALCULO DEL GRADIENTE HORIZONTAL

Se usaron dos operadores para el cálculo del gradiente horizontal.

El primero se calculó por interpolación Lagrangiana (Chao, C. Ku and John A. Sharp 1983), para siete puntos. Sean TM_1, TM_2, \dots, TM_7 los valores del campo total en siete puntos consecutivos x_1, x_2, \dots, x_7 entonces:

$$T(x) = \frac{(x - x_2)(x - x_3) \dots (x - x_7)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3) \dots (x_1 - x_7)} TM_1 + \dots + \frac{(x - x_1)(x - x_3) \dots (x - x_7)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3) \dots (x_2 - x_7)} TM_2 + \dots + \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_6)}{(x_7 - x_1)(x_7 - x_2) \dots (x_7 - x_6)} TM_7$$

Para obtener los valores del gradiente horizontal en $x = x_4$ para un muestreo igualmente espaciado.

$$x = x_7 - x_6 = x_6 - x_5 = \dots = x_2 - x_1 = 1.0$$

Por lo tanto tenemos:

$$\frac{d}{dx} T(x_4) = \frac{(x_4 - x_2)(x_4 - x_3) \dots (x_4 - x_7)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3) \dots (x_1 - x_7)} TM_1 + \dots + \frac{(x_4 - x_1)(x_4 - x_2) \dots (x_4 - x_6)}{(x_7 - x_1)(x_7 - x_2) \dots (x_7 - x_6)} TM_7$$

$$\frac{d}{dx} T(x_4) = 0.0166667(TM_7 - TM_1) - 0.15(TM_6 - TM_2) + \dots + 0.75(TM_5 - TM_3) \quad (17)$$

El segundo operador utilizado fué propuesto por Bhattacharyya (Bhattacharyya B. K. 1965) el cual se diseñó

en el número de onda y está representado como:

$$K(u, v) = (-i2\pi u)^n \quad \text{ó} \quad K(u, v) = (-i2\pi v)^n \quad (18)$$

En donde n nos indica el orden de la derivada, que para nuestro caso es de primero y así la respuesta es imaginaria y antisimétrica, en el dominio espacial el operador es real.

Aplicando la ecuación 18, se obtiene el operador en el dominio espectral, aplicando la transformada de Fourier se llevó al dominio espacial para obtenerse los pesos del operador, obteniéndose un operador de 8 puntos. Los pesos del operador de gradiente horizontal en $x = x_5$ para un muestreo igualmente espaciado son:

$$\frac{d}{dx}T(x_5) = 0.9481(TM_6 - TM_4) - 0.3927(TM_7 - TM_3) + \dots + 0.1621(TM_8 - TM_2) + 0.0TM_1$$

El cálculo del gradiente horizontal se obtuvo a partir de la convolución del perfil de intensidad magnética total con los operadores de gradiente horizontal y éste se efectuó en el dominio espacial.

$$\frac{d}{dx}T(x) = T(x) * \text{OPERADOR}$$

C A P I T U L O - I I I

CRITERIOS PARA EL EMPLEO DEL OPERADOR WERNER.

En el empleo del operador Werner es necesario considerar varios factores para obtener mejores resultados, así como también adquirir un buen criterio sobre los resultados que se van a obtener de la Deconvolución Werner. Entre los factores que se deben considerar están: un intervalo de muestreo apropiado de la anomalía observada, un tamaño de operador Werner apropiado y un criterio adecuado de los resultados obtenidos en cuanto a profundidad, susceptibilidad magnética y echado de los cuerpos calculados.

III.1. INTERVALO DE MUESTREO APROPIADO DEL PERFIL MAGNETICO.

El primer factor que se debe tomar en cuenta para la buena resolución del operador Werner es el intervalo de muestreo a considerar en el perfil magnético observado. Si se tuviera un perfil magnético observado en forma continua, sería el caso óptimo, aunque esto no es factible para trabajarse con operadores digitales.

De acuerdo a lo analizado en el Capítulo II.2 en nuestro caso particular tenemos un operador Werner digital de orden siete, ya que tenemos que resolver una matriz de 7×7 donde tenemos siete incógnitas.

Cuando se quiere digitalizar un perfil magnético de un mapa de Intensidad Magnética Total, es recomendable analizar las diferentes anomalías contenidas en el perfil y seleccionar la anomalía de mayor frecuencia, la cual es recomendable que sea digitalizada con dos o tres veces el número de puntos

del operador.

Ya que el operador es de 7 puntos, entonces es necesario que la anomalía de mayor frecuencia sea digitizada con un mínimo de 14 a 21 muestras.

Con base en lo anterior se determina el intervalo de muestreo apropiado para definir la anomalía más pequeña de nuestro perfil magnético observado, siendo este intervalo de muestreo el apropiado para todo el perfil magnético.

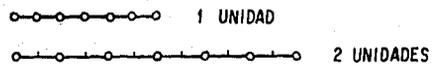
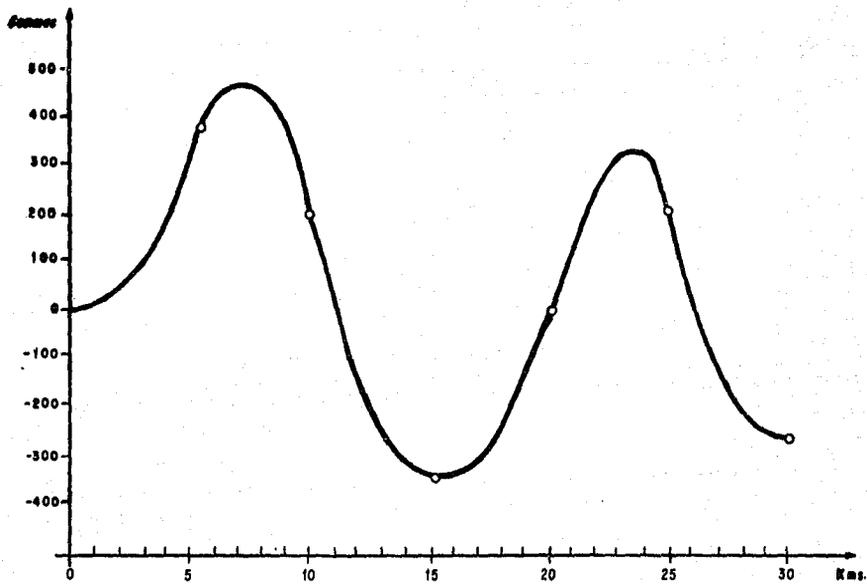
Por lo tanto, cuando se tiene un mapa de Intensidad Magnética Total y se traza el perfil sobre el plano se puede definir el intervalo de muestreo apropiado antes de digitalizar el perfil; para un perfil magnético ya digitalizado en donde posteriormente se determina el intervalo de muestreo, quizás sea necesario efectuar un remuestreo.

III.2. TAMAÑO APROPIADO DEL OPERADOR WERNER.

El operador Werner desarrollado en este trabajo es un operador de orden siete.

Considerando un intervalo de muestreo del operador Werner unitario, serán necesarias siete muestras consecutivas de la anomalía magnética observada para efectuar los cálculos de cada estación; para el caso en donde se tuviera un intervalo de operador de dos unidades; serán necesarias 13 muestras de la anomalía magnética observada para el cálculo de cada estación.

A continuación se muestra una gráfica en la figura 6 de la forma de como el operador considera las muestras para efectuar la Deconvolución.



INTERVALO DEL OPERADOR

**INTERVALO DE MUESTREO DEL OPERADOR WERNER
 SOBRE UN PERFIL MAGNETICO**

FIGURA 6

En el perfil magnético de la figura 6 se tiene un intervalo de muestreo unitario. Se observa que para el caso de un intervalo de muestreo unitario del operador se están considerando las primeras siete estaciones y se efectúan los cálculos de la Deconvolución Werner para la estación 3; para el caso donde se considera un intervalo de muestreo a cada 2 estaciones para el operador Werner, se consideran las 13 primeras estaciones en este caso se está efectuando la Deconvolución Werner sobre la estación 7; de lo anterior se deduce que la longitud del operador se modifica de acuerdo al intervalo de muestreo del operador.

En la aplicación del proceso de Deconvolución Werner sobre un perfil magnético es necesario elegir diferentes tamaños de operador Werner. El tamaño del operador a utilizar depende de la longitud de onda de la anomalía en estudio, en un perfil magnético generalmente se tienen anomalías con diferente longitud de onda, por lo tanto será necesario efectuar el proceso de Deconvolución Werner varias veces sobre un mismo perfil con diferentes longitudes de operador.

La longitud del operador Werner apropiada para una anomalía en particular depende de la longitud de onda de ésta; con base en la experiencia adquirida en los modelos hipotéticos tratados en el Capítulo IV, se recomienda que la longitud del operador sea de la mitad a dos terceras partes de la longitud de onda de la anomalía que se vaya a Deconvolucionar.

Cuando se emplea un operador de longitud pequeña con respecto a la longitud de la anomalía, la resolución que nos presenta es muy pobre y en algunos casos no es resolutivo; para el caso donde el operador es mayor que la longitud de onda de la anomalía, no se tiene una solución ó la solución presentada difiere de la correcta.

III.3. EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA Y ECHADO.

Debe notarse que en condiciones ideales la dirección del echado calculado por la Deconvolución Werner del gradiente horizontal debe ser aproximadamente perpendicular a la dirección del echado calculado por la Deconvolución Werner del campo total, esto es, que mientras uno es vertical el otro es horizontal y a la inversa. Esto es debido al hecho de que una esquina vertical, presenta una anomalía magnética similar a la que correspondería a una lámina delgada localizada horizontalmente.

Haciendo un análisis formal se puede justificar de la siguiente forma:

Si analizamos el espectro de fase de cualquier anomalía magnética, y suponemos que $T(\omega)$ es nuestra anomalía magnética y la descomponemos por su parte real e imaginaria tenemos:

$$T(\omega) = R(\omega) + iI(\omega)$$

El espectro de fase esta dado por la siguiente expresión:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{I(\omega)}{R(\omega)}\right)$$

Si obtenemos la primera derivada de $T(\omega)$ se tiene:

$$T'(\omega) = i(R(\omega) + iI(\omega)) = iR(\omega) - I(\omega)$$

Por lo tanto, el espectro de fase de la primera derivada es:

$$\varphi' = \tan^{-1}\left(-\frac{R(\omega)}{I(\omega)}\right)$$

Tomando en cuenta lo anterior se concluye lo siguiente:

$$\varphi = \varphi' + \pi/2$$

En la expresión anterior se tiene un defasamiento de 90 grados entre la fase de la señal de la anomalía magnética y la fase de la primera derivada de la anomalía magnética.

El algoritmo de Deconvolución Werner para el cálculo de la susceptibilidad magnética, parte de la suposición de que la fuente principal es un dique del cual se estima la anchura de su cima, se considera como dato en el programa de Deconvolución Werner.

En un perfil magnético normalmente se tienen cuerpos anómalos con diferentes tamaños, al efectuar la Deconvolución Werner el algoritmo considera una anchura constante para todos los cuerpos presentes en el perfil magnético, en estas condiciones se tiene que para el caso donde la anchura del cuerpo sea mayor que la propuesta, el algoritmo nos calculará una susceptibilidad magnética mayor y viceversa para el caso contrario.

Con base en las expresiones para el cálculo de la susceptibilidad magnética (Chao, C. Ku and John A. Sharp 1983) se efectuó un análisis de estas expresiones y se determinó una expresión la cual nos proporciona una estimación del contraste de susceptibilidad magnética en función de la anchura estimada y la anchura real del cuerpo anómalo.

Sea:

$$\Delta T_p \text{ SMp} = \Delta T_v \text{ SMv}$$

Donde:

ΔT_p = Anchura propuesta

SMp = Susceptibilidad magnética calculada con el cuerpo propuesto

ΔT_v = Anchura estimada como verdadera

SMv = Susceptibilidad magnética estimada como verdadera

Se recomienda considerar la anchura del cuerpo propuesto con un valor unitario y a partir de éste se calcula la susceptibilidad magnética estimada como verdadera para cada cuerpo anómalo presente en el perfil magnético.

Una forma de conocer la anchura real aproximada de cada cuerpo anómalo es auxiliándose del gradiente horizontal y observando las características de las anomalías presentes en el perfil magnético.

Un análisis del echado y la susceptibilidad magnética calculados nos ayuda a determinar la posible fuente anómala.

El echado calculado por la Deconvolución Werner del gradiente nos representa el echado de interfases, orillas ó contactos.

El echado calculado por la Deconvolución Werner del campo total representa el echado de diques, cuerpos delgados ó sills.

La susceptibilidad magnética calculada por la Deconvolución del gradiente representa el contraste de susceptibilidad magnética a través de interfases o contactos suponiendo únicamente que los contactos están buzando verticalmente. La susceptibilidad magnética calculada a partir de la Deconvolución del campo total representa el contraste de susceptibilidad magnética entre el dique y el material circundante.

C A P I T U L O - I V

MODELOS HIPOTETICOS

Se usaron dos modelos hipotéticos para la aplicación de la Deconvolución Werner. Considerándose las siguientes etapas en el tratamiento de estos modelos.

1.- En la primera etapa se calculó el campo de Intensidad Magnética Total de cada modelo utilizándose el algoritmo de Talwani para dos dimensiones, considerando los siguientes parámetros:

- i).- Intensidad Magnética Total.....43154.0 gammas
- ii).- Inclinación Magnética.....47.1 grados
- iii).- Declinación Magnética.....6.75 grados
- iv).- Azimut de la Línea Magnética.....25.0 grados

Además en los modelos se consideraron que los cuerpos modelados tienen una magnetización inducida uniforme con una misma dirección de magnetización y no se tiene magnetización remanente.

2.- En la segunda etapa se obtuvo el gradiente horizontal con la convolución del perfil de Intensidad Magnética Total con un operador obtenido por interpolación Lagrangiana.

3.- En esta etapa se aplicó el algoritmo de Deconvolución Werner a los perfiles de intensidad magnética total y gradiente horizontal y de esta forma obtener una solución en donde se tiene profundidad, susceptibilidad magnética y echado.

A continuación se presentan los dos modelos propuestos así como un análisis de los resultados obtenidos.

IV.1. MODELO I

En este modelo se están considerando las características típicas que aparecen en un basamento donde no se tienen cambios de susceptibilidad magnética y sólo aparecen variaciones topográficas, presentando estructuras como Horts y Grabens.

Se considera una susceptibilidad magnética de 0.002 u.c.g.s. para todo el modelo.

El perfil presenta una longitud de 220 kilómetros, y se tiene un intervalo de muestreo de un kilómetro.

Para este modelo se calculó el campo de Intensidad Magnética Total tres ocasiones como sigue:

IV.1a. MODELO Ia

En el primer cálculo se consideraron horts superficiales los cuales se encuentran a 2 kilómetros de profundidad y la parte donde se tienen las estructuras más profundas están a 9 kilómetros como se puede observar en la figura 7.

Para la Deconvolución Werner del perfil se consideró un tamaño del operador Werner de 12 y 18 kilómetros; debido a que el tamaño de las anomalías presentes en el perfil son aproximadamente de 20 a 30 kilómetros y la idea es tener un operador con el cual se pueda considerar por lo menos la mitad de la anomalía que se va a convolucionar en el perfil, con el operador considerado con un tamaño de 12 kilómetros que es el que se presenta en la figura 7 se obtuvieron mejores resultados, las profundidades obtenidas con la Deconvolución del gradiente horizontal fueron buenas ya que nos determinan todos los cambios topográficos en el basamento; las profundidades obtenidas con la Deconvolución del campo de Intensidad Magnética Total aparecen mas

profundas esto es debido a que el campo de Intensidad Magnética Total nos presenta buena resolución para cuerpos tabulares y no para cambios topográficos en el basamento.

Los echados calculados por el algoritmo son bastante aproximados cabe señalar que estos echados calculados son un promedio de las zonas donde se tienen concentrados varios puntos tanto para el gradiente horizontal como para el campo total.

Los valores de susceptibilidad magnética que aparecen en el gráfico están afectados por la anchura que se supone, tiene el cuerpo tabular la cual se está considerando de un kilómetro; en el modelo se tienen cuerpos de diferentes tamaños de tal forma que es necesario efectuar un análisis para cada cuerpo presente en el modelo para calcular la susceptibilidad real.

IV. 1b. MODELO Ib

En el segundo cálculo se consideró el mismo modelo que en el caso anterior, variando solamente la profundidad de todo el modelo de tal forma que los horts más superficiales se encuentran a 6 kilómetros y las zonas de las estructuras más profundas a 13 kilómetros como se muestra en la figura 8.

En el proceso de Deconvolución Werner de este perfil se utilizaron 3 operadores con un tamaño de operador de 12, 18 y 24 kilómetros, el operador con el que se obtuvo mejor resolución fue el de 12 kilómetros para las estructuras más someras y es la solución que se considera en la figura 8. Para el graben, el cual se encuentra a 10 kilómetros de profundidad se obtuvo buena resolución con el tamaño de operador de 24 kilómetros ya que con los operadores en algunos casos no aparecen soluciones para esta estructura profunda, en la gráfica de la figura 9 se muestra la

solución para el graben profundo obtenida a partir del operador con un tamaño de 24 kilómetros.

Los echados promedios calculados por el algoritmo son bastante aproximados a los reales, aunque se tiene mejor resolución en los cuerpos con echados verticales; los contrastes de susceptibilidad magnética promedios que aparecen en el gráfico están afectados por la anchura que se supone tiene cada estructura la cual no es la anchura real de cada estructura.

IV.1c. MODELO Ic

En el tercer cálculo se sigue conservando la misma morfología del modelo modificándose la profundidad, proponiéndose las zonas donde se encuentran las estructuras que se encuentran más someras a 10 kilómetros y la zona del graben más profundo se propone a 17 kilómetros bajo el nivel de referencia.

En la Deconvolución Werner de este perfil se utilizaron tamaños de operador de 12, 18 y 24 kilómetros, obteniéndose mayor aproximación en cuanto a profundidad para el operador de 12 kilómetros para las estructuras más someras, estos resultados se presentan en la figura 10; en las zonas en donde se tienen las estructuras más profundas se obtiene mejor resolución con el operador de 24 kilómetros en la gráfica de la figura 11 se presentan estos resultados; lo que cabe aquí señalar es de que las profundidades calculadas a partir del campo de Intensidad Magnética Total también se aproximan bastante a la solución correcta, esto no sucede en los modelos anteriores, la solución que se obtuvo en los otros calculos a partir del campo de Intensidad Magnética Total aparece más profunda que la profundidad real.

Los echados promedio calculados por el proceso de Deconvolución Werner, tienden a aproximarse en los cuerpos con interfases verticales, esto no sucede con las interfases de echados inclinados ya que aquí aparece el echado promedio orientado en forma opuesta al real; los contrastes de susceptibilidad magnética promedios calculados están afectados por la anchura que se presupone tiene cada estructura la cual no es la misma que la real de cada estructura; cabe aquí señalar que aún considerando la anchura real el valor calculado es un valor bajo comparado con el contraste de susceptibilidad magnética real y esto sucede para los tres cálculos en donde se consideraron diferentes profundidades para cada estructura.

IV.2. MODELO II

Este modelo tiene una extensión de 220 kilómetros con un intervalo de muestreo de cada kilómetro; aquí se consideran cambios en la susceptibilidad magnética en forma lateral lo cual en un modelo de basamento nos representa cambios litológicos, por otro lado se están considerando cuerpos intrabasamentales así como el efecto de cuerpos tabulares en forma de diques. Se proponen diferentes valores de susceptibilidad magnética para cada cuerpo los cuales varían de 0.001 a 0.008 u.c.g.s. y esto depende del tipo de elemento que se maneje.

Aquí como en el caso anterior se calculo el campo de Intensidad Magnética Total en tres ocasiones, considerándose diferentes profundidades del modelo en cada cálculo.

IV.2a. MODELO IIa

En el primer cálculo, la mayor parte del modelo se

encuentra a una profundidad de 6 kilómetros, los cuerpos tabulares propuestos se están considerando a 3 kilómetros; asimismo los cuerpos de tipo intrabasamental se consideran a 2 y 3 kilómetros de profundidad.

En este modelo la aplicación del proceso de Deconvolución Werner se aplicó usando 3 diferentes tamaños de operador, considerándose el de 6 que es el mas pequeño posible, ya que para definir el operador mínimo son necesarios 7 valores muestreados, así mismo se consideraron los operadores con un tamaño de 12 y 18 kilómetros. El operador con el que se obtuvieron mejores resultados fué de 6 kilómetros aunque con los otros dos operadores los resultados que se obtuvieron son bastante buenos; los resultados obtenidos con el operador de 6 kilómetros se muestran en la figura 12; aquí se observa que las soluciones obtenidas con el gradiente horizontal aparecen en las zonas en donde se tienen interfases, para los cuerpos tabulares, el campo de Intensidad Magnética Total nos dá buena aproximación en las profundidades calculadas.

Los echados promedios graficados que se calculan a partir del gradiente horizontal, son bastante aproximados comparados con los echados reales de las interfases así como los calculados a partir del campo de Intensidad Magnética Total, los cuales son considerados para los cuerpos tabulares; los valores de los contrastes de susceptibilidad magnética promedio que aparecen graficados para los cuerpos tabulares tienen buena aproximación con respecto a los valores reales; cabe aquí señalar que la anchura de estos cuerpos tabulares es la misma que se considera como estimada a la entrada del programa; en las interfases el valor promedio calculado se encuentra afectado por la anchura que se presupone tiene cada interfase la cual no es la real de cada interfase.

IV.2b. - MODELO IIb

En el segundo cálculo, las interfases consideradas en el modelo se encuentran a 10 kilómetros de profundidad, los tres cuerpos tabulares se proponen a 7 kilómetros de profundidad y los cuerpos de tipo intrabasamental se están proponiendo a 6 y 7 kilómetros de profundidad.

En este modelo, el proceso de Deconvolución Werner se procesó con tres diferentes tamaños de operador a 6, 12 y 18 kilómetros, el operador con el que se obtuvieron mejores resultados fue con el de 12 kilómetros, aunque con éste operador no fué posible definir uno de los límites de los cuerpos intrabasamentales y fue necesario considerar la solución obtenida con el operador de 6 kilómetros con el que sí se obtienen los límites de estos cuerpos, en las figuras 13 y 14 se muestran los resultados obtenidos tanto para el operador de 12 como para el de 6 kilómetros.

En la gráfica se observa que los echados promedios calculados a partir de la Deconvolución Werner del gradiente horizontal son bastante aproximados a los reales de cada interfase.

Los contrastes de susceptibilidad magnética promedios calculados a partir de la Deconvolución Werner del campo de Intensidad Magnética Total, se tiene mayor aproximación para los cuerpos someros; en cuerpos profundos los contrastes calculados son bajos en comparación con los reales.

IV.2c. MODELO IIc

En el tercer cálculo del modelo 2, las interfases profundas se propusieron a 14 kilómetros de profundidad, los 3

cuerpos tabulares se consideraron a 11 kilómetros de profundidad y los cuerpos intrabasamentales se proponen a 10 y 11 kilómetros de profundidad.

En esta sección el proceso de Deconvolución Werner se aplicó empleando 4 tamaños de operador diferentes, con 6, 12, 18 y 24 kilómetros; el operador que reportó mejores resultados fue el de 24, los resultados obtenidos con este operador se muestran en la figura 15 donde se tiene que el gradiente horizontal nos muestra los cambios litológicos del modelo; para los cuerpos suprabasamentales se tiene solamente un límite calculado para cada cuerpo; en los cuerpos tabulares no se tiene solución del campo de Intensidad Magnética Total.

Los echados calculados en las interfases son bastante aproximados a los reales y los valores de susceptibilidad magnética promedios son bajos en comparación a los contrastes reales; con el operador de 18 kilómetros se tiene solución sólo para 3 interfases, la cual se presenta en la figura 16 para los otros dos operadores las soluciones que aparecen son muy pobres.

MODELO I a

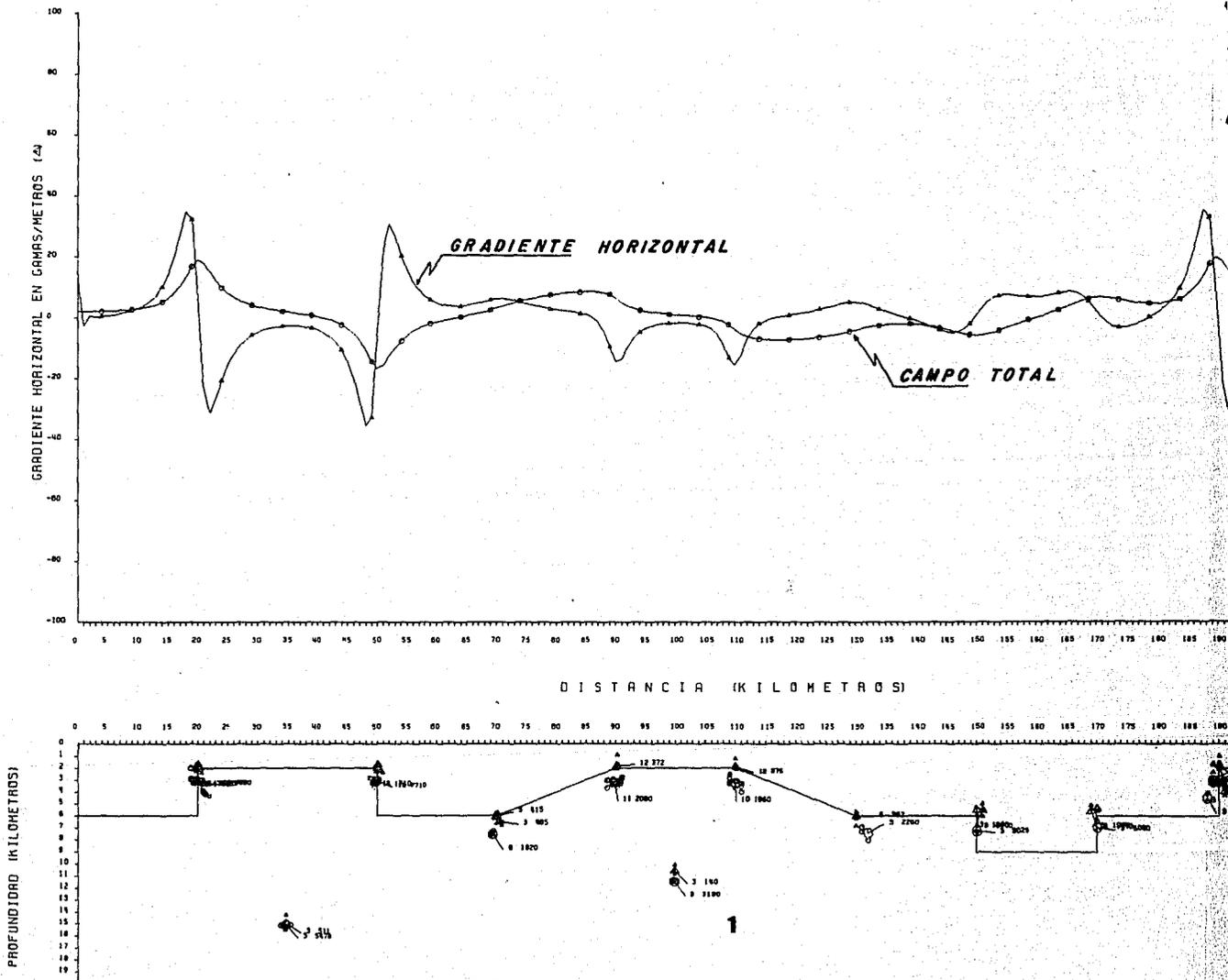
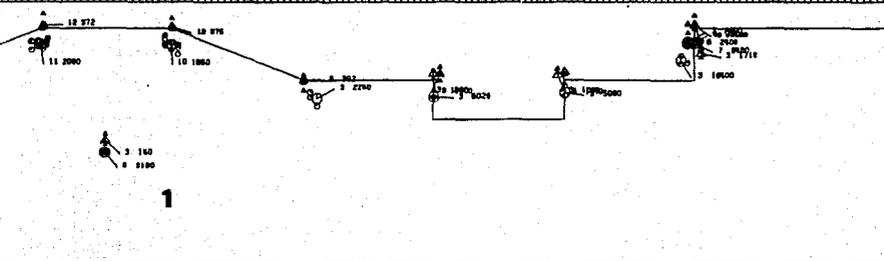
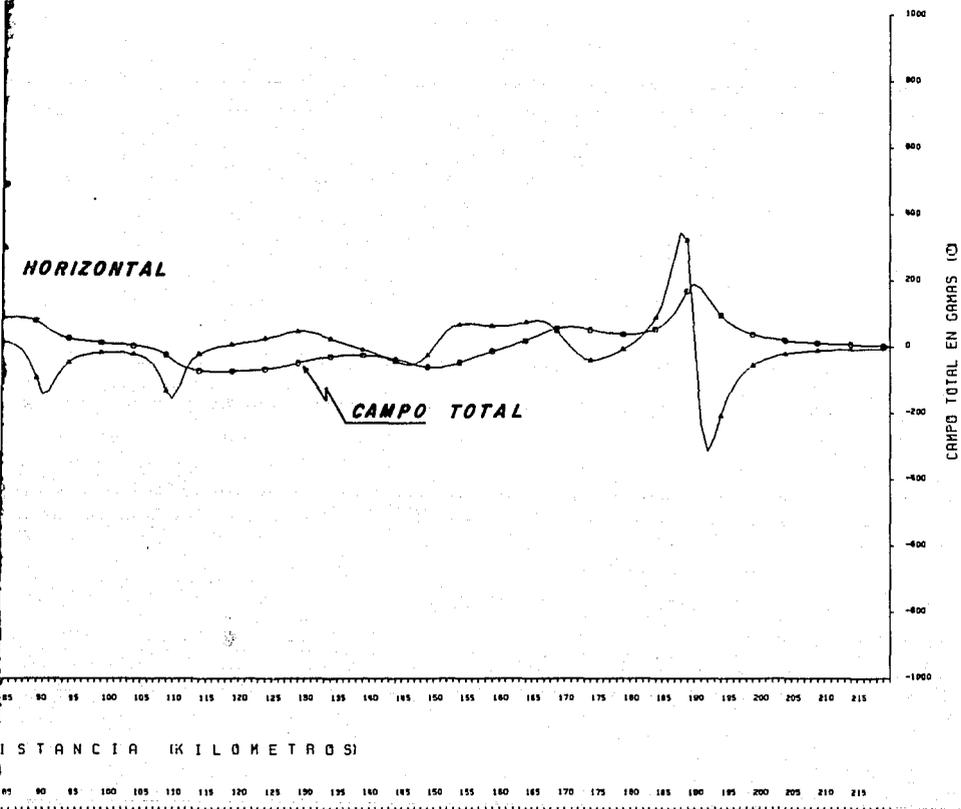


FIGURA 7

MODELO Ia



DATOS

CUERPOS	SUBCEPTIBILIDAD U. C. G. S.
1	0.002

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
12 KILOMETROS

FIGURA 7

MODELO Ib

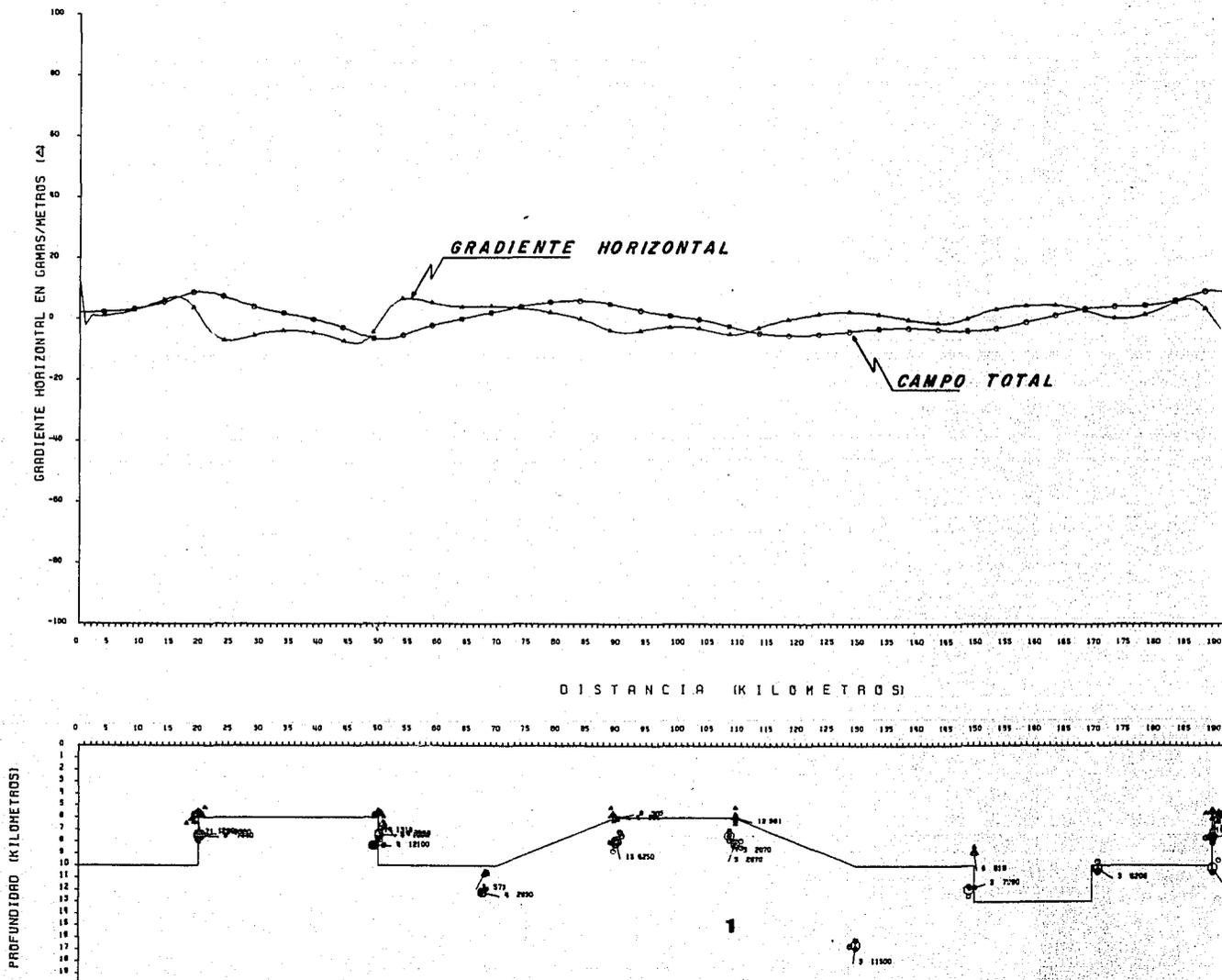
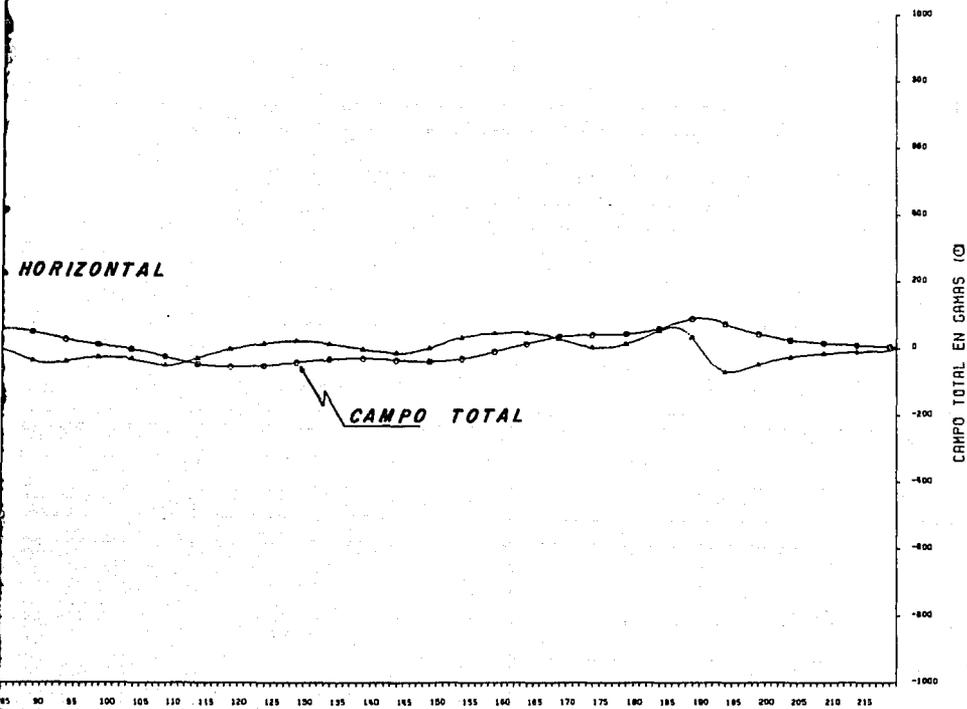


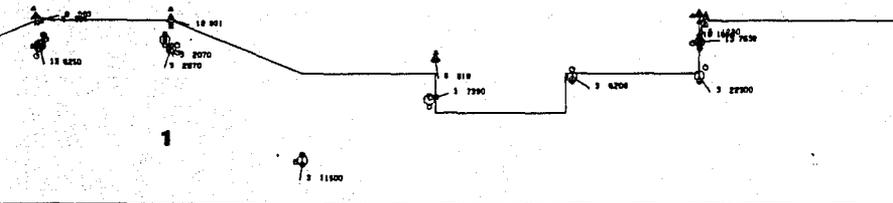
FIGURA 8

MODELO I b



DISTANCIA (KILOMETROS)

95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215



DATOS

CUERPOS	SUBCEPTIBILIDAD U. C. G. S.
1	0.002

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
12 KILOMETROS

FIGURA 8

MODELO I b

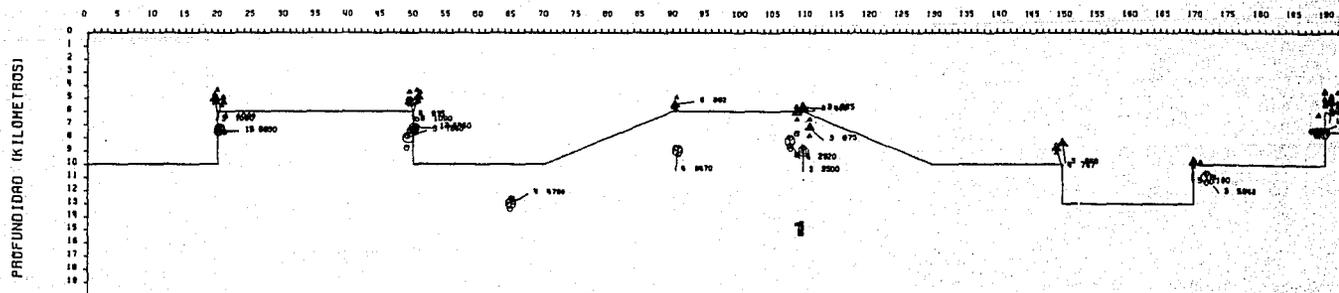
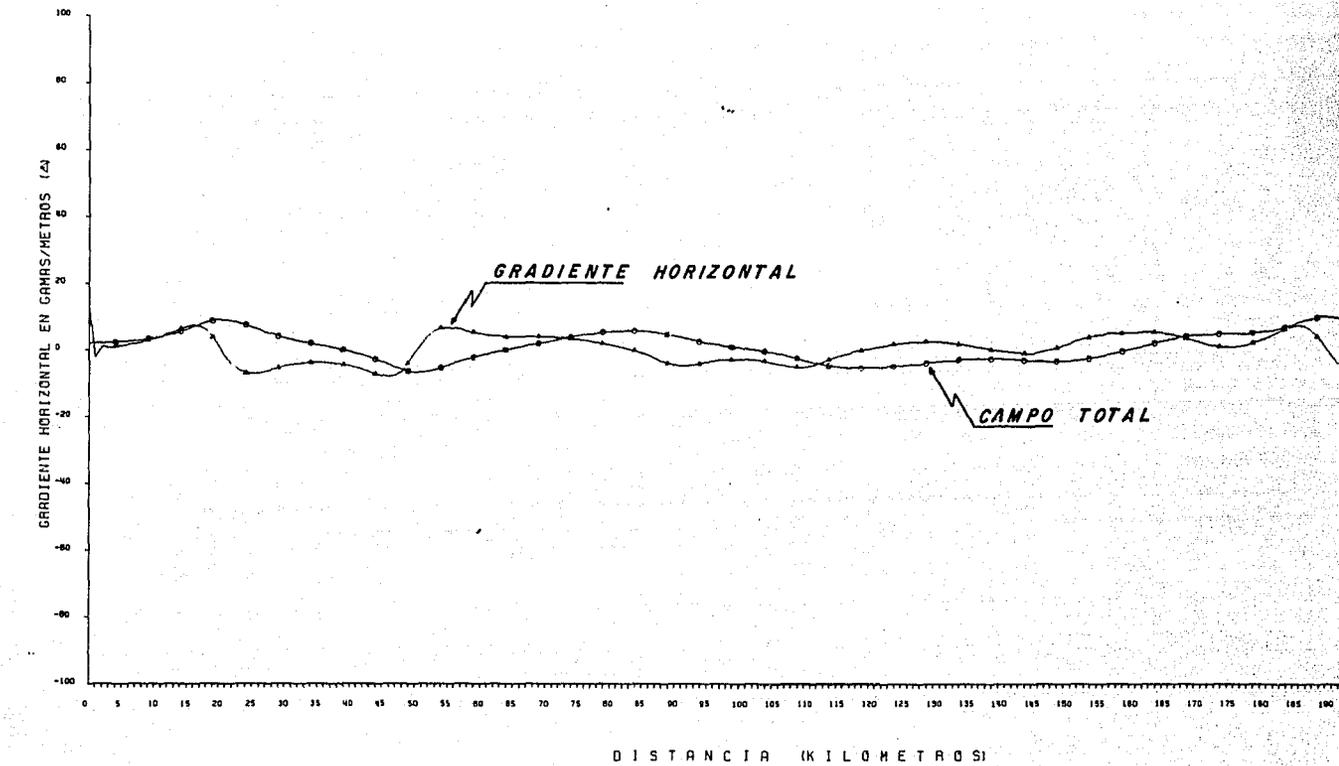
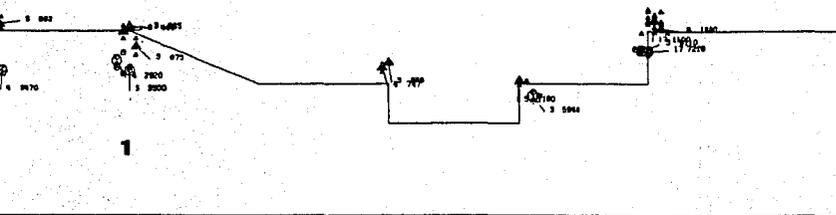
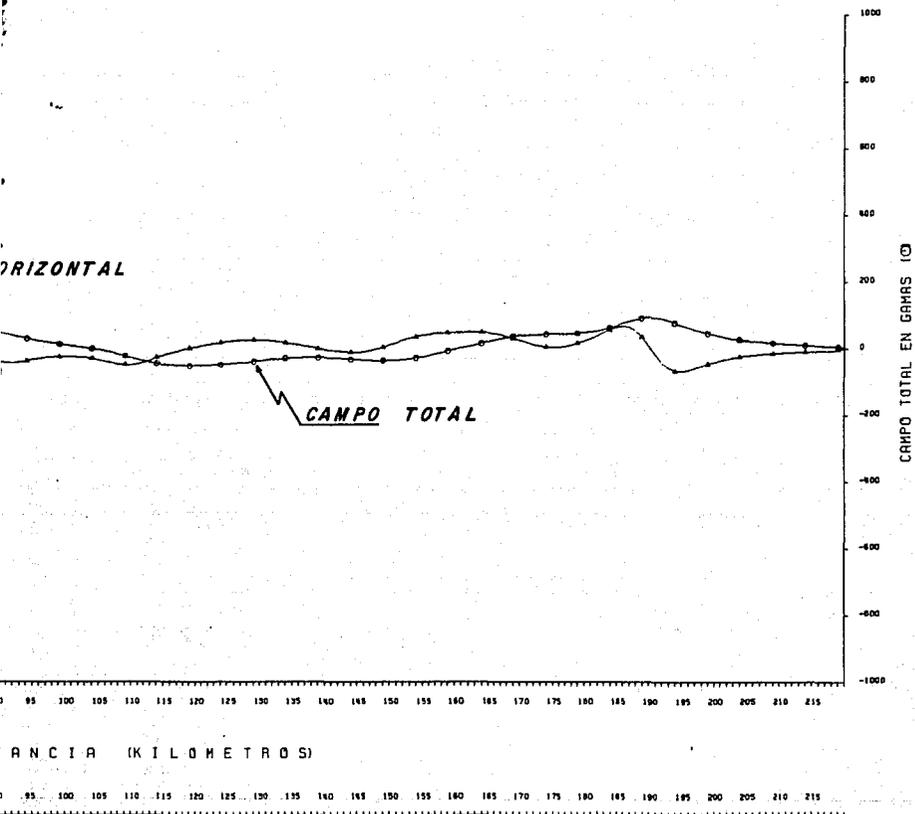


FIGURA 9

MODELO Ib

ORIZONTAL



DATOS

CUERPOS	SUSCEPTIBILIDAD U. C. G. S.
1	0.002

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
24 KILOMETROS

FIGURA 9

MODELO IC

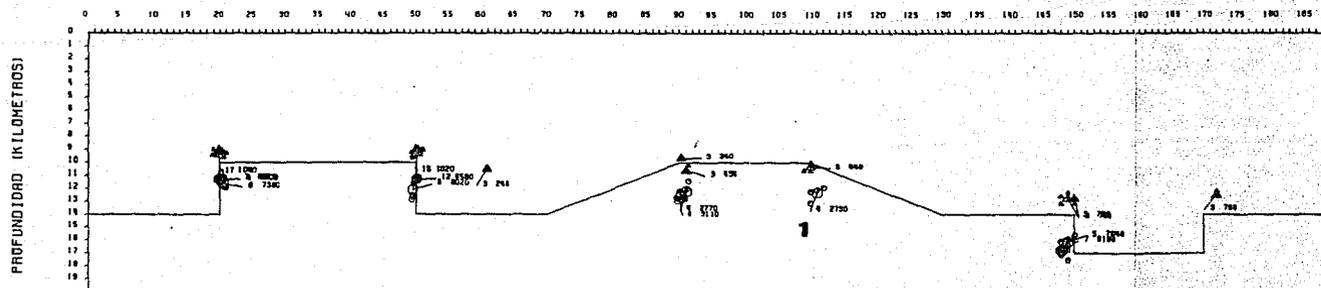
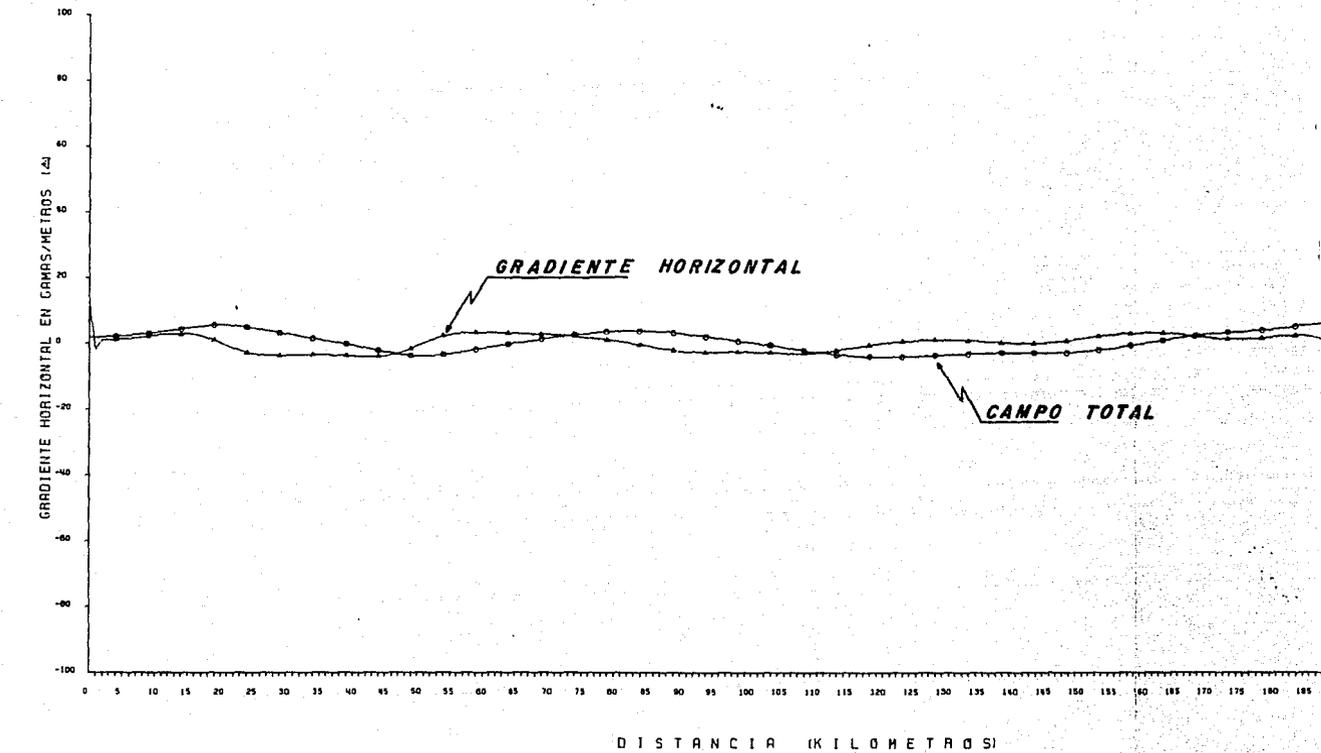
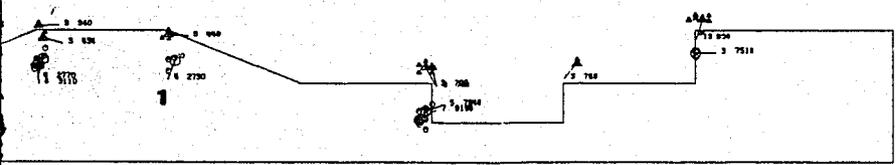
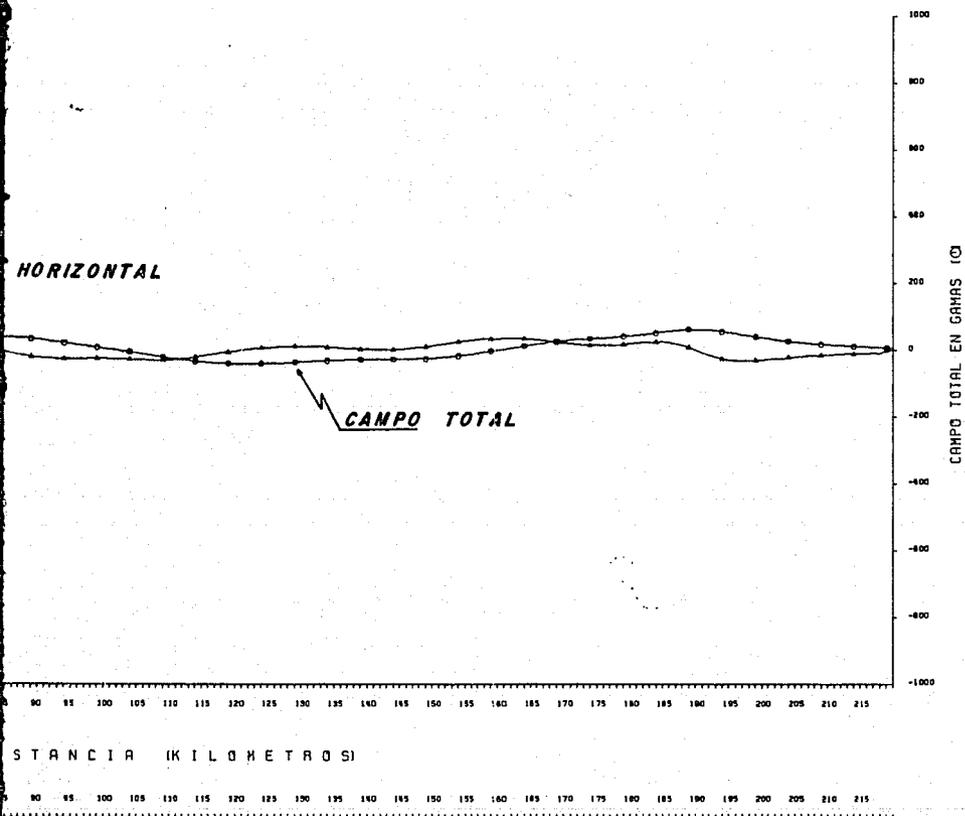


FIGURA 10

MODELO IC



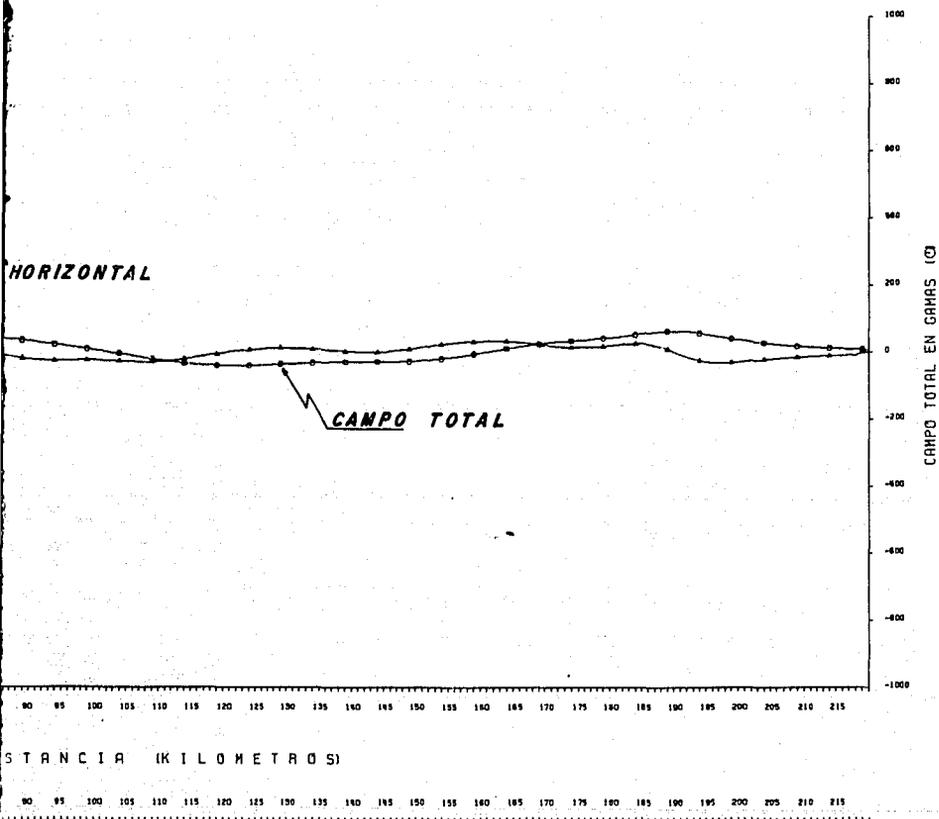
DATOS

CUERPOS	SUBCEPTIBILIDAD U. C. G. S.
1	0.002

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
12 KILOMETROS

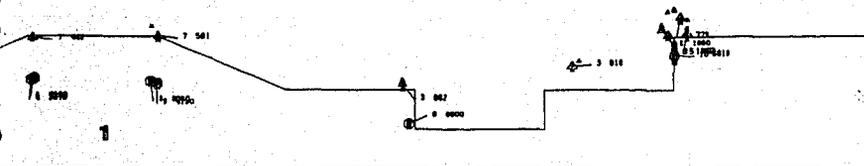
FIGURA 10

MODELO IC



STANCIA (KILOMETROS)

90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215



DATOS

CUERPOS	SUBCEPTIBILIDAD U. C. G. S.
1	0.002

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
24 KILOMETROS

FIGURA 11

MODELO II a

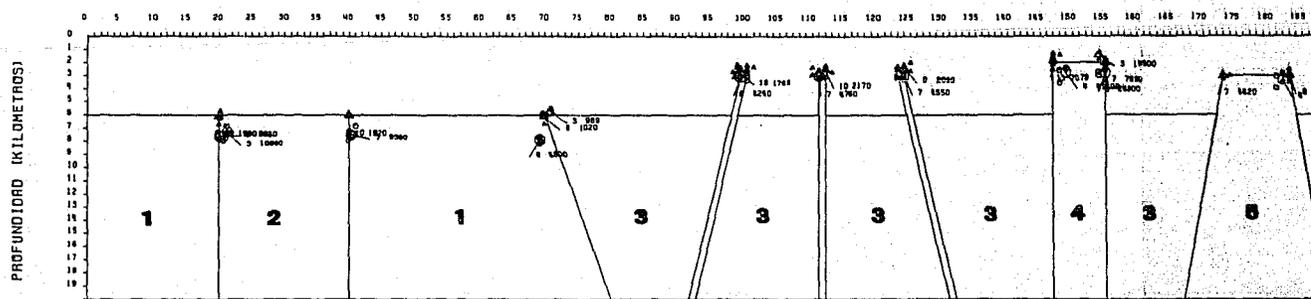
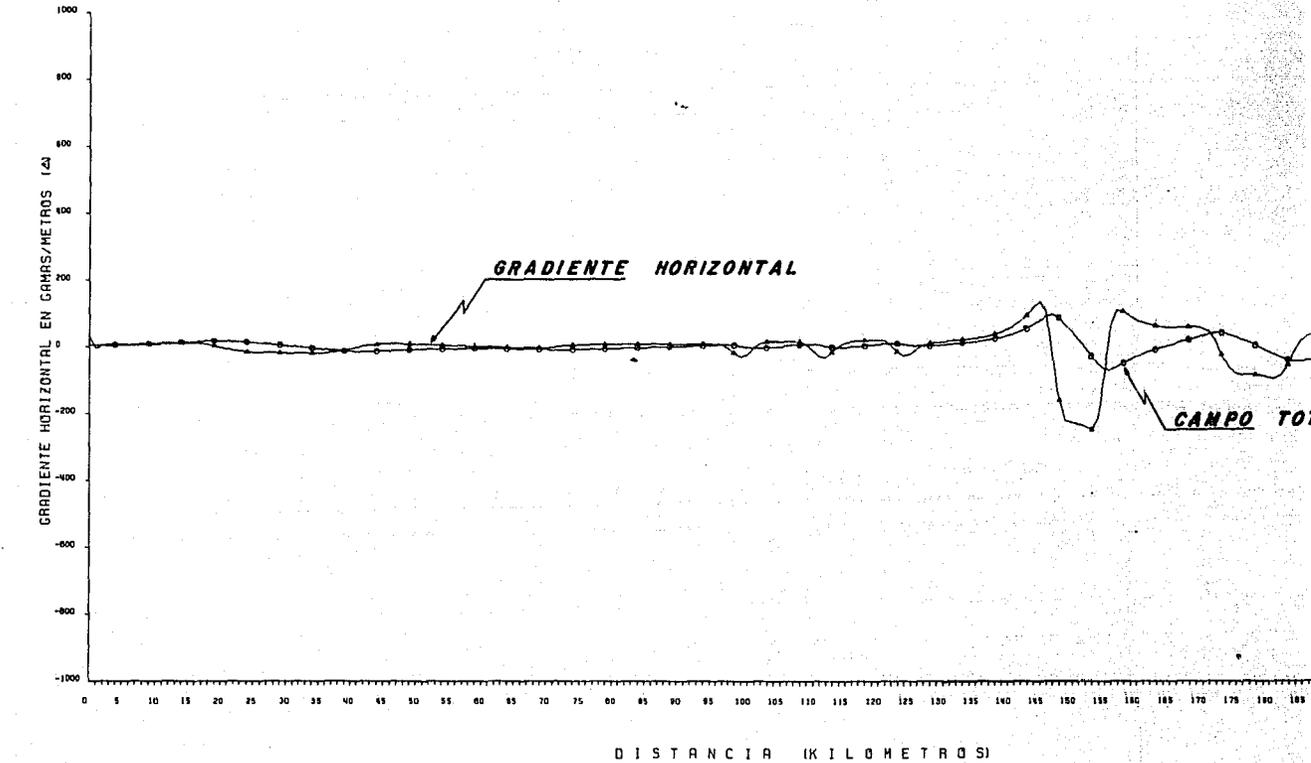
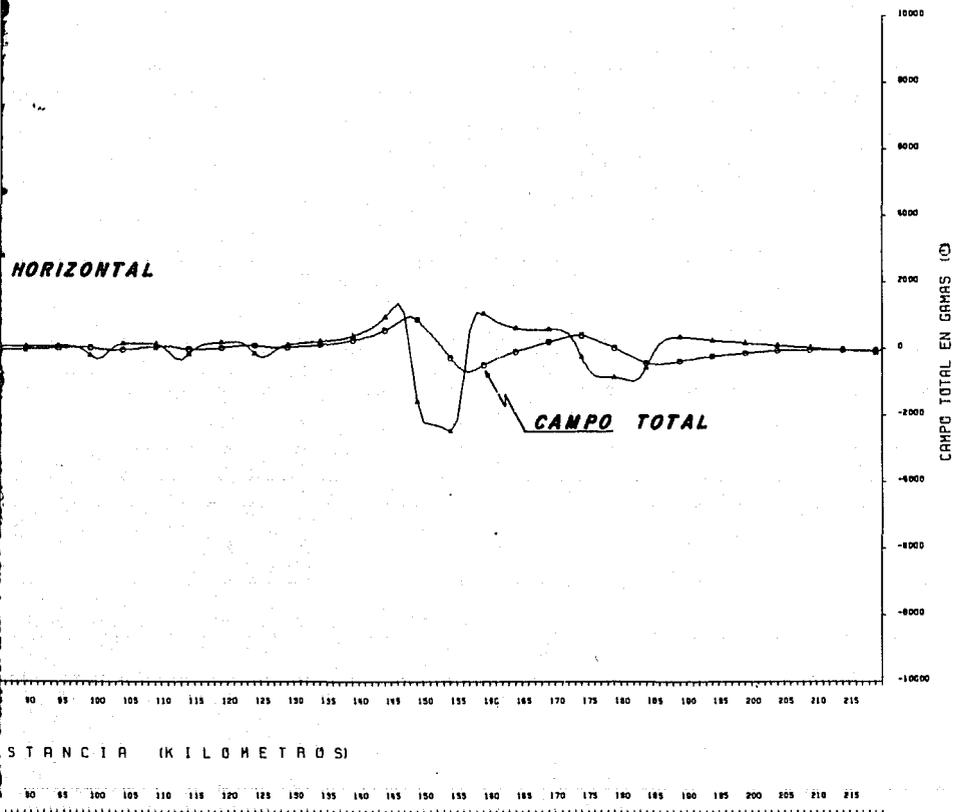


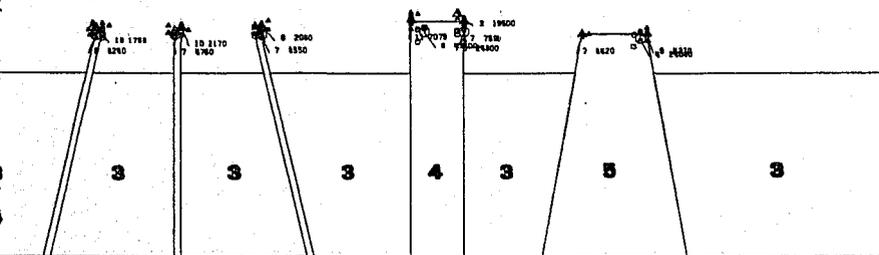
FIGURA 12

MODELO II a



STANCIA (KILOMETROS)

90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215



DATOS

CUERPOS	SUBCEPTIBILIDAD U.C.G.S.
1	0.002
2	0.004
3	0.001
4	0.008
5	0.005
DIQUES	0.005

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
6 KILOMETROS

FIGURA 12

MODELO II b

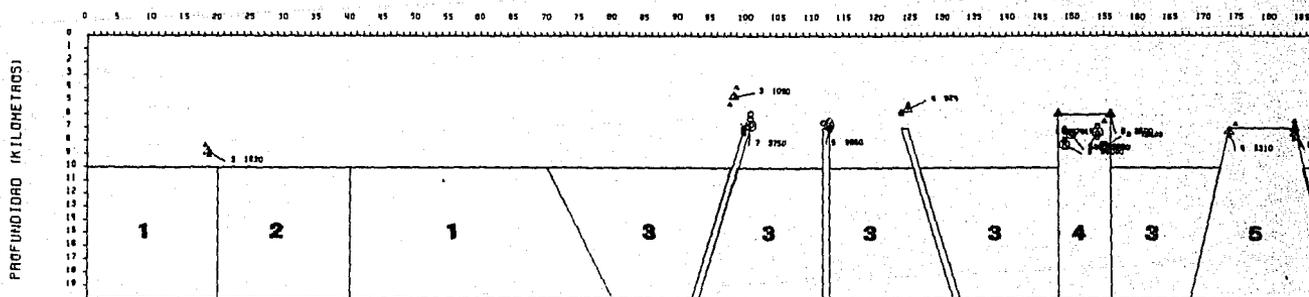
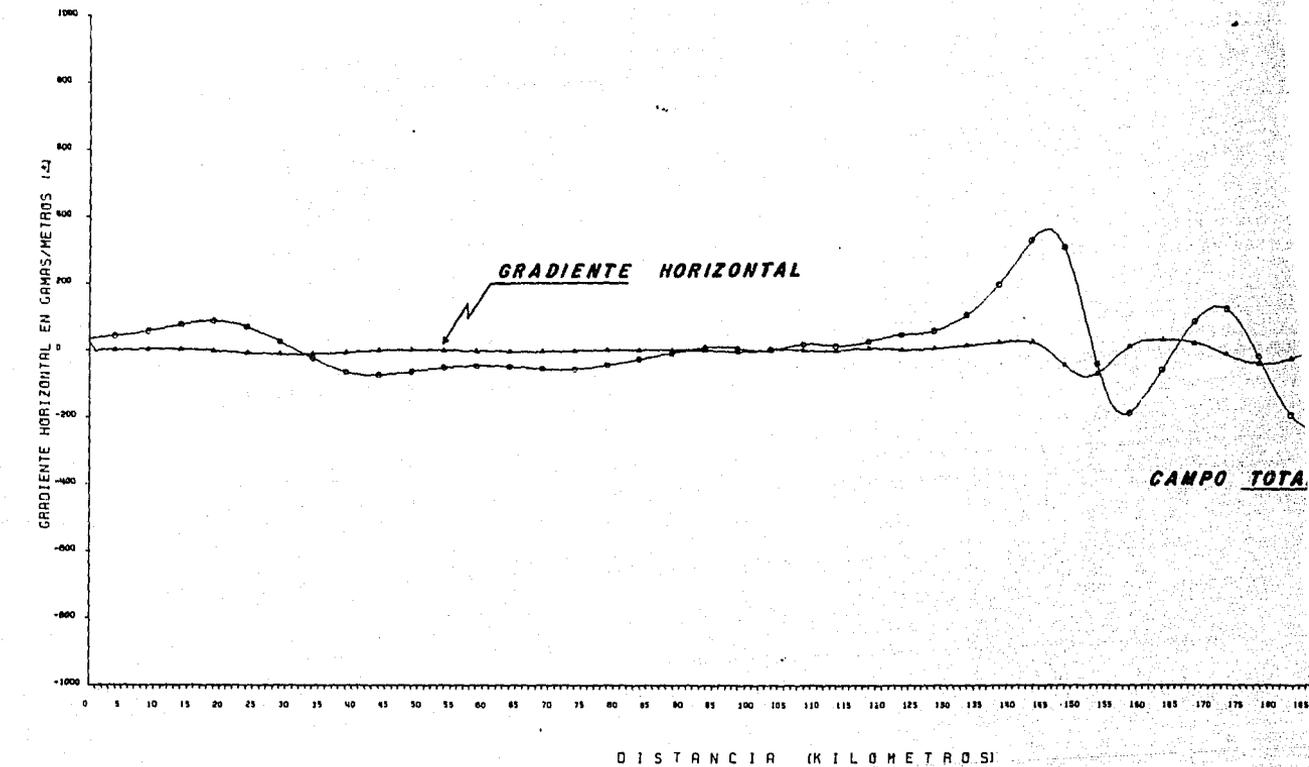
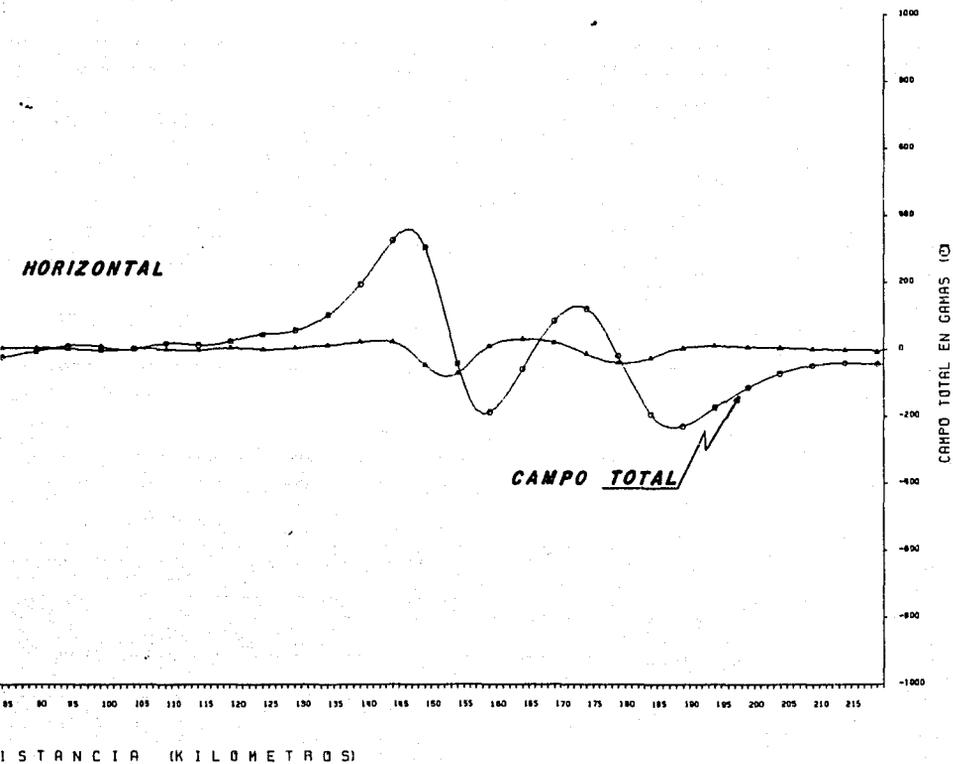


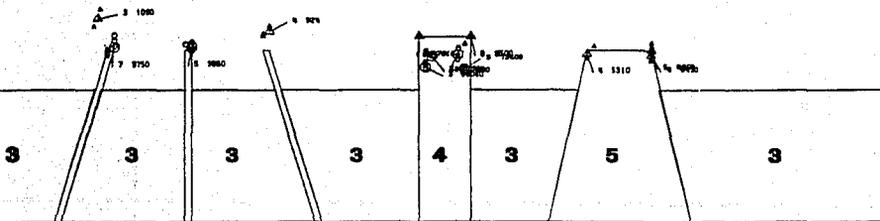
FIGURA 13

MODELO II b



DATOS

CUERPOS	SUBCEPTIBILIDAD U.C.G.S.
1	0.002
2	0.004
3	0.001
4	0.008
5	0.005
DIQUES	0.005



TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
6 KILOMETROS

FIGURA 13

MODELO II b

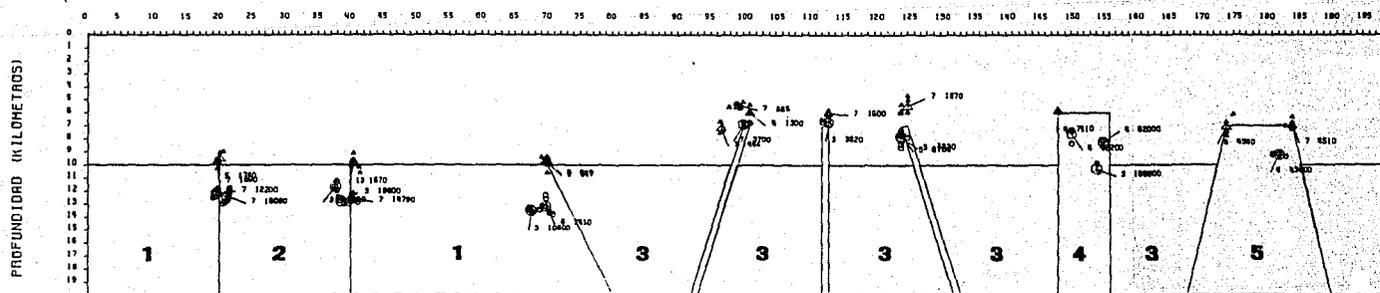
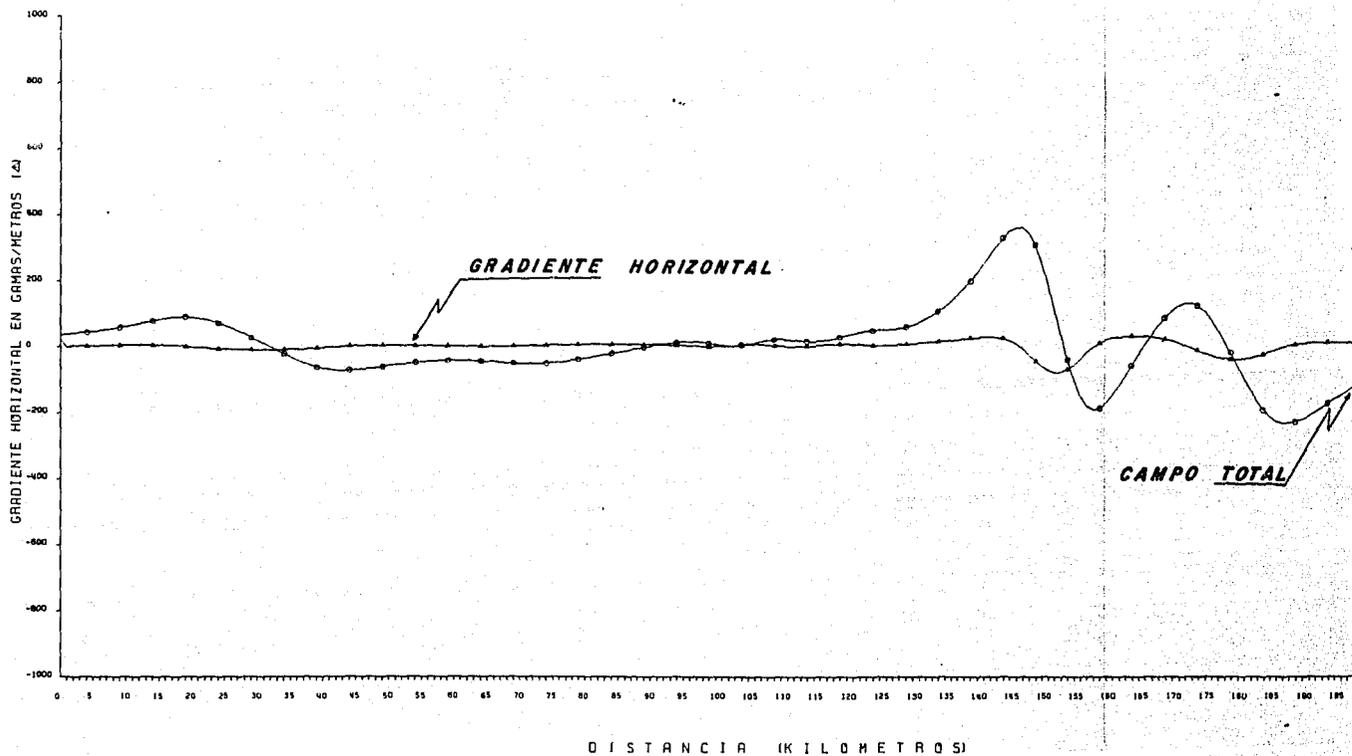
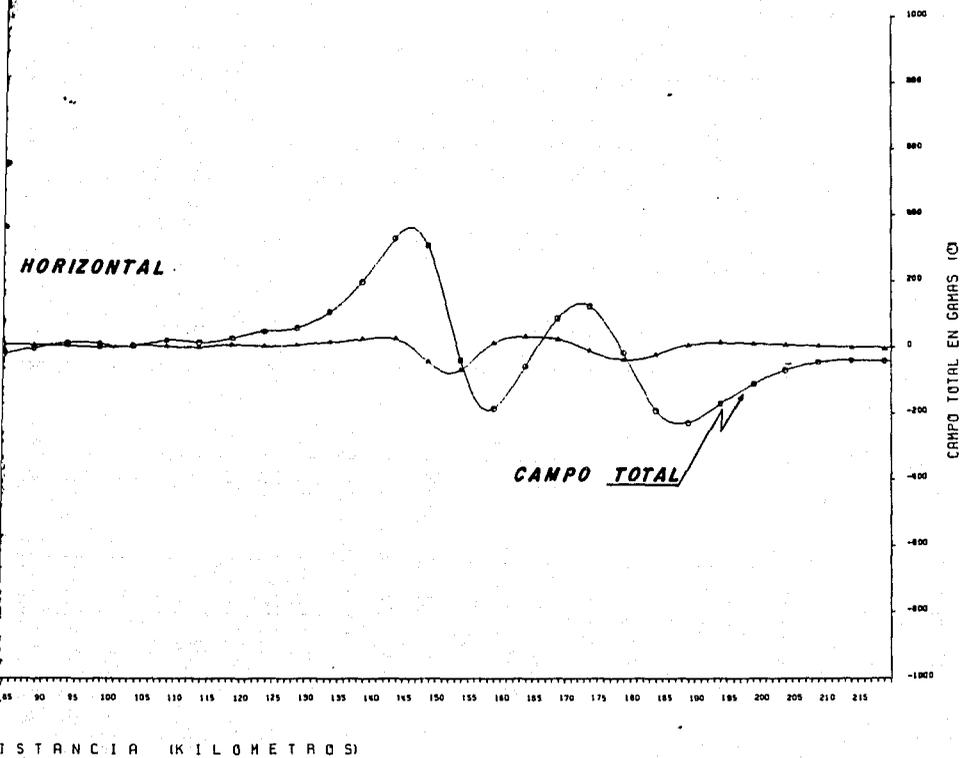


FIGURA 14

MODELO II b



DISTANCIA (KILOMETROS)

DATOS

CUERPOS	SUBCEPTIBILIDAD U.C.G.S.
1	0.002
2	0.004
3	0.001
4	0.008
5	0.005
DIQUES	0.005

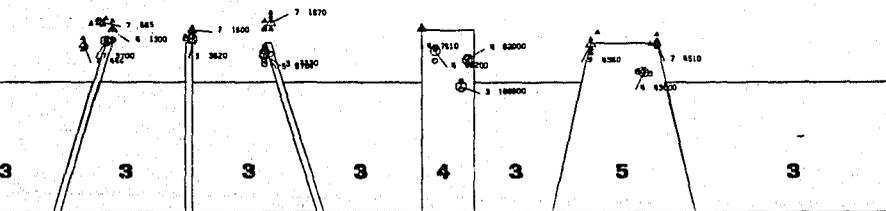


FIGURA 14

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
12 KILOMETROS

MODELO II c

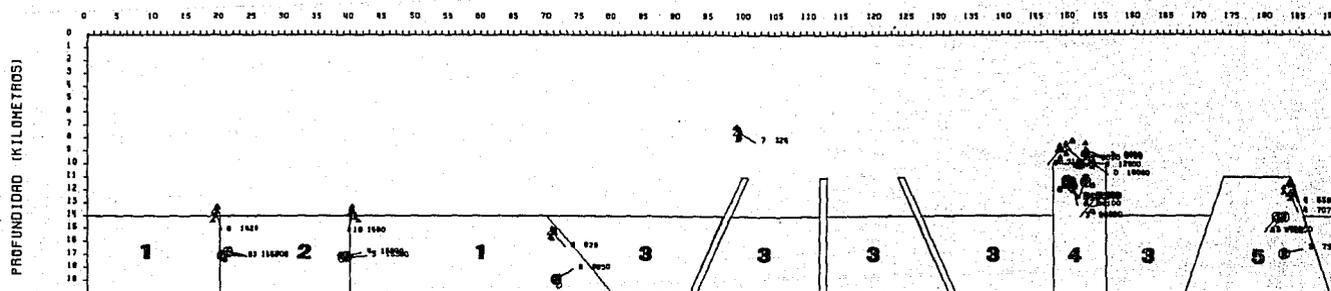
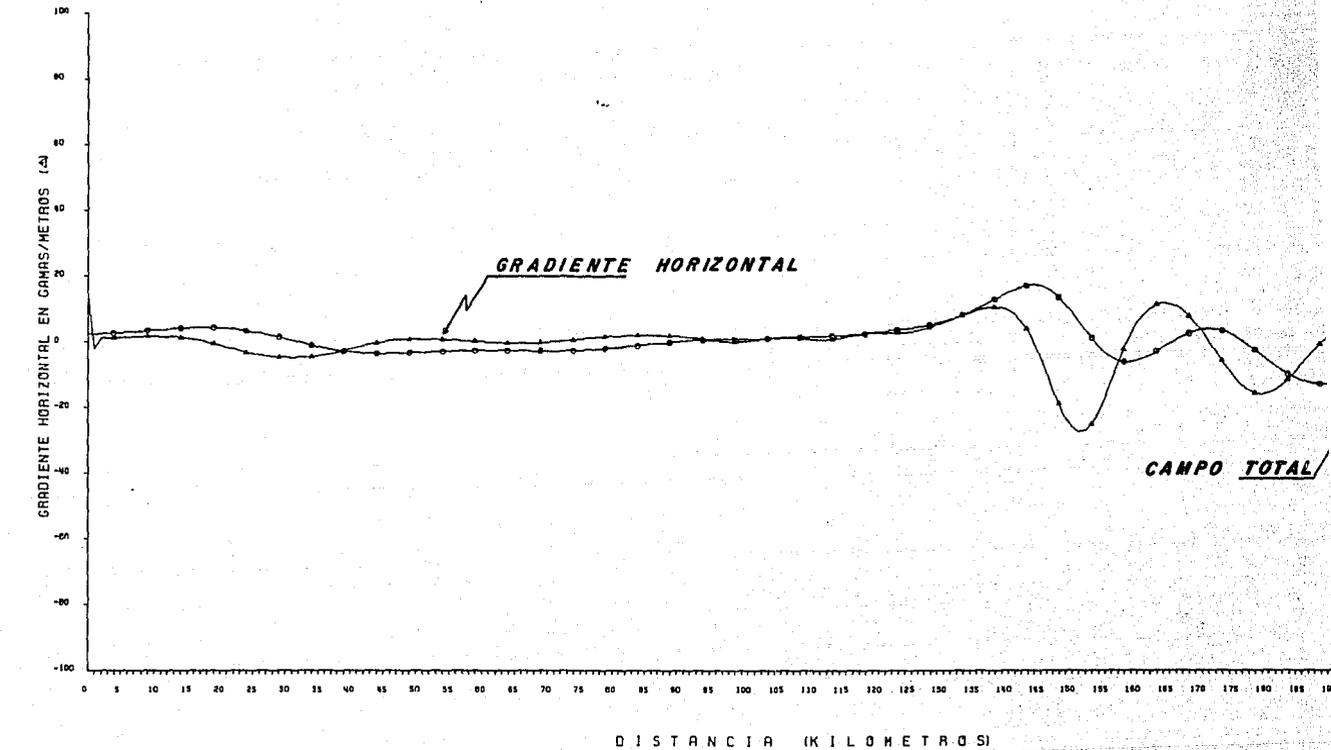
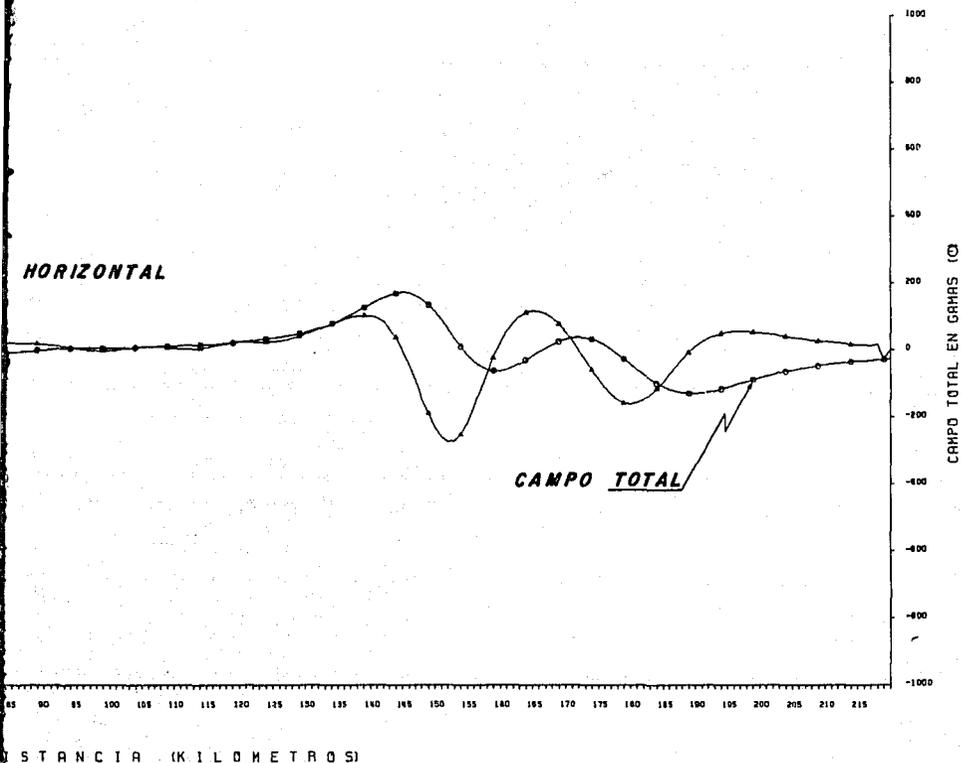


FIGURA 15

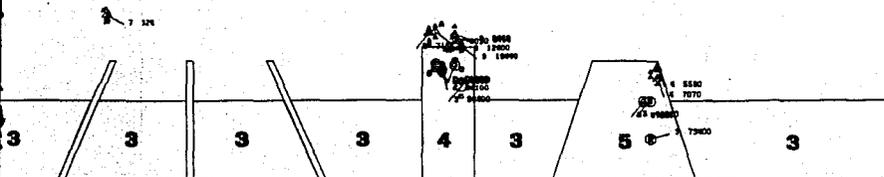
MODELO II c



DISTANCIA (KILOMETROS)

DATOS

CUERPOS	SUSCEPTIBILIDAD U.C.G.S.
1	0.002
2	0.004
3	0.001
4	0.008
5	0.005
DIQUES	0.005



TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
18 KILOMETROS

FIGURA 15

MODELO II c

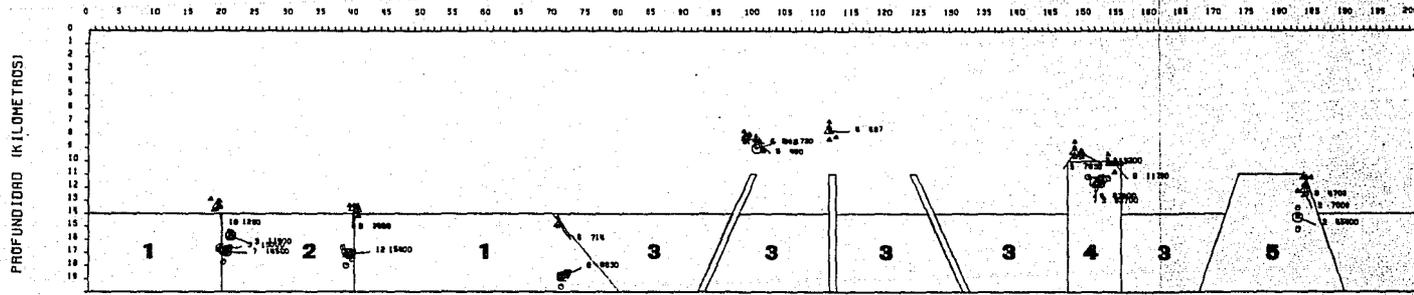
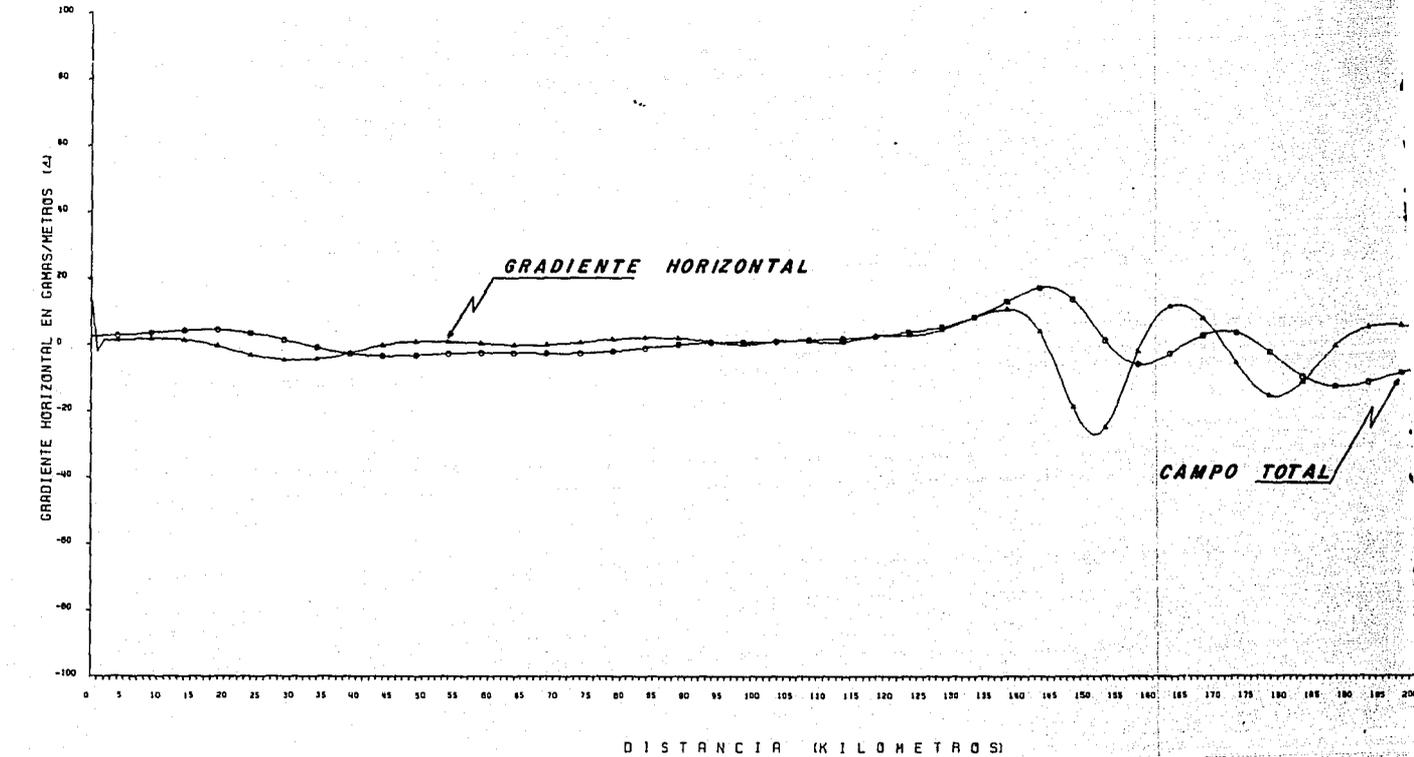
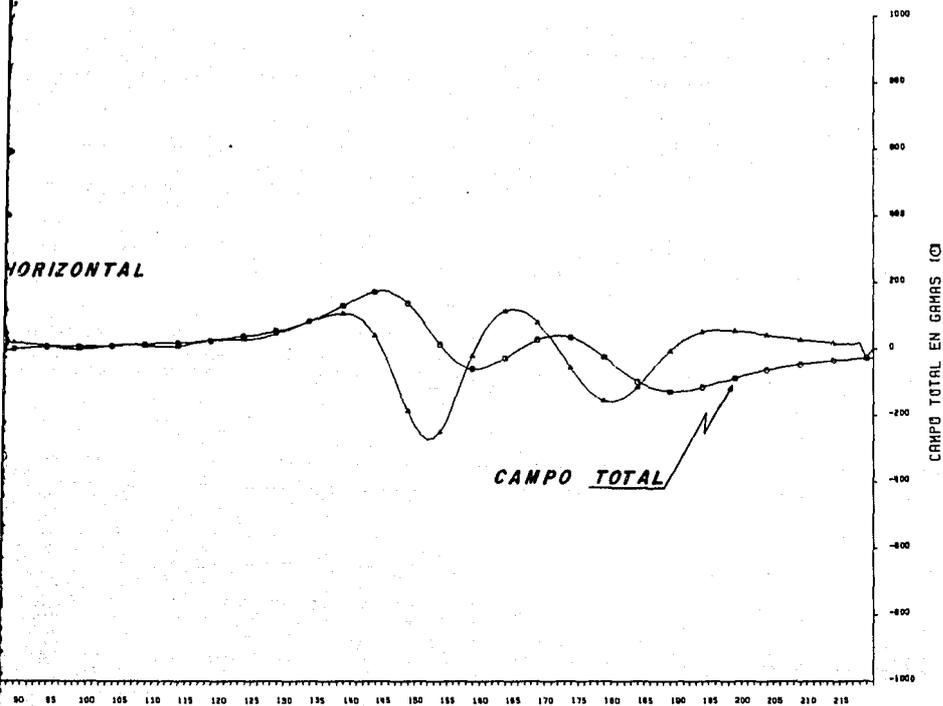


FIGURA 16

MODELO II C

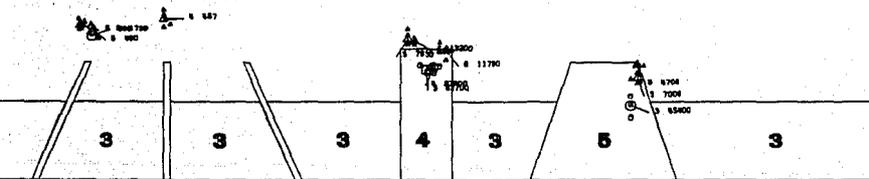


DISTANCIA (KILOMETROS)

90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160 165 170 175 180 185 190 195 200 205 210 215

DATOS

CUERPOS	SUSCEPTIBILIDAD U.C.G.S.
1	0.002
2	0.004
3	0.001
4	0.008
5	0.005
DIQUES	0.005



TAMANO DEL OPERADOR WERNER
24 KILOMETROS

FIGURA 16

C A P I T U L O V

APLICACION DE LA DECONVOLUCION WERNER A CASOS REALES.

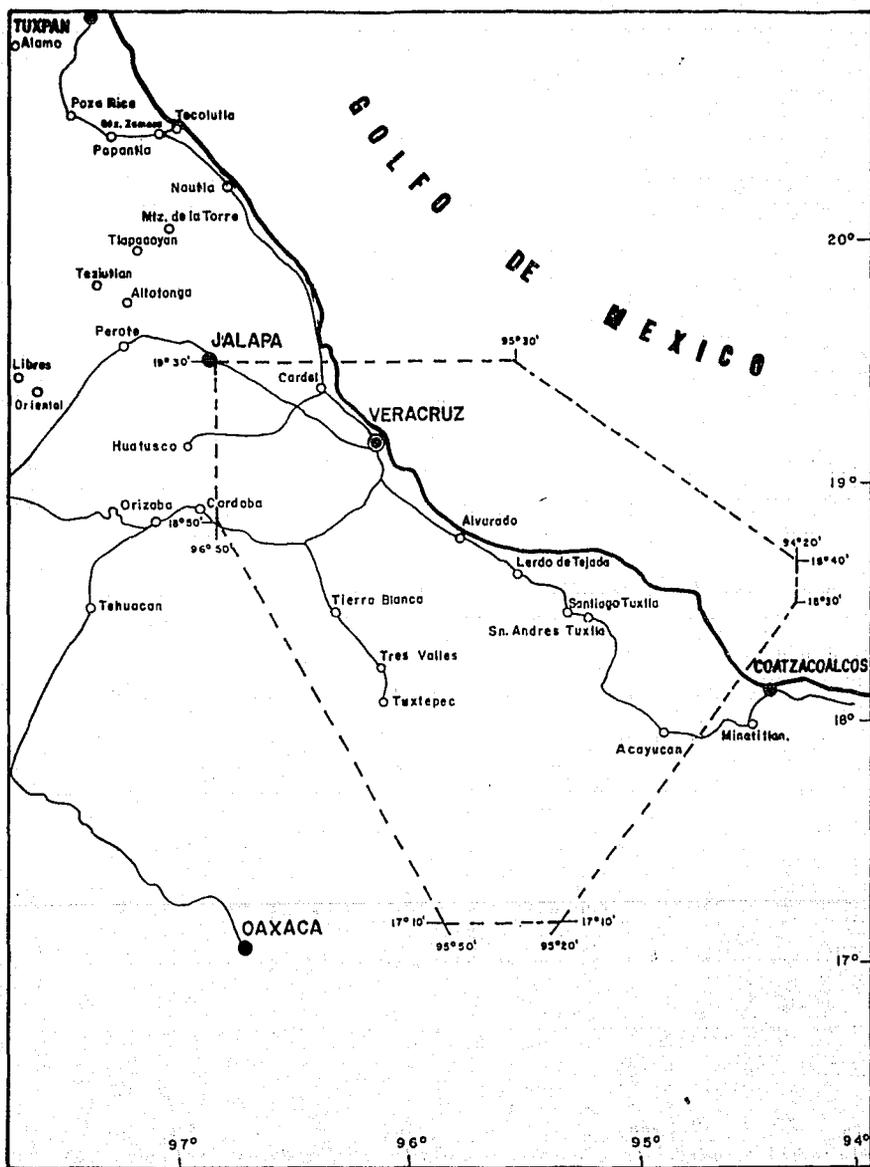
El programa de Deconvolución Werner se aplicó en el área que se tiene localizado en la Provincia Geológica de la Cuenca del Papaloapan, la cual cubre aproximadamente 42000 kilómetros cuadrados y abarca gran parte del Estado de Veracruz.

Esta limitada al Norte por el paralelo 19° 30' y hacia el Sur por el paralelo 17° 00' Latitud Norte, al Occidente por el meridiano 97° 00' y al Oriente por el meridiano 94° 30' longitud Oeste en la figura No. 17 se presenta el plano de localización, en donde se enmarca la zona que abarcan los datos aeromagnéticos que corresponden al área de estudio.

El objetivo principal de la aplicación de la Deconvolución Werner en el anterior área fué la determinación de la topografía del basamento magnético.

Los casos reales presentados en este trabajo son dos secciones magnéticas seleccionadas del anterior área. Estas secciones se eligieron debido a que la ubicación y orientación es la adecuada para la obtención de buenos resultados con la Deconvolución Werner, así mismo sobre estas secciones se tiene información de Geología de Subsuelo. En la figura 18 se presenta el plano de intensidad magnética total y las secciones magnéticas seleccionadas.

Primeramente se efectuó un análisis cualitativo del tipo de anomalías presentes en el plano de Intensidad Magnética Total, así mismo se analizó la Anomalia de Bouguer y con base en esto se seleccionaron las secciones tomando en consideración los siguientes criterios:



LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO
 FIGURA 17

i).- La posición de los eventos geológicos mas sobresalientes del área considerando perpendiculares las secciones a los alineamientos de carácter regional.

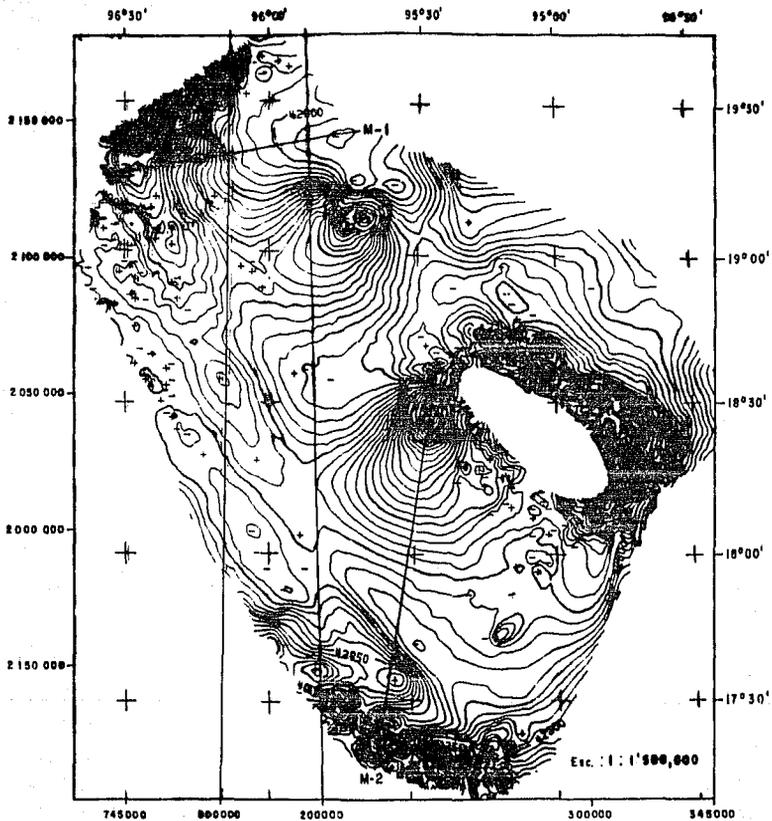
ii).- Por otro lado el funcionamiento del algoritmo de Deconvolución Werner nos proporciona resultados más confiables en zonas donde existen cambios litológicos ó estructuras grandes en el basamento, como por ejemplo grabens, horts, cuerpos intrabasamentales y suprabasamentales, y esto en la anomalía de Intensidad Magnética Total se manifiesta por un aumento en el gradiente, es por esto que se procuró que los perfiles sean lo mas perpendiculares a ese gradiente. Asimismo, el algoritmo de Deconvolución Werner proporciona resultados más confiables para estructuras someras, que nos sirven como puntos de control en la interpretación.

La metodología empleada en la interpretación de los perfiles magnéticos consistió de las dos etapas siguientes:

i).- En la primera se aplicó la Deconvolución Werner directamente de los perfiles de Intensidad Magnética Total, que fueron digitizados con un intervalo de muestreo de 1000 metros con diferente longitud de operador.

ii).- En la segunda etapa se aplicó el modelado magnetométrico en 2 1/2 dimensión (Cady J. W., Sweney, E.1982,), al modelo inicial construido con los parámetros proporcionados por la Deconvolución Werner que son: profundidad, contraste de susceptibilidad magnética y echado. El modelo se va modificando hasta lograr que el perfil magnético calculado se ajuste al observado, respetando tanto la geología superficial como del subsuelo.

Los parámetros usados en el cálculo de Intensidad Magnética Total y que corresponden a los del área en estudio son:



INTENSIDAD MAGNETICA TOTAL

FIGURA 18

i).- Campo de Intensidad Magnética Total	43154.0 gamas
ii).- Inclinación Magnética	47.1°
iii).- Declinación Magnética	6.75°
iv).- Altura de vuelo	450 m. s. n. m.

Además se hicieron las siguientes suposiciones:

i).- La susceptibilidad de las rocas sedimentareas es cero por lo que las anomalías del mapa de Intensidad Magnética Total son causadas por contrastes de magnetización en el basamento y rocas igneas extrusivas.

ii).- Los cuerpos modelados tanto basamentales como derrames igneos, tienen una magnetización inducida uniforme, con una misma dirección de magnetización.

iii).- Los valores de los contrastes de susceptibilidad magnética, fueron considerados de acuerdo a los valores medidos para el basamento en áreas donde éste aflora, así mismo se tomaron de tablas figura 21 y otros fueron inferidos y calculados de acuerdo a los resultados obtenidos en la Deconvolución Werner y el modelado magnético.

V.1. MODELO DE BASAMENTO I

Este modelo se encuentra ubicado al Norte del área de estudio donde el basamento es más somero y esta orientado en una dirección NE-SW con un rumbo de N 80° 00' E. Tiene una extensión de 94 kilometros como se observa en la figura 19.

En este modelo se contó con la información del pozo Paso de Ovejas-2 el cual tocó basamento a una profundidad de 6012 mts. Este pozo se encuentra ubicado aproximadamente sobre

el kilómetro 20 de la sección y a 1.5 kilómetros fuera de ésta de tal forma que los datos proporcionados por éste pozo son de gran utilidad para la interpretación de la sección.

La forma como se interpreto esta sección fué siguiendo el siguiente orden:

i).- Primero se aplicó la Deconvolución Werner al perfil de Intensidad Magnética Total y al de gradiente horizontal obtenido a partir del perfil de Intensidad Magnética Total. Para la aplicación del proceso Werner se eligió un tamaño de operador Werner de 30 kilómetros el cual se seleccionó en función del tamaño de la anomalía más predominante en el perfil.

ii).- La siguiente etapa correspondió al modelado magnético en 2 1/2 dimensión y para esto se consideraron como datos para la elaboración del modelo, las profundidades obtenidas de la Deconvolución Werner.

En la elaboración del modelo se consideraron dos diferentes susceptibilidades magnéticas (0.0062, 0.0037 ucs.) de las cuales la más alta corresponde a una zona cercana al Plan de las Hayas, donde existe un basamento granítico.

De los resultados obtenidos se puede observar que en la área donde se tiene el pozo Paso de Ovejas-2 se tienen profundidades calculadas con Deconvolución Werner de 6050 metros las cuales son muy aproximadas comparadas con la profundidad reportada por el pozo que es de 6012 metros; las profundidades calculadas con Deconvolución Werner fuerón determinadas con el operador de 36 y 42 kilómetros.

Las profundidades encontradas son pocas, y esto es debido a que a lo largo de todo el perfil solo se tiene una gran anomalía de tipo regional, con la cual se estan obteniendo

los resultados de la Deconvolución Werner.

Los resultados obtenidos con el modelado son muy buenos y el ajuste que se logra es bastante aceptable, en este modelo se procuro respetar las profundidades calculadas con la Deconvolución Werner.

V.2. MODELO DE BASAMENTO II

Este modelo se tiene ubicado al Sur del área de estudio y se encuentra orientado con una dirección NE-SW con un rumbo de N 5° 00' E. Tiene una extensión de 150 kilómetros, como se observa en la figura 20 .

En esta sección se tiene la información de 2 pozos los cuales estan ubicados cerca de la sección magnética; el Ixcatlan-1 ubicado en el kilómetro 45 sobre el perfil magnético a 3.5 kilómetros de la sección y el Heim en el kilómetro 47 a 1.8 kilómetros de la sección.

Para la interpretación de esta sección se siguió la misma metodología empleada para la anterior sección.

i).- Primero se consideró el proceso de Deconvolución Werner tanto para el perfil de Intensidad Magnética Total como para el gradiente vertical calculado a partir del perfil de Intensidad Magnética Total. Se seleccionaron 6 diferentes tamaños de operador (6, 12, 18, 24, 30 y 36 kilometros) los cuales estan en función del tamaño de las anomalías que se tienen en el perfil magnético y de la profundidad a la que se encuentran las fuentes magnéticas.

ii).- Para la segunda etapa se consideró el modelado magnético en 2 1/2 dimensión, teniéndose como datos de entrada las profundidades calculadas con la Deconvolución Werner, así como un modelo inicial propuesto a partir de

los datos anteriores y la geología del lugar. En este modelo se consideraron 4 diferentes susceptibilidades magnéticas (0.0019, 0.0027, 0.0041 y 0.004 ucgs.) de las cuales dos corresponden a dos cuerpos suprabasamentales, una a un cuerpo intrabasamental y la otra a la generalidad del basamento magnético.

De los resultados obtenidos con la Deconvolución Werner se observa que son de gran utilidad para la elaboración del modelo los cuales en forma aproximada nos sirven como puntos de control y nos dan la morfología del basamento.

En la segunda sección se tiene mayor resolución que en la anterior, y esto es debido a que se tiene mayor manifestación magnética a lo largo del perfil, así mismo se tienen mejor definidas las anomalías.

Los resultados obtenidos con el modelado son buenos y se puede observar que la anomalía calculada es bastante aproximada con respecto a la observada; en este modelo se procuró apegarse a las profundidades calculadas con la Deconvolución Werner.

MODELO DE BASAMENTO 1

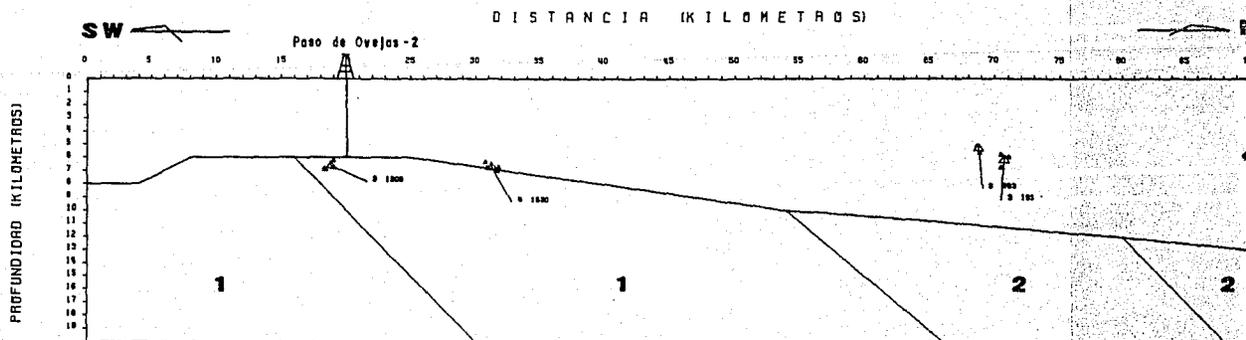
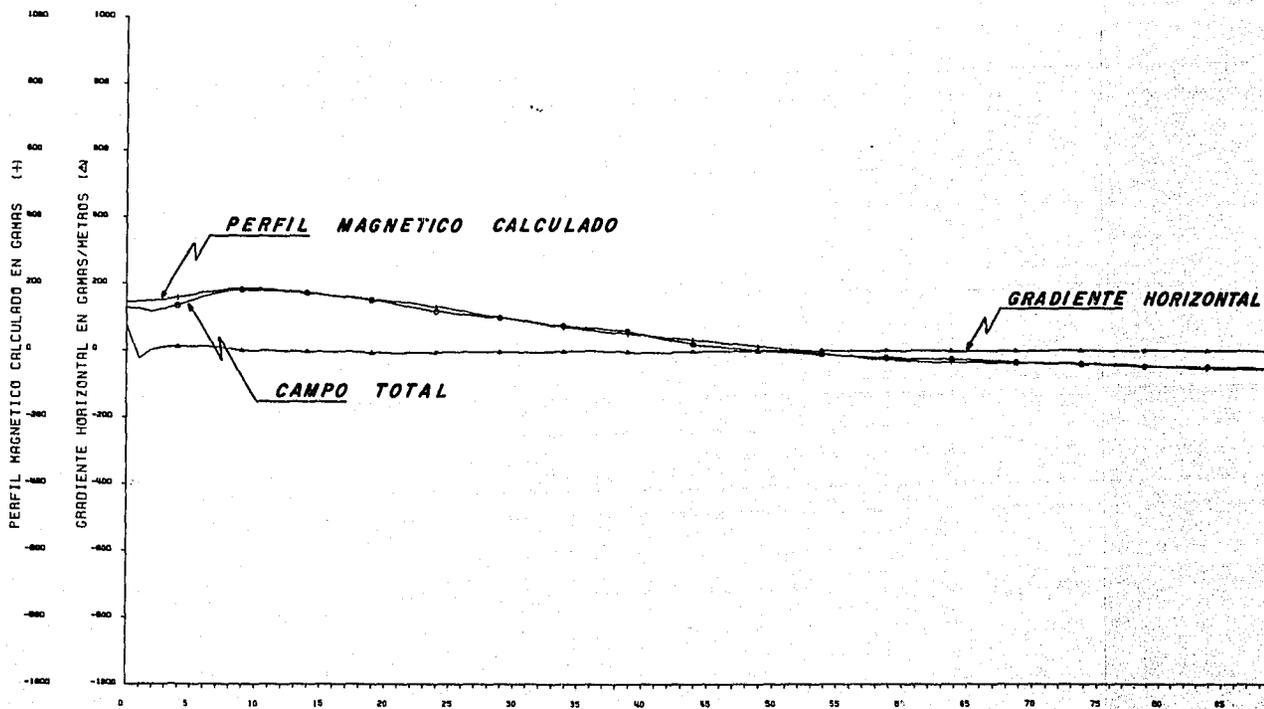
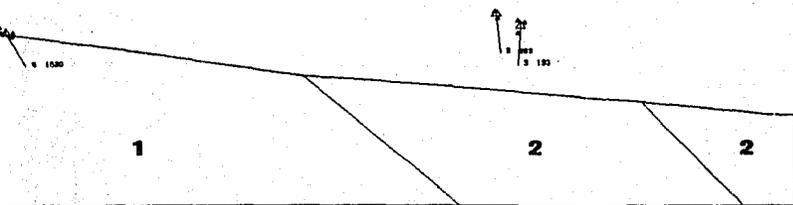
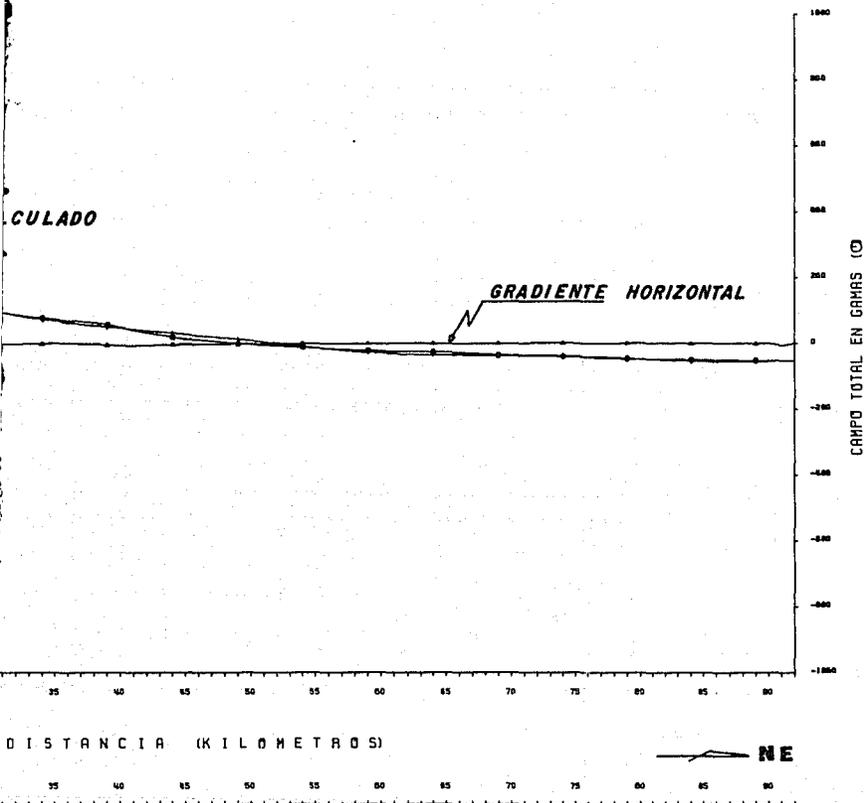


FIGURA 19

ELO DE BASAMENTO 1



DATOS

CUERPOS	SUBCEPTIBILIDAD U.C.B.S.
1	0.0062
2	0.0037

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
30 KILOMETROS

FIGURA 19

MODELO DE BASAMENTO 2

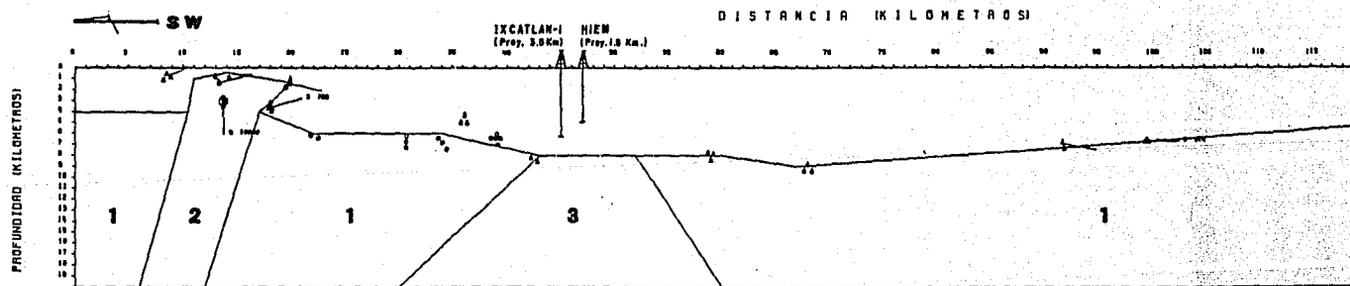
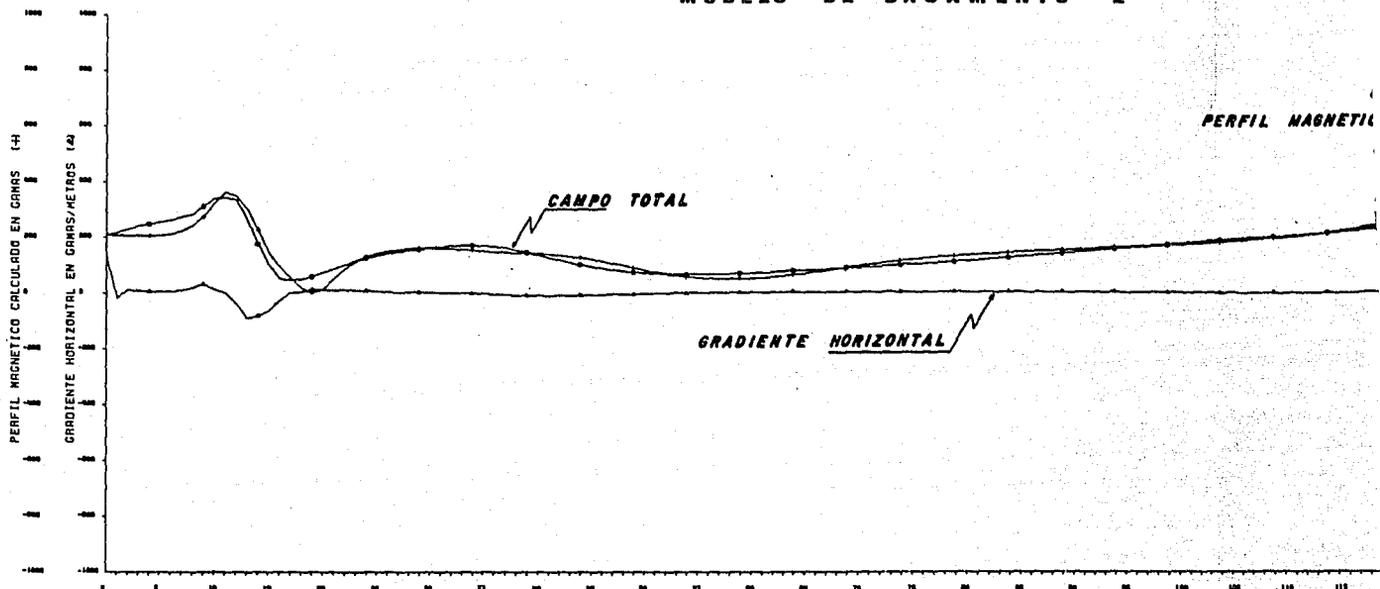
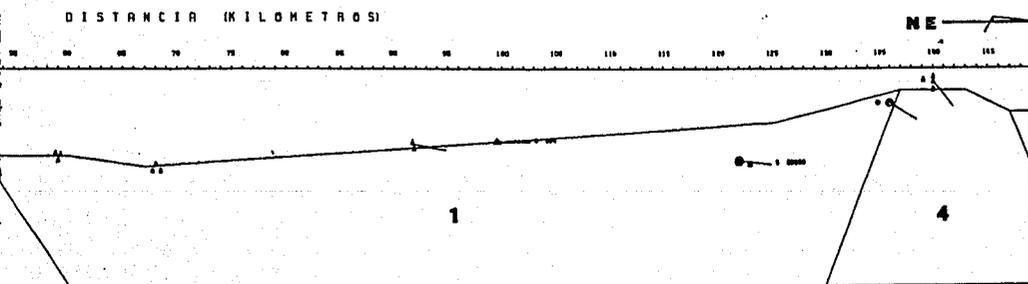
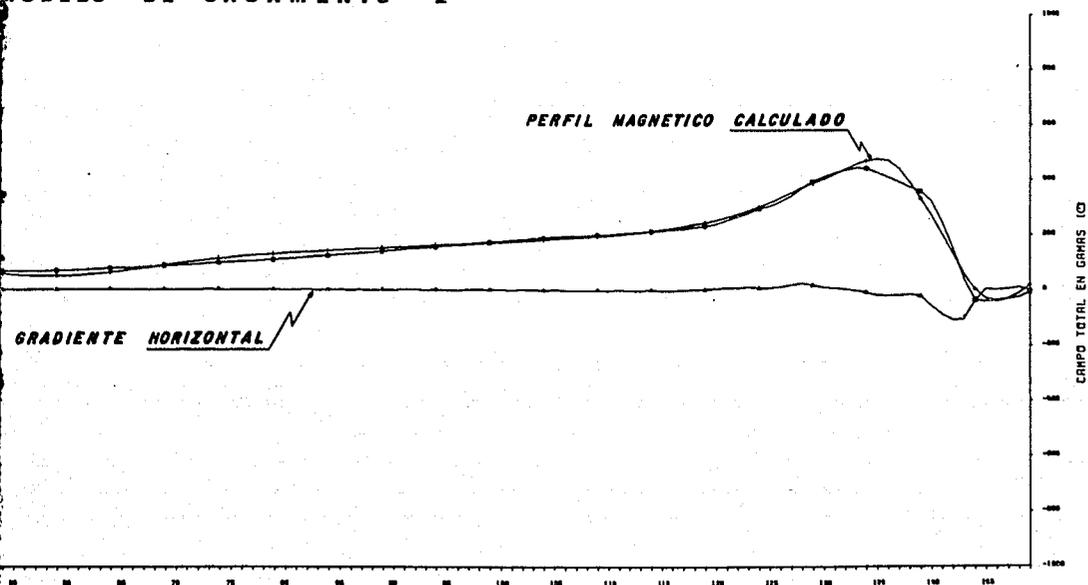


FIGURA 20

MODELO DE BASAMENTO 2



DATOS

CUERPOS	SUSCEPTIBILIDAD U.C.O.S.
1	0.0027
2	0.0019
3	0.0041
4	0.004

TAMAÑO DEL OPERADOR WERNER
6, 12, 18, 24, 30 y 36 KILOMETROS

FIGURA 20

SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA DE ROCAS

TIPO DE ROCA	Susceptibilidad X 10^{-6} c.g.s.
<hr/>	
Efusivas básicas	1000.....4000
Basicas plantonicas	100.....4000
Granitos y rocas afines	100.....1000
Esquistos, Gneiss, Pizarras	100.....1000
Sedimentareas	100.....1000
<hr/>	
ROCAS ESPECIFICAS	
<hr/>	
Basaltos	680.....6300
Diabasa	78.....4200
Gabro	440.....4100
Granito	30.....2700
<hr/>	
ROCAS METAMORFICAS	
<hr/>	
Serpentina	250.....14000
Pizarra	39.....3000
Gneiss	10.....2000
Esquistos	26.....740
Lutitas	40.....50
Arcilla	20
Arenisca	5.....17
Dolomita	9.....14
Caliza	4

FIGURA 21

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Como se ha podido ver, para obtener buenos resultados en el proceso de Deconvolución Werner es recomendable tomar en consideración los siguientes factores.

i).- En función de los objetivos que se persiguen para un área en especial ya sean del tipo petrolero o minero será necesario determinar cuales son las anomalías que se van a tratar ya sean de baja o de alta frecuencia.

La experiencia ganada en los modelos sintéticos es útil para sentir como funciona el método de Deconvolución Werner de tal forma que se obtuvieron buenos resultados para cuerpos y estructuras someras y conforme se fué profundizando la resolución se fué perdiendo. Se considera que se tienen buenos resultados hasta profundidades de 8 kilómetros, con esto se observa que con el proceso de Deconvolución Werner es posible tratar cuencas sedimentareas someras.

Aunque es importante mencionar que cuando se tiene una manifestación fuerte magnéticamente de un cuerpo profundo en el cual la susceptibilidad magnética es alta, la solución de la Deconvolución Werner es buena aún a profundidades grandes. Así mismo, se observó en ciertas anomalías que conforme se va profundizando, es necesario un operador Werner mas grande.

ii).- La ubicación óptima del perfil que se va a interpretar y esto va estar en función de la posición de las anomalías a interpretar y de la configuración del gradiente magnético con respecto al perfil. Es recomendable considerar el perfil lo más perpendicular

posible a la anomalía y tomar en cuenta la máxima respuesta de la anomalía, con lo que respecta al gradiente magnético es recomendable atravesarlo lo mas perpendicularmente posible.

iii).- En función de la experiencia ganada en la interpretación de perfiles en este trabajo mediante ésta técnica es recomendable considerar perfiles pequeños ya que es difícil abarcar en un perfil largo varias anomalías en una forma óptima tomando en consideración los consejos ya expuestos. De tal forma que en la interpretación de un área es recomendable tratar cada anomalía en forma individual con pequeños perfiles y los resultados de estos perfiles tratados con Deconvolución Werner considerarlos como puntos de control para un posterior modelado magnético ya sea por modelado directo ó por inversión magnética en forma iterativa.

iv).- No es recomendable darle mucho peso a las anomalías que se encuentran a los extremos del perfil magnético a menos que estas anomalías esten bien definidas tanto en su máximo como en su mínimo y los datos muestreados al final no sean extrapolados.

v).- Es recomendable probar con diferentes tamaños de operador Werner para una misma anomalía y así observar cual nos proporciona mejores resultados.

vi).- Es muy importante el conocimiento general de la Geología del lugar en cuanto al tipo de cuerpos y estructuras existentes, así como el tipo de basamento que se espera.

vii).- En un perfil magnético es recomendable tener separada lo más posible cada anomalía para evitar interferencias en los resultados que se obtengan, ya que estos resultados pueden estar influenciados por el efecto

de varios cuerpos asociados.

Finalmente se puede decir que la Deconvolución Werner es una herramienta bastante útil para la determinación de la profundidad de cuerpos y estructuras dentro del basamento magnético y la determinación es bastante rápida lo cual nos puede ayudar a efectuar evaluaciones rápidas y precisas sobre lugares de interés; asimismo nos sirve de apoyo para la interpretación de áreas mas extensas en donde integrandola con métodos mas sofisticados junto con otras disciplinas como Geología, Sismología, Gravimetría, Geoquímica e información de pozos se pueden obtener resultados muy buenos con lo que respecta a la prospección petrolera. Para trábajos mineros es muy útil para la determinación de la cima de cuerpos mineralizados que junto con la integración de otros métodos geofísicos y geológicos nos proporciona excelentes resultados.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Bhattacharyya B. K. 1965, Two dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation.
Geophysics V. 30 pp 829-857.
- 2.- Cady W. John and Ronald E. Swaeney: (1982) Program 2HDPOT for 2 1/2-dimensional gravity and magnetic modeling.
Open File Report 82 U. S. Geological Survey.
- 3.- Chao, C. Ku and John A. Sharp: (1983) Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modeling.
Geophysics, Vol 48, No. 6 pp. 754 774.
- 4.- Hartman, R. R.; Tesky, D. J.; and Friedberg, J. L. 1971, System for rapid digital aeromagnetic interpretation.
Geophysics, Vol. 36 pp. 891-918 .
- 5.- Jain, S.; 1976 An automatic method of direct interpretation of magnetic models.
Geophysics, Vol. 41 pp. 531.
- 6.- Talwani M. and Heristzler J. R.: 1964 Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional structures of arbitrary shape in computers in the mineral industries.
G. A. Parks, Ed. Stanford Univ. pp. 464-480.
- 7.- Werner, S. 1949 Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies.
Sveriges Geol. Undersok, Ser. C. Arsbok, 43 No. 6