

## **NOTICE CONCERNING COPYRIGHT RESTRICTIONS**

This document may contain copyrighted materials. These materials have been made available for use in research, teaching, and private study, but may not be used for any commercial purpose. Users may not otherwise copy, reproduce, retransmit, distribute, publish, commercially exploit or otherwise transfer any material.

The copyright law of the United States (Title 17, United States Code) governs the making of photocopies or other reproductions of copyrighted material.

Under certain conditions specified in the law, libraries and archives are authorized to furnish a photocopy or other reproduction. One of these specific conditions is that the photocopy or reproduction is not to be "used for any purpose other than private study, scholarship, or research." If a user makes a request for, or later uses, a photocopy or reproduction for purposes in excess of "fair use," that user may be liable for copyright infringement.

This institution reserves the right to refuse to accept a copying order if, in its judgment, fulfillment of the order would involve violation of copyright law.

## MODELADO GEOELECTRICO BIDIMENSIONAL EN EL CAMPO GEOTERMICO DE LOS AZUFRES, MICH.

Por:

Ing. S. Hugo Palma Guzmán\*  
Ing. J. Francisco Arellano G.\*  
Dr. J. Oscar Campos Enríquez\*  
\* CFE, Morelia, Mich. Mex.

### 1. INTRODUCCION

Dentro del convenio establecido por la Comisión Federal de Electricidad, CFE, y el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América, DOE, para el período de 1986-1989, referente al intercambio de la información sobre la exploración de los recursos geotérmicos de los campos de Los Azufres, Mich. y Cerro Prieto, B.C.; de entre los temas propuestos para el área de geofísica se planteó el efectuar "Modelado Tridimensional" (con corrección topográfica), a los datos geoelectrónicos recolectados por CFE, mediante la técnica del sondeo eléctrico vertical.

Específicamente se acordó aplicar dicho modelado al campo de Los Azufres, Mich. por sus características topográficas abruptas; dado que la CFE no contaba en sus sistemas de cómputo con el Software necesario para alcanzar el objetivo planteado, se programó como primera etapa desarrollar el "Modelado Bidimensional" (sin corrección topográfica) en tanto se implementaba el paquete de interpretación tridimensional.

Para el "Modelado Bidimensional" se utilizó el algoritmo RESIS 2D (Dey. A, 1976), implementado al sistema UNIVAC de la CFE, en tres secciones; la ubicación de ellas se proyectó sobre la zona de producción del campo (Zona Norte y Sur).

El objetivo final de este trabajo es lograr una sensibilización en la respuesta del "Modelado Bidimensional", así como tratar de discernir la respuesta geoelectrónica y su relación geológica en correspondencia con los aspectos hidrotermales del campo de Los Azufres.

Los modelos bidimensionales generados son relacionados con las características geológico-estructurales del campo y se formulan conclusiones respecto a su asociación con los parámetros hidrotermales.

### 2. ANTECEDENTES DE LAS CAMPAÑAS GEOELECTRICAS

Entre 1975 y 1985 se llevaron a cabo nueve campañas geoelectrónicas con el dispositivo

tetraelectrónico Schlumberger, levantándose 527 sondeos eléctricos verticales (SEV) cuya longitud entre electrodos emisores de corriente (AB) osciló de los 4000 a los 7000 m.

El reconocimiento geoelectrónico del campo se inició con una línea regional de 23 Km de longitud, de rumbo N-S, y espaciamiento entre sondeos eléctricos cada Km; la cual fue la base para las posteriores campañas, disminuyéndose cada vez la distancia entre los puntos de muestreo; hasta tener una densidad, en las zonas de mayor interés, de 250 m. La orientación del dispositivo electrónico también se fue modificando, dados los resultados obtenidos en las primeras campañas ya que en ellas se efectuaban sondeos ortogonales en un mismo sitio, hasta definir que la orientación E-W, paralela al sistema estructural dominante en el campo de Los Azufres, resultaba la más adecuada.

Las interpretaciones realizadas de la información geoelectrónica se basan en el análisis y correlaciones cualitativas de planos y secciones de iso-resistividades aparentes y en el modelado unidimensional de los sondeos eléctricos con los que se estructuran secciones electroestratigráficas y planos con los parámetros dimensionales de los electroestratos.

Durante 1986; se efectuó el trabajo de "Compilación de las campañas de Resistividad del campo geotérmico de Los Azufres, Mich." Con lo cual quedaron normalizados los registros de los sondeos eléctricos verticales; con los cuales se efectuó la construcción de las tres secciones sujetas al Modelado Bidimensional que se presentan en este reporte.

### 3. CONDICIONES DEL MODELADO BIDIMENSIONAL EN LOS AZUFRES, MICH.

Es necesario hacer aclaraciones sobre las limitantes encontradas al trabajar específicamente las tres secciones de este estudio:

1. El modelo no considera la topografía en la que se encuentra la línea de sondeos geoelectrónicos, la sección es referida a un plano horizontal.
2. Preferentemente la dirección del tendido tetraelectrónico de los sondeos eléctricos verticales que conforman las secciones es

concordante con la orientación de éstas. No obstante, la línea III casi en su totalidad tiene direcciones del dispositivo electródico del sondeo eléctrico perpendiculares a la orientación de la línea. Teniendo presente lo anterior, se tuvo cuidado en el ajuste de los sitios con este problema, para evitar fenómenos producidos por variaciones laterales perpendiculares a la sección.

3. Con excepción de los extremos de la malla donde se insertó el modelo, la distancia nodal en dirección X fue de 100 m y de 50 m en las primeras distancias para la dirección Y, múltiplos de éste para las subsecuentes.
4. El número de valores de resistividad para los cuerpos que forman la sección está restringido a 10.
5. Los resultados del modelo fueron obtenidos solamente para los sitios próximos a los sondeos de campo y no para cada intervalo nodal como está diseñado el algoritmo. El objetivo buscado fue construir la sección de isoresistividades aparentes del modelo con la mayor semejanza posible a la elaborada con los datos de campo para controlar el ajuste además de ahorrar tiempo de computadora.

En las figuras 1, 2 y 3 se muestran las secciones de resistividad aparente de las líneas I, II y III, respectivamente, elaboradas con los datos de campo. Las figuras 4, 5 y 6 contienen los modelos bidimensionales cuyas secciones de resistividades aparentes resultantes (Figuras 7, 8 y 9) se ajustaron mejor a los datos de campo.

#### 4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS SECCIONES GEOELECTRICAS

Como se comentó en párrafos anteriores, tres son las secciones a las que se les aplicó "Modelado Bidimensional"; la selección y ubicación de ellas se decidió teniendo como objetivos principales la presencia de aspectos geológico-estructurales, además de incluir en ellas las zonas de producción del campo (Plano 1).

La sección I-I' está ubicada en la Zona Sur del campo, teniendo una longitud de 4.2 Km y una orientación WNW-ESE. Se inicia en la localidad de Los Ajolotes al NW y concluye al SE cerca del talud del Cerro El Jilguero. Los sondeos eléctricos verticales que la conforman de NW a SE son: C-15, B-7, B-6, B-5, B-4, 602-A, 601, 602-B, 406, 407, 705, 704, 703, 702 y 803-A.

Como accidentes estructurales importantes que la intersectan, casi perpendicularmente, se tienen las fallas El Viejón y Agua Ceniza; además de algunas fracturas y/o fallas inferidas.

Es importante mencionar que por la dirección elegida para esta sección, I-I', las fallas Puenteceillas, Tejamaniles y Los Azufres también se intersectan diagonalmente, evidenciándose sus efectos en el comportamiento de la configuración de "Resistividades Aparentes" (Figura 1). Finalmente en esta sección los pozos aledaños son el AZ-37, AZ-17, AZ-36, AZ-39, AZ-38 y AZ-11, cuyas características se hicieron intervenir en la construcción del modelo.

En la Zona Norte del campo se localizó la sección II-II', con rumbo W-E y una longitud de 3.25 Km. Su extremo W se ubicó a 250 m al NW del pozo AZ-44 y se prolonga hacia el E, hasta el borde SE de La Laguna Verde. Los sondeos eléctricos verticales que la constituyen del oeste al este son: 207, 10001, 10002, 10003, 10004, 10005, 100013, 100015, 100014, 10006 y 10009.

En cuanto a estructuras geológicas, la sección II-II' intersecta a las fallas La Dorada y Laguna Verde; además de varias fracturas (Figura 2). Los pozos AZ-44, AZ-14, AZ-28, AZ-19, AZ-32, AZ-43 y AZ-13 se encuentran cercanos al trazo de esta sección, y aportaron información general para estructurar el modelo correspondiente.

Por último, la sección III-III' de rumbo NNE-SSW, fue seleccionada para efectuar un análisis conjunto de las zonas de interés del campo (Zona Norte y Zona Sur), así la sección inicia al norte del campo en las inmediaciones del Cerro Carrasco y la Fractura Los Coyotes, finaliza al oeste del Cerro Chinapo, en la porción sur del mismo.

En esta sección se intersectan las estructuras geológicas del sistema E-W, siendo ellas las que muestran mayor evidencia superficial y un alto control en cuanto a la presencia de las manifestaciones termales; así de norte a sur se presentan: la Fractura Los Coyotes y las Fallas Marítaro, La Cumbre, El Chino, Laguna Larga, San Alejo, Agua Fría, Puenteceillas, Tejamaniles y El Chinapo; y los pozos AZ-51, AZ-53, AZ-48, AZ-32, AZ-45, AZ-25, AZ-1, AZ-47, AZ-17, AZ-33 y AZ-6.

Los sondeos que se han hecho intervenir en la sección III-III' son: 357, 8002, 8001, 10013, 14003, 11, 11002, 11 bis, KOA, G-2, F-3, E-4, D-14, C-7, 510, 907, E-2, 601, 413, 803, 350 bis y 6-M cuya configuración de resistividades aparentes se muestra en la Figura 3.

#### 5. ANALISIS CUALITATIVO DEL MODELADO

Al observar las secciones de resistividad aparente, tanto de los datos de campo como las obtenidas con sus respectivos modelos propuestos, es notorio que localmente los

valores de las isocurvas no se asemejan entre sí. Este efecto se debe a que es necesario hacer ligeros ajustes dimensionales (incluyendo la restricción de la forma de la malla) y de resistividad en los modelos. Sin embargo, el parecido en la tendencia de las isocurvas y las anomalías que forman, permiten realizar un análisis cualitativo general del modelado para obtener conclusiones preliminares.

En primer término, es notoria la influencia que tienen los cuerpos superficiales (a profundidades menores de 100 m) ya sean conductores o resistivos, para controlar tanto la forma de las curvas como los valores de resistividad a mayor abertura semielectrónica. En los modelos propuestos, los cuerpos superficiales se asemejan a los obtenidos con modelos electrostratigráficos. Más aún, estadísticamente el 60% de los valores de resistividad están determinados por las condiciones superficiales, mientras que a profundidad, lateralmente existe menos contraste entre cuerpos adyacentes. Por correlación con la geología superficial, los cuerpos con valores altos se asocian con tobas o derrames volcánicos recientes (Cuaternarios) y los valores bajos con zonas de manantiales termales. El grado de influencia del fracturamiento y los minerales de alteración es determinante en la conductividad de la roca, independientemente de su composición primaria. De estos dos factores, la permeabilidad producida por fracturamiento será la que produzca la mayor conductividad en una zona.

Desde el punto de vista geotérmico, la importancia que adquiere la zona conductora profunda en Los Azufres, Mich., (valores  $\leq 85 \Omega\text{-m}$  a más de 100 m de profundidad) está correlacionada con las zonas de alteración hidrotermal o producción. Con los modelos, dicha zona ha quedado restringida a cuerpos cuyos tres rangos de resistividad permiten asociarlos con la información proporcionada por los pozos perforados.

Una zona extensa con valores entre 4 y  $10 \Omega\text{-m}$  que ocupa la parte central y superior de las secciones norte y sur (cercana a los extremos en la sección transversal) son asociadas con alta alteración hidrotermal (alteración de calcita y/o arcilla) y cuya cima es correlacionable con la obtenida en las interpretaciones unidimensionales. Le sigue una zona transicional, con valores entre 10 y  $55 \Omega\text{-m}$  que se correlaciona con regiones pobremente alteradas (con calcita) o paleohidrotermales. Por último, los cuerpos delgados a manera de diques que atraviesan aun las zonas más superficiales, con valores  $\leq 4 \Omega\text{-m}$  se asocian a la zona de influencia de fallas o productoras.

Para modelar estos "diques conductores" se adaptó su forma de tal manera que

respetara el echado aproximado que tienen las estructuras a las que se asocia. En el caso de no conocer el echado o de haber intersección de dos o más estructuras, se optó por colocarlas verticalmente.

Sobre la última zona conductora mencionada, es necesario indicar a detalle su comportamiento en las curvas de isoresistividades aparentes, dependiendo de su situación, para futuras correcciones (por ejemplo ver SECCION III, Figuras 6 y 9).

- a) Las estructuras singulares que se aproximan a la superficie y tienen sondeos cercanos a ella producen anomalías de baja resistividad de forma alargada (Falla Laguna Larga).
- b) Las estructuras singulares ocultas y con sondeos cercanos, tienden a disminuir sus isovalores y, por otro lado, hay cambio repentino en la elevación de las curvas a mayor abertura semielectrónica (Falla entre sondeos 11002 y 11 bis).
- c) Dos estructuras próximas entre sí producen una anomalía de valores bajos cerrada e intermedia (Fallas Agua Fría y prolongación de El Viejón).
- d) Una zona con más de dos estructuras próximas formarán un amplio mínimo con alargamiento cercano a la estructura intermedia (zona Tejamaniles-Puentecillas).

En general, en las secciones sur y transversal se ha suprimido el electroestrato resistivo más profundo o disminuido su valor; el aumento de las resistividades aparentes a "profundidad", tanto en la sección de datos de campo como en la modelada, puede deberse más a variaciones laterales resistivas que a la presencia de un cuerpo resistivo, abajo de los sondeos.

Por último, los cuerpos resistivos profundos ( $85$  a  $200 \Omega\text{-m}$ ) que incluyen, o cuyos extremos concuerdan con estructuras tabulares conductivas, posiblemente no productoras, pueden tener distintas zonas de alteración hidrotermal, pero que de ninguna forma constituyen el límite del yacimiento.

Tal sería el caso de la falla El Chinapo. Es muy probable que los cuerpos resistivos tubulares y con valores  $> 200 \Omega\text{-m}$  sean estructuras selladas.

A continuación se ofrece un mayor detalle sobre cada sección.

Sección I (Zona Sur). Al comparar la sección de isorresistividades aparentes de los datos de campo (Fig. 1) y la obtenida (Fig. 7) con el modelo bidimensional (Fig. 4), es notoria la semejanza tanto en la configuración de curvas como en sus valores; son pequeñas las discrepancias existentes a mayor abertura semielectrónica. Lo anterior permite concluir que el modelo propuesto es una solución que se adapta a los datos de campo.

Son dos las discrepancias sustanciales: la anomalía de alta resistividad entre B-6 y B-5 desplazada hacia la derecha, y el valor bajo de la anomalía "abajo" del sondeo S-47. Para el primero se recomienda recorrer hacia la izquierda los cuerpos profundos de valores  $\geq 85 \Omega\text{-m}$  hasta cerca del B-6; mientras que para el segundo, aumentar la resistividad del conductivo cuando menos  $5.5 \Omega\text{-m}$ .

Con las condiciones anteriores, y tomando en cuenta la zona de producción indicada por los pozos, la región de interés geotérmico estaría comprendido entre los sondeos B-6 y B-5 (prolongación de la falla El Vampiro ?) y los sondeos 407 y 705 (prolongación de la falla inferida que atraviesa Hoyo Grande).

Aunque aquí no se ha modelado las fallas en forma tabular, se puede considerar que éstas constituyen los límites de los cuerpos profundos. Por lo tanto, las estructuras más relevantes, además de las citadas, son las fallas El Viejón y Agua Ceniza y la fractura cerca al pozo Az-39; todas de dirección SW-NE.

No obstante que las dos secciones de isorresistividades aparentes de la zona norte (Fig. 2 y 8) son semejantes en la parte superior, a "profundidad" sufren modificaciones en cuanto a las dimensiones de la anomalía entre las curvas de 15 a  $20 \Omega\text{-m}$ . Para modificar lo anterior se recomienda lo siguiente:

- a) Los cuerpos conductores (Fig. 5) abajo de los sondeos 10002 y 10003 deben intercambiar valores.
- b) El cuerpo de resistividad  $85 \Omega\text{-m}$  abajo de los sondeos 10005 y 10015 debe bajar su valor hasta  $14 \Omega\text{-m}$ .

La comparación de los resultados (Fig. 9) obtenidos con el modelo propuesto de la sección III (Fig. 6) y los datos de campo (Fig. 3) son bastante aceptables en la configuración de las isocurvas; principalmente en la situación de los cuerpos tabulares conductivos. Sobre éstos hay que hacer notar que sus valores son más bajos que los de campo y que, por ejemplo, en la parte central aparecen las curvas como singulares y cerradas (sondeos D-14 y K-O-A).

Tal situación puede deberse a que las resistividades que se dieron a los cuerpos tabulares que originaron las anomalías cerradas son de valores muy bajos (sondeos C-7, K-O-A y entre 11 y 11002 en la figura 6); por lo que se recomienda aumentar a  $8 \Omega\text{-m}$ , para la zona central.

Por otro lado, el modelo indica una extensa zona central conductora ( $13 \Omega\text{-m}$ ) que lateralmente va aumentando sus valores (zona norte y zona sur), pero que contiene el mayor número de cuerpos tabulares (Fractura Los Coyotes, prolongación de la Falla Espinazo del Diablo, Fallas Marítaro y La Cumbre en la zona Norte; y Agua Fría?, Agua Ceniza, cruce de Agua Ceniza y Puenteillas, fractura NE-SW en S-803 y Falla El Chinapo).

En las tres secciones, en general, bajo las regiones de los pozos, existen cuerpos conductores que por correlación con la información petrográfica corresponden con la aureola de alteración hidrotermal, principalmente con la presencia de calcita.

## 6. CONCLUSIONES

- El Modelo Bidimensional permitirá iniciar los trabajos de modelado tridimensional donde se incluyen los efectos topográficos; por lo que este trabajo debe de considerarse como preliminar al objetivo planteado dentro del convenio CFE-DOE (1986-1989) en lo que a interpretación de datos de resistividad para el campo de Los Azufres, Mich. se refiere.

- En los modelos bidimensionales la presencia de cuerpos conductores o resistivos a profundidades menores de los 100 m, influyen notablemente en el comportamiento de los valores de resistividad aparente asociados a las mayores aberturas semielectrónicas del dispositivo de emisión de corriente (AB).

- En los modelos bidimensionales generados, los cuerpos superficiales con alta resistividad se asocian con las unidades geológicas, como tobas y derrames riolíticos, principalmente; en tanto que los paquetes conductores tienen relación con las zonas de alteración, manifestaciones superficiales y zonas con alto fracturamiento.

- Los paquetes conductores a profundidades mayores de 100 m y con resistividades menores o iguales a  $85 \Omega\text{-m}$ ; en general tienen relación con zonas de alteración y áreas de producción de fluidos hidrotermales, definidas mediante las perforaciones exploratorias y/o de desarrollo.

La presencia de las fallas y/o fracturas geológicas se ha modelado mediante cuerpos tabulares conductores cuyas resistividades se consideran menores o iguales a

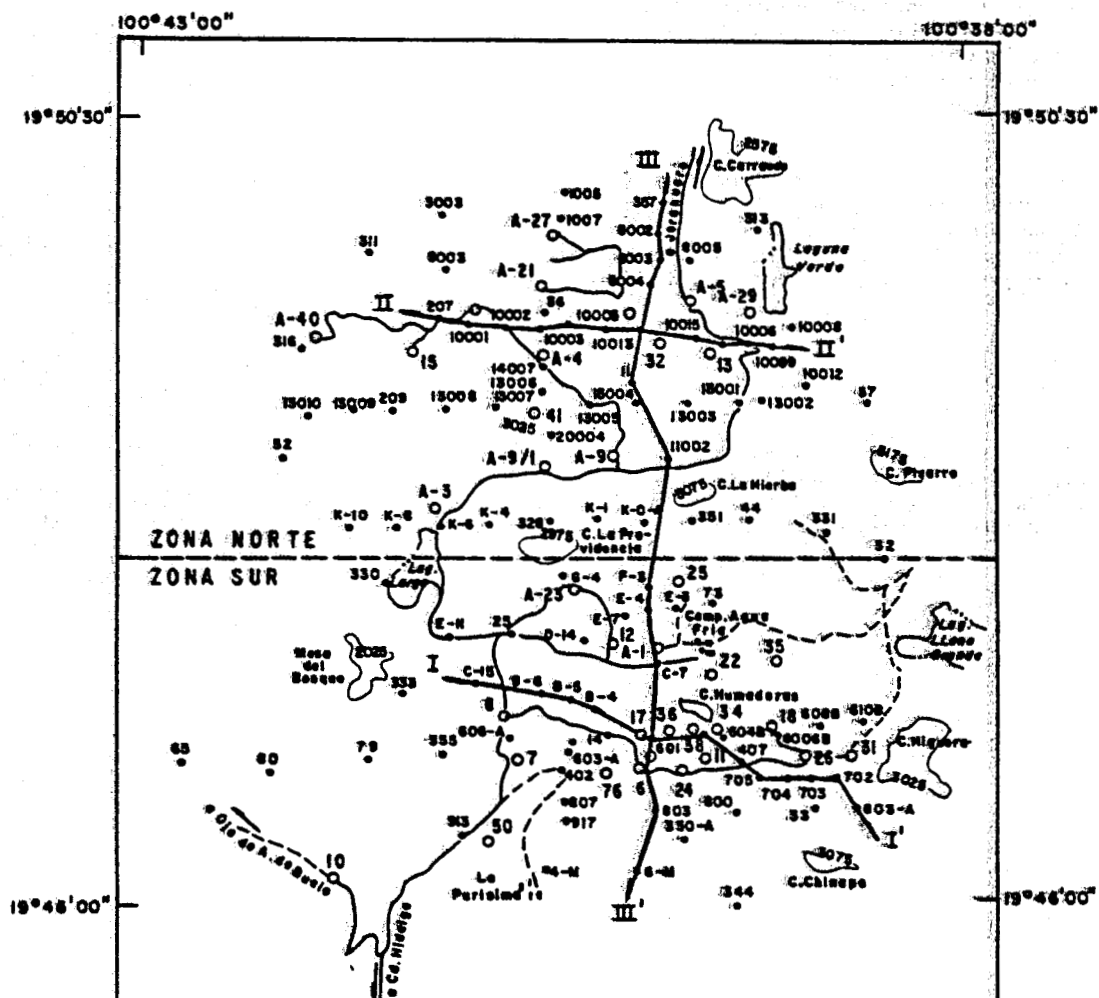
4 ohm-m; infiriéndose en ellas una alta permeabilidad, dado que son las estructuras (fallas y fracturas) las que controlan básicamente la presencia de las manifestaciones hidrotermales en superficie y el movimiento de los fluidos a profundidad.

Finalmente, se recomienda efectuar a cada una de las secciones las modificaciones expresadas en el apartado 5 (Análisis Cualitativo del Modelado), para con ello iniciar el modelado en el cual se incluyan los efectos topográficos del terreno.

#### REFERENCIAS

ABHIJIT, D., 1976. Resistivity Modeling for Arbitrarily Shaped Two Dimensional Structures, Part II: User's Guide to the FORTRAN Algorithm RESIS 2D. Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-5283.

PALMA G., S.H., Y BIGURRA P., E., 1986. Compilación de Las Campañas Geoeléctricas de Resistividad (1975-1982) del campo Geotérmico de Los Azufres, Mich. Informe 26/86. Edición Interna CFE.



ZONA NORTE  
ZONA SUR

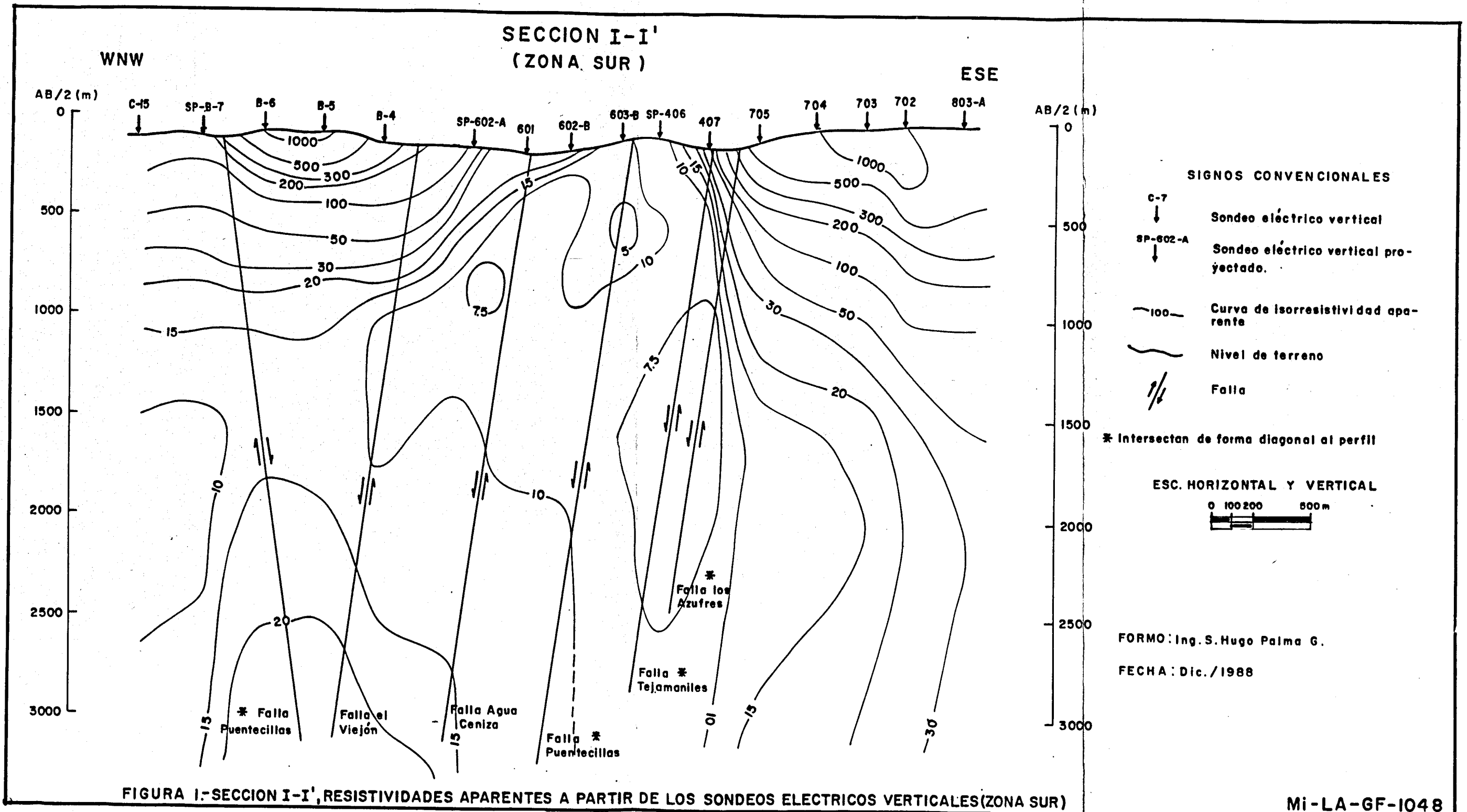
SIGNOS CONVENCIONALES

- CURVA DE NIVEL
- LIMITE DE LAGUNA
- CARRETERA PAVIMENTADA
- CAMINO DE TERRACERIA
- S.E.V.
- POZO
- SECCION

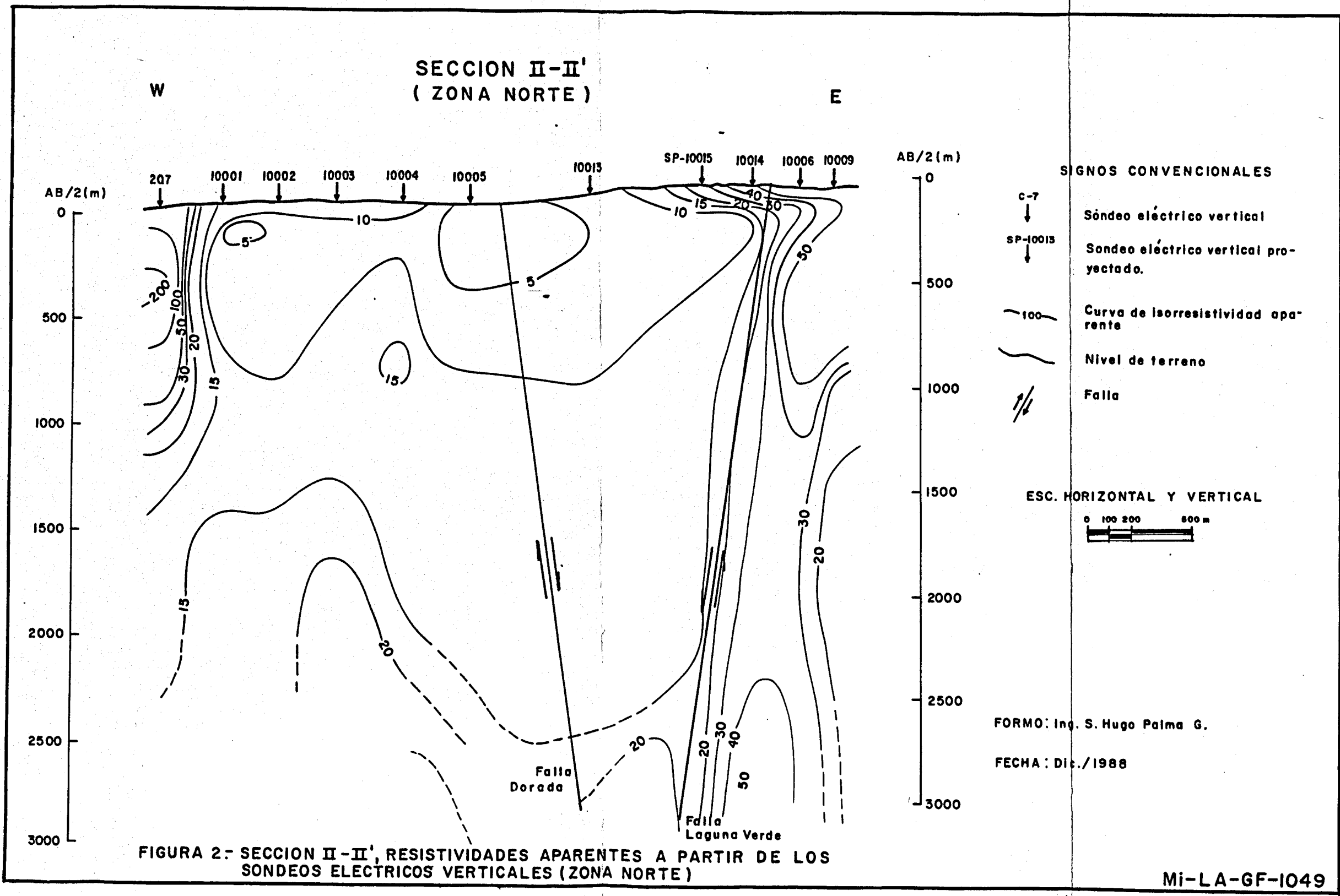
ESCALA 1:80,000

PLANO 1

LOCALIZACION DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES DEL CAMPO DE LOS AZUFRES, Y SECCIONES GEOELECTRICAS.







Mi-LA-GF-1049

SECCION III-III'  
( ZONAS NORTE Y SUR )

NNE

SSW

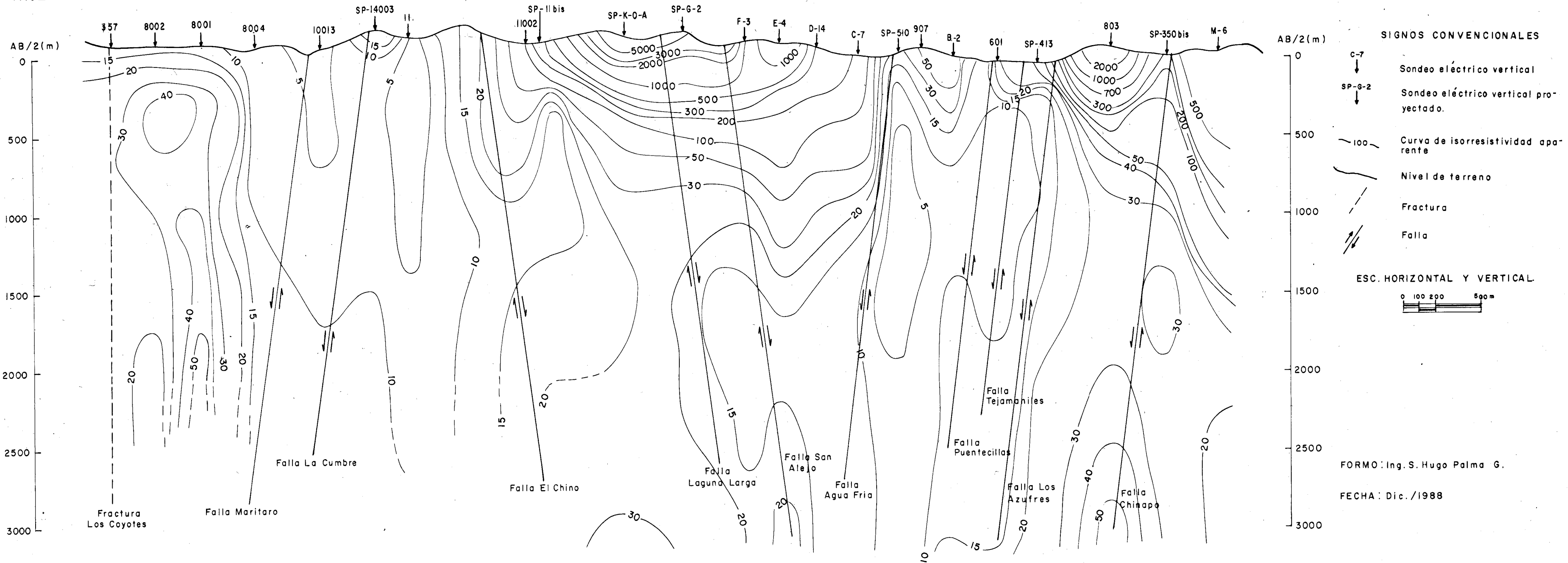
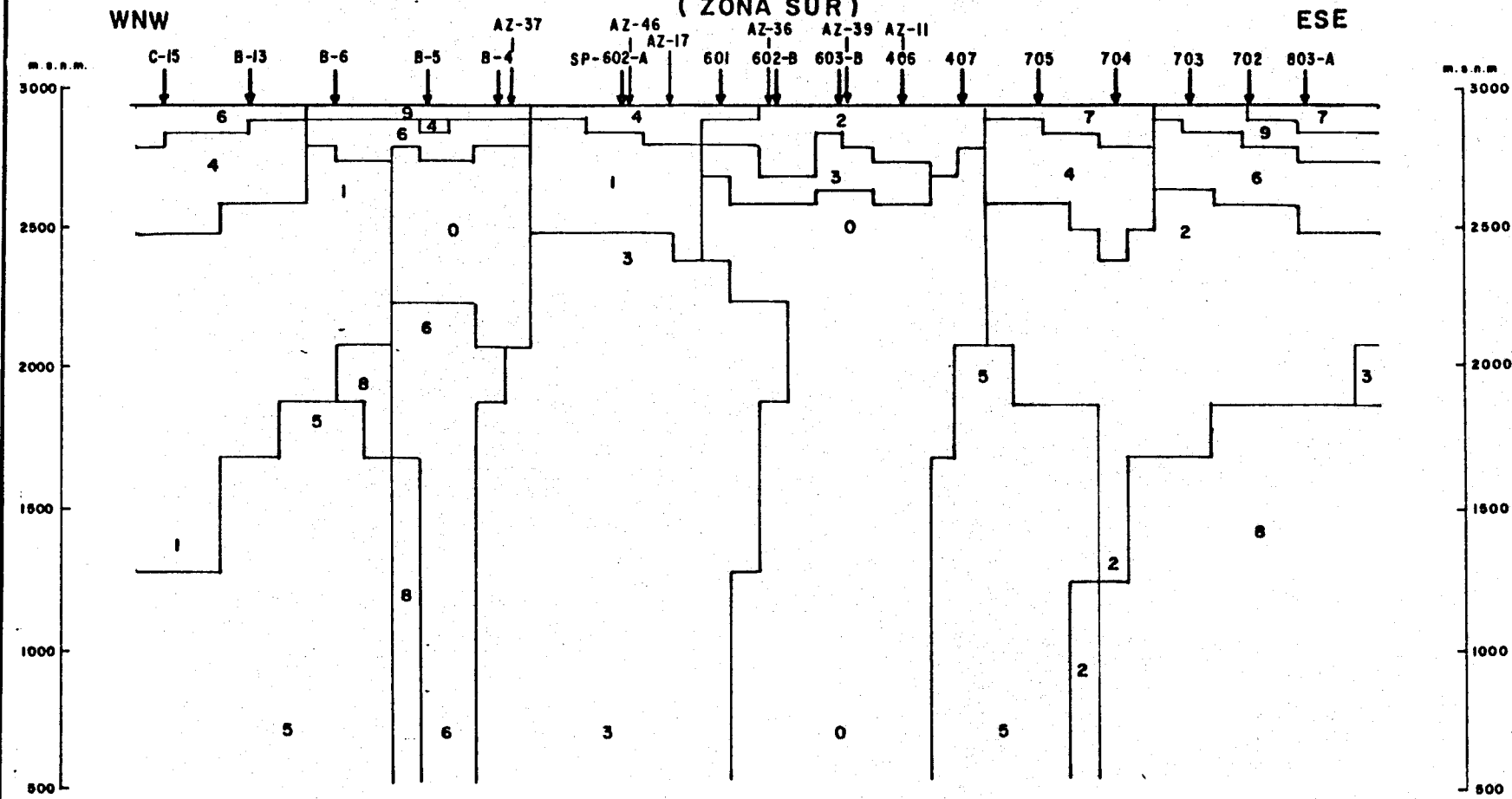


FIGURA 3.- SECCION III-III', RESISTIVIDADES APARENTES A PARTIR DE LOS SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES ( ZONAS NORTE Y SUR )

Mi-LA-GF-1050

### SECCION I ( ZONA SUR )



602-A  
↓  
Sondeo eléctrico vertical

ESC. HORIZONTAL  
0 100 200 500m

#### RESISTIVIDADES

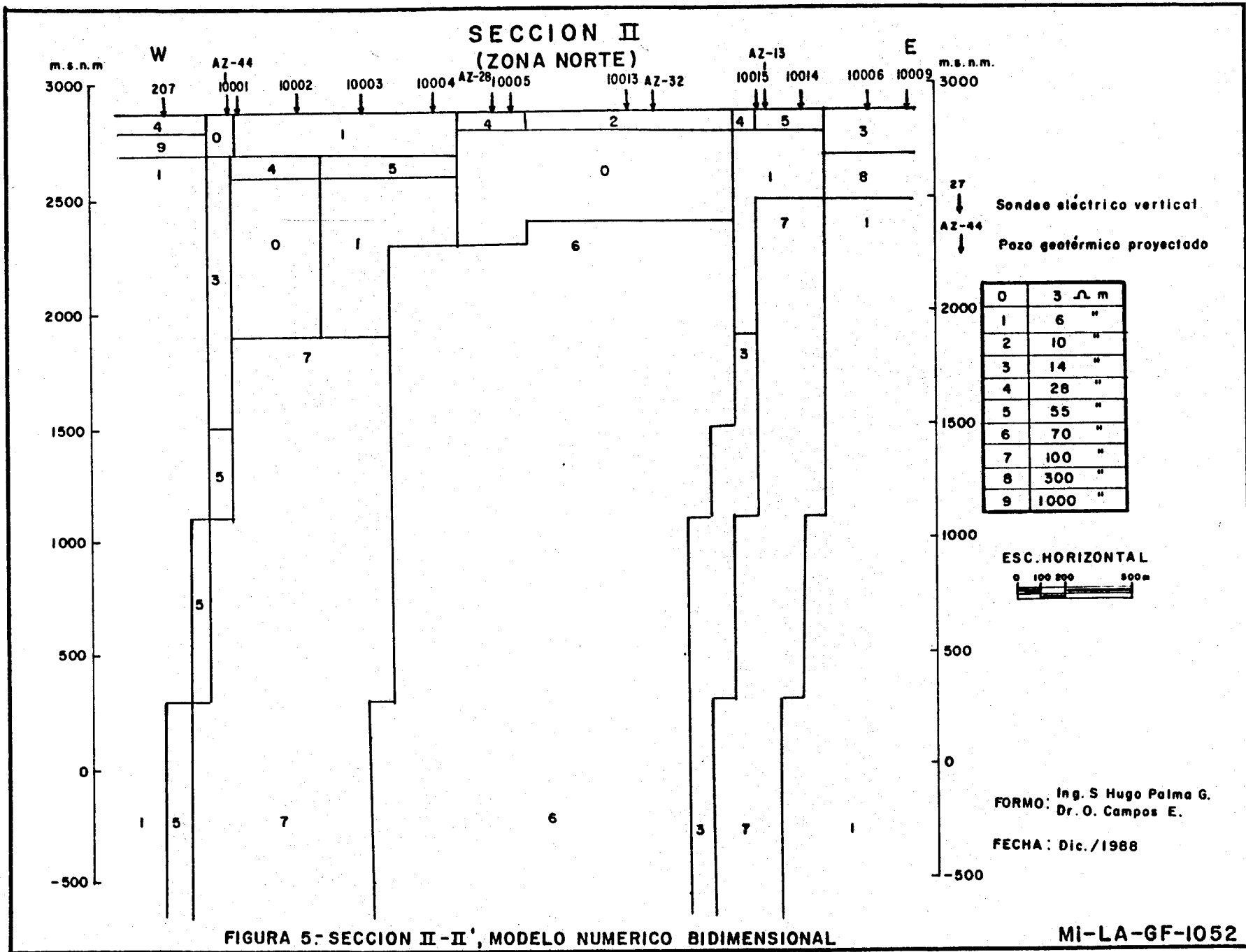
0	4 Ω m	6	200 Ω m
1	5.5 "	7	450. "
2	7.5 "	8	270. "
3	25. "	9	2000 "
4	55. "		
5	85 "		

FORMO: Ing. S. Hugo Palma G.  
Dr. O. Campos E.

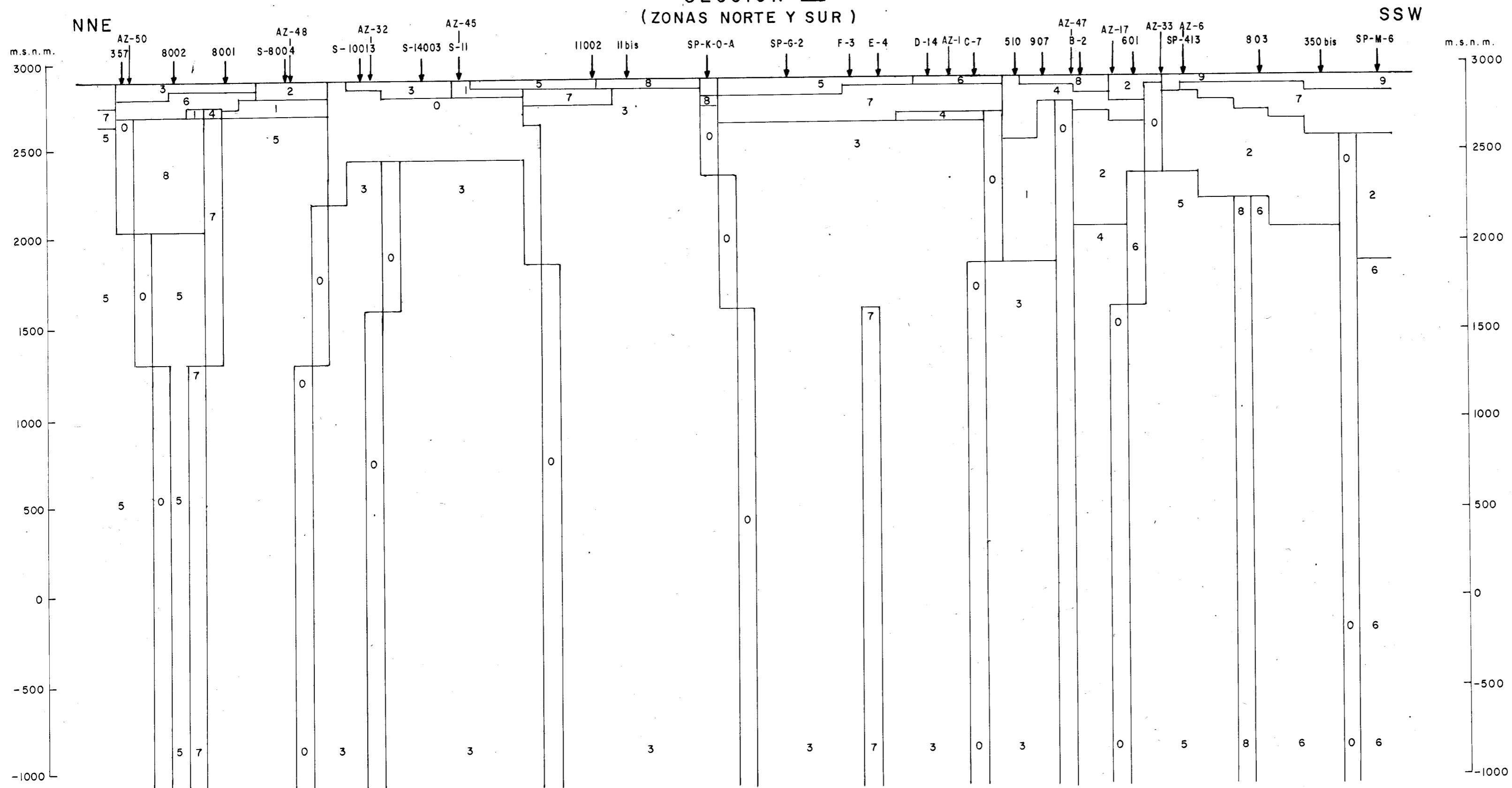
FECHA: Dic. /1988

FIGURA 4: SECCION I-I', MODELO NUMERICO BIDIMENSIONAL

Mi-LA-GF-1051



SECCION III  
(ZONAS NORTE Y SUR)



SIGNOS CONVENCIONALES  
601  
↓  
Sondeo eléctrico vertical

RESISTIVIDADES

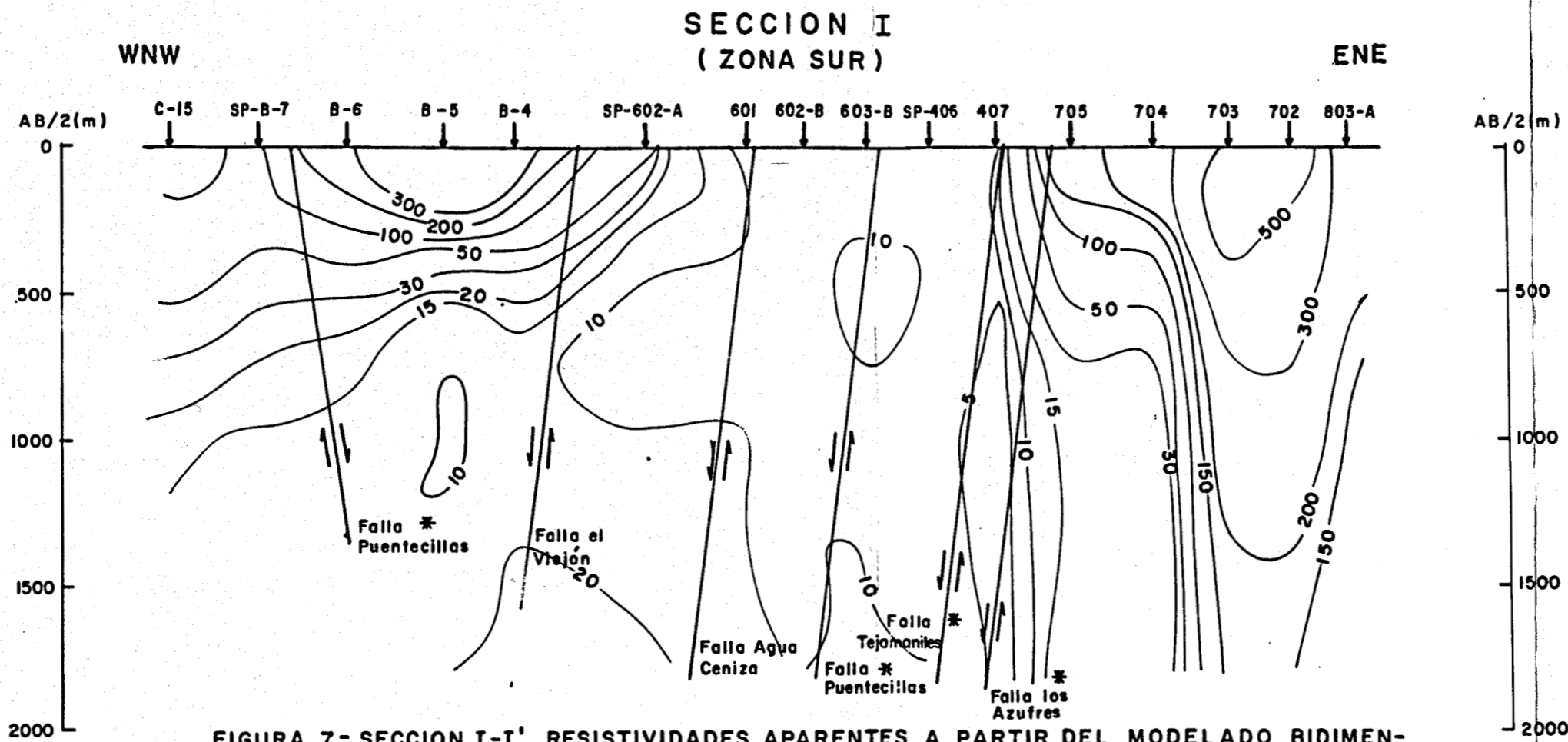
0	2.5 Ω m
1	4.8 "
2	8.0 "
3	13.0 "
4	24.0 "
5	55.0 "
6	85.0 "
7	220.0 "
8	370.0 "
9	3800.

ESC. HORIZONTAL  
0 100 200 500 m.

FORMO: Ing. S. Hugo Palma G.  
Dr. O. Campos E.

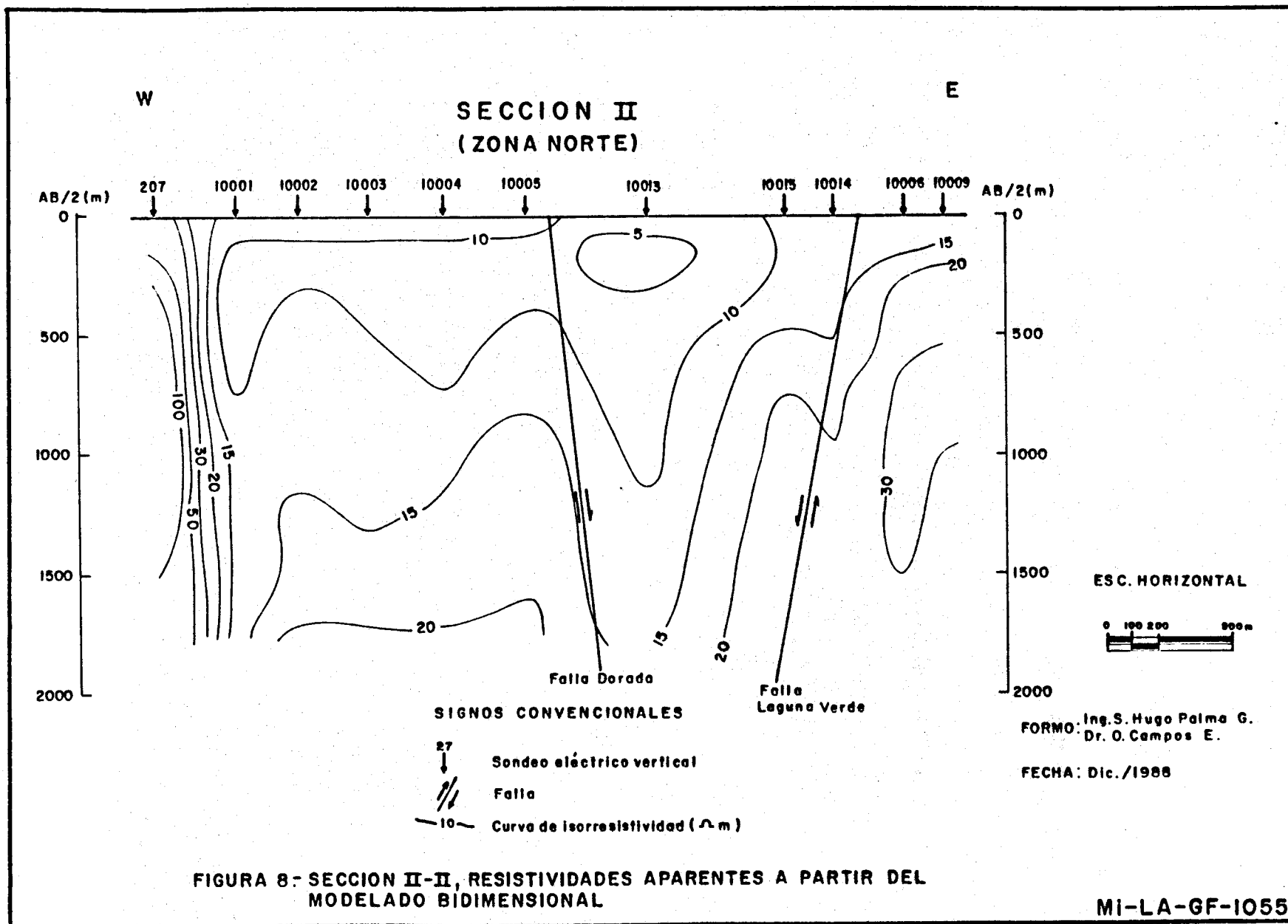
FECHA: Dic./1988

FIGURA 6: SECCION III-III', MODELO NUMERICO BIDIMENSIONAL



**FIGURA 7.- SECCION I-I', RESISTIVIDADES APARENTES A PARTIR DEL MODELADO BIDIMENSIONAL**

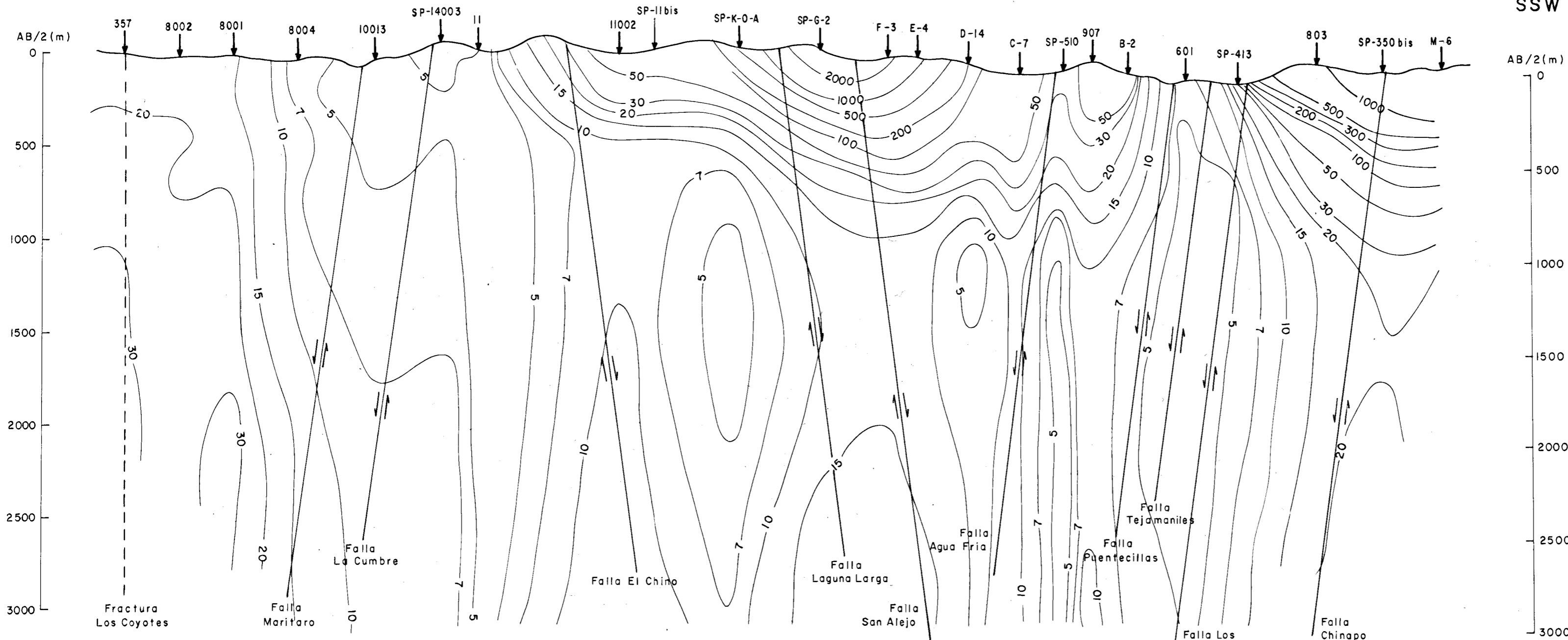
MI-LA-GF-1054



SECCION III  
( ZONA NORTE Y SUR )

NNE

SSW



SIGNOS CONVENCIONALES

- 907 ↓ Sondaje eléctrico vertical
- 100 — Curva de isorresistividad aparente
- - - Fractura
- /// Falla

ESC. HORIZONTAL

FIGURA 9: SECCION III - III', RESISTIVIDADES APARENTES A PARTIR DEL MODELADO BIDIMENSIONAL

FORMO: Ing. S. Hugo Palma G.  
Dr. O. Campos E.  
FECHA: Dic./1988