



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EXPLORACIÓN GEOHIDROLÓGICA Y UBICACIÓN DE UN
MANTO ACUÍFERO EN NAVOJOA, SONORA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

RICARDO FLORES VARGAS



DIRECTOR
DR. LUIS E. MARÍN STILLMAN

Ciudad Universitaria, México D. F. Abril 2008.

ÍNDICE	
RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	6
I.1 ECUACIONES GENERALES	
I.2. CONCEPTOS BÁSICOS	9
I.2.1 Resistencia eléctrica	9
I.2.2. Resistividad aparente	9
I.2.3. Dispositivos electródicos	10
I.2.4. Sondeo eléctrico vertical (SEV)	12
I.2.5. La relación entre la transformada de resistividad y la distribución de los estratos	13
I.3. ZONA DE ESTUDIO	15
I.3.2. Localización y extensión territorial	15
I.3.2. División municipal y población	16
I.3.3. Vías de comunicación	16
I.3.4. Energía	17
I.3.5. Clima	18
I.3.6. Vegetación	19
I.3.7. Hidrología	21
I.3.7.1. Aguas superficiales	21
I.3.7.2. Aguas subterráneas	22
I.3.8. Fisiografía	23
I.3.9. Marco geológico	24
I.3.10. Marco tectónico	25
I.4 INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA EN EL TRABAJO DE CAMPO	25
I.5 LOGISTICA DE CAMPO	26
I.5.1 Actividades realizadas	26
METODOLOGÍA	27
II.1. Procedimiento práctico para obtener la curva de resistividad aparente	27
RESULTADOS	30
DISCUSIÓN	41
IV.1. NIVEL FREÁTICO	41
IV.2. MODELOS GEOLOGICOS	43
IV.3. MAPAS DE ISORRESISTIVIDAD	46
IV.3.1. MAPAS DE ISORRESISTIVIDAD CORRESPONDIENTES A LA LOCALIDAD TIERRA BLANCA. SONDEO 12	46
IV.3.2. MAPAS DE ISORRESISTIVIDAD COREESPONDIENTES A LA LOCALIDAD TETAPECHE. SONDEO 14	49
IV.3.3. MAPAS DE ISORRESISTIVIDAD COREESPONDIENTES A LA LOCALIDAD JIJIRI. SONDEO 11	53
IV.4. PERFILES	58
CONCLUSIONES	77
BILIOGRAFIA	81
ÍNDICE DE FIGURAS.	
Figura 1. Aplicación de corriente eléctrica al terreno	6
Figura 2. Vector densidad de corriente en semiespacio homogéneo, con electrodo puntual en la superficie límite	8

Figura 3. Ejemplo de subsuelo heterogéneo	10
Figura 4. Tetraelectrónico para medir la resistividad del subsuelo	10
Figura 5. Dispositivo Schlumberger	11
Figura 6. Electrodo A y B se abren progresivamente mientras que M y N están fijos	12
Figura 7. Corriente continua desplazándose por medios de diferente resistividad	13
Figura 8. Ubicación y Mapa del Estado de Sonora	16
Figura 9. Localización de la zona de estudio. Imagen tomada de mapasmexico.net	17
Figura 10. Principales características climáticas del Estado de Sonora	19
Figura 11. <i>Thematic Mapper</i>	20
Figura 12. Mapa de los perfiles realizados	30
Figura 13. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Jijiri. Sondeo 11 (del SEV uno al SEV cuatro)	32
Figura 14. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Jijiri. Sondeo 11 (del SEV cinco al SEV ocho)	33
Figura 15. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Tetapeche. Sondeo 14 (del SEV uno al SEV cuatro)	35
Figura 16. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Tetapeche. Sondeo 14 (del SEV cinco al SEV ocho)	36
Figura 17. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Tierra Blanca. Sondeo 14 (del SEV uno al SEV cuatro)	38
Figura 18. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Tierra Blanca. Sondeo 12 (del SEV cinco al SEV ocho)	39
Figura 19. Mapas de isorresistividad con diferente abertura en AB/2	46
Figura 20. Mapas de isorresistividad con diferente abertura en AB/2	47
Figura 21. Mapas de isorresistividad con diferente abertura en AB/2	48
Figura 22. Ubicación de los SEV'S en la localidad Tetapeche	49
Figura 23. Mapas de isorresistividad con diferentes AB/2	49
Figura 24. Mapas de isorresistividad con diferentes AB/2	50
Figura 25. Mapas de isorresistividad con diferentes AB/2	51
Figura 26. Ubicación de los SEV'S en la localidad Jijiri	52
Figura 27. Mapas de isorresistividad con diferentes AB/2	52
Figura 28. Mapas de isorresistividad con diferentes AB/2.	53
Figura 29. Columna litológica correspondiente a la localidad de Los Cocos, Navojoa.	55
Figura 30. Columna litológica correspondiente a la localidad de Los Pollos, Huatabampo.	56
Figura 31. Perfil geoelectrico de la localidad de Jijiri.	57
Figura 32. Corte de zonas geoelectricas de la localidad de Jijiri.	58
Figura 33. Correlación de las resistividades y la litología de la localidad de Jijiri.	59
Figura 34. Corte litológico de la localidad de Jijiri.	60
Figura 35. Columna estratigráfica de la localidad de Jijiri	61
Figura 36. Perfil geoelectrico de la localidad de Tetapeche	62
Figura 37. Corte de zonas geoelectricas de la localidad de Tetapeche	63
Figura 38. Correlación de las resistividades y la litología de la localidad de Tetapeche.	64
Figura 39. Corte litológico de la localidad de Tetapeche	65
Figura 40. Columna estratigráfica de la localidad de Tetapeche	66
Figura 41. Perfil geoelectrico de la localidad de Tierra Blanca	67
Figura 42. Corte de zonas geoelectricas de la localidad de Tierra Blanca	68
Figura 43. Correlación de resistividades y litología de la localidad de Tierra Blanca	69
Figura 44. Corte litológico de la localidad de Tierra Blanca	70
Figura 45. Columna estratigráfica de la localidad de Tierra Blanca	71
Figura 46. Corte de zonas geoelectricas de las localidades de Jijiri, Tetapeche y Tierra Blanca (J, T y TB)	72
Figura 47. Correlación de las resistividades y la litología de J, T y TB	73
Figura 48. Corte litológico de las localidades J, T y TB	74
Figura 49. Columnas estratigráficas de las localidades de J, T y TB	75

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla I. Sonora: Capacidades y usos de las principales presas	22
Tabla II. Coeficientes de filtro inverso digital	29
Tabla III. Resultados de SEV'S obtenidos en campo correspondiente a la localidad Jijiri	31
Tabla IV. Resultados obtenidos en levantamiento en campo correspondiente a la localidad Tetapeche	34
Tabla V. Resultados obtenidos en levantamiento en campo correspondiente a la localidad Tierra Blanca.	37
Tabla VI. Profundidad del nivel freático localidad Jijiri	41
Tabla VII. Profundidad del nivel freático localidad Tetapeche	42
Tabla VIII. Profundidad del nivel freático localidad Tierra Blanca	42
Tabla IX. Resistividades y espesores correspondientes a los modelos geológicos de la localidad de Jijiri	43
Tabla X. Resistividades y espesores correspondientes a los modelos geológicos de la localidad de Tetapeche	44
Tabla XI. Resistividades y espesores correspondientes a los modelos geológicos de la localidad de Tierra Blanca	45

RESUMEN

Actualmente, el limitado acceso al agua ha hecho necesario recurrir a nuevos métodos que permitan ubicar el nivel somero de mantos acuíferos libres de contaminantes para su explotación. Por ello es necesario además, delimitar la extensión y capacidad volumétrica de éstos.

La prospección eléctrica es uno de los métodos que más éxito ha reportado en la búsqueda hidrogeológica ya que ha facilitado la localización de acuíferos, ríos subterráneos, cuevas, etcétera. La prospección eléctrica mide la diferencia de potencial del subsuelo por medio de una corriente inyectada por un generador, que permite identificar las diferentes resistividades aparentes en el medio. Haciendo el análisis de esta información es posible localizar mantos acuíferos u otros objetivos dependiendo de la naturaleza del estudio.

La manera en la que se comporta la electricidad en la naturaleza, no es la misma que la que estamos acostumbrados a ver en los aparatos eléctricos-electrónicos. En la naturaleza, que es donde se aplicara la prospección eléctrica, la electricidad se encuentra de manera libre y su movimiento es más complejo, ya que se mueve en tres dimensiones y en la dirección de menor resistencia al paso de los electrones. Además, en la naturaleza la electricidad no está confinada en conductores lineales y de material homogéneo, donde su flujo es constante, por ello, para poder entender su comportamiento hay que estudiar las leyes físicas a las cuales se encuentra sometida.

Se supondrá que el subsuelo se compone de varias capas, dentro de las cuales la resistividad es constante. Los límites entre éstas serán perfectamente planos y con un ángulo que no sobrepase los 30 grados. Se supondrá que el subsuelo está constituido por un espacio homogéneo. Habremos de idealizar el medio, para simplificar el problema matemático que implica la prospección eléctrica.

En este estudio se aplica el método del sondeo eléctrico vertical (SEV), que es una herramienta de la prospección eléctrica, el cual consiste en caracterizar la variación de la resistividad en forma vertical.

La siguiente tesis trata de la aplicación de la prospección eléctrica en Navojoa, Estado de Sonora. Se obtuvieron SEVs mediante prospección eléctrica en las localidades de Jijiri, Tetapeche, Tierra Blanca que se ubican al NE del municipio de Navojoa, Sonora. Esta tesis se estructura en cinco capítulos. En el primero se presentan las bases teóricas que sustentan este trabajo, es decir, abordaran los principios que guían la prospección eléctrica. En este sentido es importante señalar las aportaciones que han hecho

estudiosos como Laplace, Kernell, Stefanesco, Orellana y Ghosh, cuyos trabajos han contribuido enormemente en la teoría eléctrica y por ende en la prospección. Adicionalmente, se presentan los conceptos básicos que fundamentan la prospección eléctrica. Así mismo, se hace una descripción del área de estudio, en la que se presentan, entre otros aspectos, las características meteorológicas, geológicas, climática, e hidrológicas del Estado de Sonora.

En el segundo capítulo se presenta la metodología utilizada para procesar los datos obtenidos. Se recurrió al uso de estructuras ya determinadas en los softwares Resixp y Surfer, ya que presentan considerables ventajas, como ahorro en el tiempo de análisis, la exactitud que se obtiene mediante su uso. Los resultados obtenidos en el campo así como sus modelos geológicos y curvas de resistividad se presentan en el tercer capítulo. En el capítulo cuatro se lleva a cabo la discusión de lo encontrado mediante el procesamiento de los datos antes obtenidos. Por último, en el quinto capítulo se presentan las conclusiones.

Considero que ubicar el manto acuífero en esta región puede reportar beneficios para la comunidad, ya que al identificar los niveles piezométricos y del nivel freático estático y dinámico del manto acuífero se hace posible su estudio y su aprovechamiento.

INTRODUCCIÓN

I.1. ECUACIONES GENERALES

Pensemos en el subsuelo como un semiespacio de resistividad ρ , a la par que la atmósfera representará el otro semiespacio con una resistividad infinita. El campo eléctrico se establecerá por medio de un generador de corriente, el cual se conectará a través de cables a dos electrodos **A** y **B**, representados por dos barrenas clavadas en el subsuelo. Dada la escala las barrenas pueden considerarse dos puntos. La corriente de I_A penetrará por el electrodo **A** al subsuelo, y después de recorrerlo saldrá por **B** con intensidad de corriente I_B volviendo al generador para cerrar el circuito:

$$I_A + I_B = 0$$

Si el régimen es estacionario.

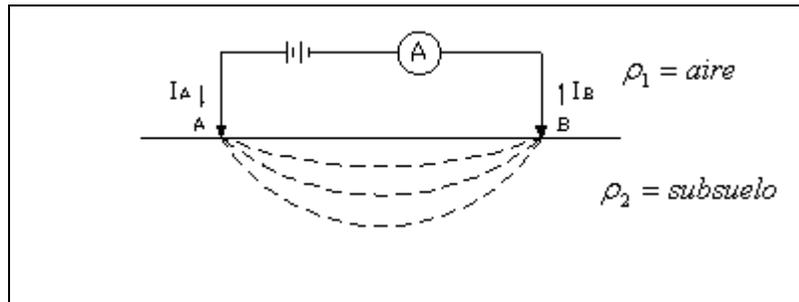


Figura 1. Aplicación de corriente eléctrica al terreno (Orellana, 1972).

Para establecer las leyes del fenómeno considerado, partiremos de las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad \dots(1)$$

$$\nabla \times H = J - \partial D / \partial t$$

Donde, por tratarse de un campo estacionario, habrá que anularse las derivadas temporales, y tendremos:

$$\nabla \times E = 0 \quad \dots (2)$$

$$\nabla \times H = J \quad \dots (3)$$

La ecuación (2) expresa que el campo eléctrico **E** es conservativo o irrotacional, por lo que deriva de un potencial escalar **U**. Es decir que:

$$E = -\nabla U \quad \dots (4)$$

Donde incluye el signo menos según la convención comúnmente aceptada.

Por otra parte abra de cumplirse la Ley de Ohm, en su forma diferencial para medios isótropos:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad \dots (5)$$

La cual nos dice que la densidad de corriente \mathbf{J} en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo \mathbf{E} en el mismo punto, y es proporcional a él. Por lo tanto, combinándolo con la Ley de Ohm, tenemos:

$$\mathbf{J} = \sigma \nabla U \quad \dots(6)$$

La ecuación para el potencial, aplicando el principio de conservación de la carga:

$$\int \mathbf{J} \cdot n dS = 0$$

De acuerdo con el teorema de Gauss:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \dots(7)$$

Sustituyendo el valor de \mathbf{J} :

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla U) = 0$$

$$\nabla \sigma \cdot \nabla U + \sigma \nabla^2 U = 0$$

Como σ es constante, tenemos que

$$\nabla^2 U = 0 \quad \dots(8)$$

Y el potencial en este caso es una función armónica.

Esta expresión es la ecuación de Laplace, la cual será válida en todo el semiespacio, pero no en los electrodos ni en las superficies de discontinuidad de la resistividad.

La continuidad es uniforme a nivel del suelo, entonces la ecuación de Laplace es continua en todas partes, $\nabla^2 U = 0$ por razón de simetría, la densidad de corriente \mathbf{J} tendrá el mismo valor, y estará dirigida radialmente. La integral de \mathbf{J} , considerando un radio r , sobre la superficie semiesférica será igual:

$$2\pi r^2 J = I \quad \dots(9)$$

Y por lo tanto:

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2} \quad \dots(10)$$

De donde:

$$|\mathbf{E}| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad \dots (11)$$

EXPLORACIÓN GEOHIDROLÓGICA Y UBICACIÓN DE UN MANTO ACUÍFERO EN NAVOJOA, SONORA.

Es decir que el campo \mathbf{E} de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r .

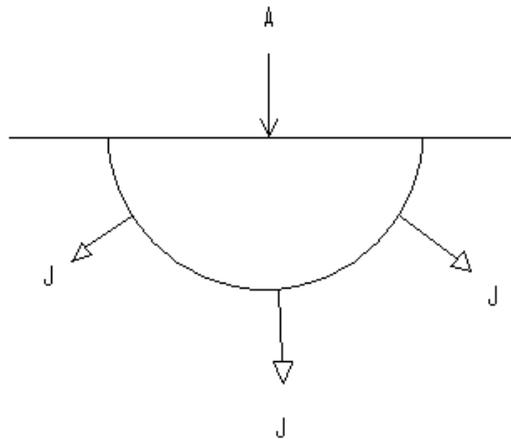


Figura 2. Vector densidad de corriente en semiespacio homogéneo, con electrodo puntual en la superficie límite (Orellana, 1972).

La diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera \mathbf{M} y \mathbf{N} vendrá dada según se deduce de la ecuación (4), por:

$$U_N^M = - \int_N^M \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad \dots(12)$$

Donde el camino de integración es indiferente, pues el campo es conservativo. Entonces, si son r_1 y r_2 las distancias respectivas de los puntos \mathbf{M} y \mathbf{N} al electrodo \mathbf{A} tendremos:

$$U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad \dots (13)$$

Considerando potenciales absolutos, se debe determinar el potencial cero.

La teoría considera tomar como origen de potencial un punto situado a distancia infinita de la fuente, se puede encontrar el potencial absoluto en el punto \mathbf{M} calculando el límite de U_N^M ecuación. (13) para un r_2 que tiende a infinito y un r_1 que es la distancia a la fuente

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r_1} \quad \dots (14)$$

Como el potencial es magnitud aditiva, habrá que sumar algebraicamente los potenciales respectivos si es que existen, por lo cual la expresión queda de la siguiente manera:

$$U = \frac{\rho}{2\pi} \sum \frac{I_i}{r_i} \quad \dots(15)$$

I.2. CONCEPTOS BÁSICOS

I.2.1. Resistencia eléctrica

Este término se refiere a la resistencia que oponen los materiales al flujo del paso de los electrones, está estrechamente ligada a la constitución electrónica de los enlaces de la materia. La resistividad eléctrica φ , es la resistencia que presenta el material al flujo de los electrones en función de la geometría del medio, en este caso de la longitud.

I.2.2. Resistividad aparente

Se definirá ahora la resistividad aparente, un concepto de vital importancia en la prospección eléctrica. Coloquemos un sistema electrodico **AMNB** en la superficie de un subsuelo homogéneo y de resistividad φ .

Se induce una intensidad de corriente **I** por el electrodo **A**, que crea un campo eléctrico, la diferencia de potencial se mide entre los electrodos **M** y **N**, que se encuentran conectados a un voltímetro, la corriente sigue su curso hasta salir por el electrodo **B** que se supone lo suficientemente alejado como para no interferir en las observaciones, y se cierra el circuito. Entonces si, **AM=r** y **MN=a**, según la ecuación (15)

$$\Delta V = U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r+a} \right] = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{a}{r(r+a)} \quad \dots (16)$$

Despejando la φ :

$$\rho = 2\pi \frac{r(r+a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad \dots (17)$$

Si se conocen las magnitudes que aparecen en el segundo miembro, se puede calcular fácilmente la resistividad.

En caso de que el subsuelo no sea homogéneo, la resistividad φ_a dependerá de las resistividades φ_i existentes y éstas, a su vez, del número de capas que se encuentren en él (ver figura. 3). Por lo tanto, las mediciones tomadas y los datos obtenidos en la ecuación (17) nos arrojarán una resistividad ficticia, que dependerá de las distancias **r** y **a**, así como de las resistividades, las cuales no pueden considerarse como promedio ni como media ponderada de las resistividades presentes. La resistividad ficticia φ_a , que se

obtiene aplicando la fórmula de resistividad de un medio homogéneo para un medio heterogéneo es la resistividad aparente ρ_a , que es una variable experimental y es la base para la interpretación, tomando siempre en cuenta la geometría del arreglo.

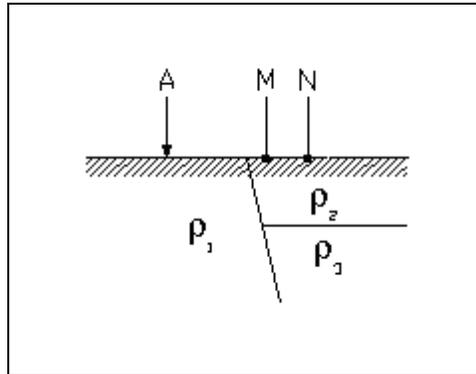


Figura 3. Ejemplo de subsuelo heterogéneo (Orellana, 1972)

I.2.3. Dispositivos electródicos

Un dispositivo electródico consta, en general, de cuatro electrodos: **A**, **B**, **M**, **N**. Los electrodos **A** y **B** son aquéllos por donde entra y sale la corriente. Los otros dos, **M** y **N**, son los electrodos que miden la diferencia de potencial creada por **A** y **B**. Estos últimos han de ir unidos por medio de cables a un generador eléctrico provisto de un amperímetro. Los electrodos **M** y **N** van unidos a un instrumento capaz de medir el potencial entre ellos. De este modo se tienen dos circuitos independientes: El primero, conocido como *circuito de corriente* y el segundo llamado *circuito de potencial*.

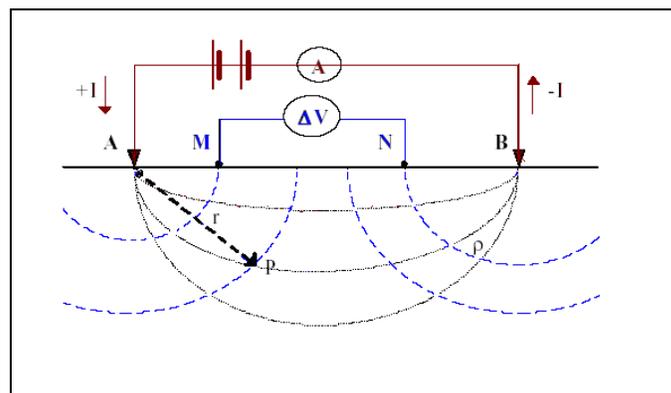


Figura 4. Dispositivo tetraelectródico para medir la resistividad del subsuelo (Orellana, 1972).

En cualquier dispositivo, si conocemos las distancias mutuas entre los electrodos y medimos la intensidad I que pasa por los electrodos **A** y **B** y la diferencia de potencial

ΔV que aparece entre **M** y **N**, podremos calcular la resistividad aparente ρ_a mediante la fórmula:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \dots (18)$$

Donde **K** es un coeficiente que depende únicamente de la geometría del dispositivo electródico con dimensiones en longitud. En el caso de que el medio fuera homogéneo la ecuación (16) expresaría la resistividad verdadera. En el caso más general, en que los cuatro electrodos están dispuestos de modo cualquiera sobre una superficie plana, la resistividad verdadera se tendrá según la ecuación (15):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad \dots(19)$$

Donde **AM**, **AN**, **BM**, **BN**, son la distancia de los electrodos. Entonces:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad \dots(20)$$

En el estudio realizado se utilizó el dispositivo tipo Schlumberger, una composición simétrica de los electrodos **AMNB** dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos **M** y **N** es más pequeña que la de los electrodos en los extremos **A** y **B**.

En la práctica $AB \gg 5 MN$

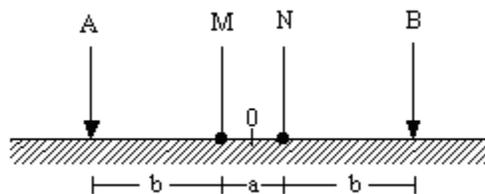


Figura 5. Dispositivo Schlumberger (Orellana, 1972).

El coeficiente del dispositivo en este caso es

$$K = \pi \frac{b^2 + a^2}{a} \quad \dots (21)$$

Si definimos $L = b + a/2$, el factor geométrico se puede expresar como:

$$K = \pi \left(\frac{L^2}{a} - \frac{a}{4} \right) \quad \dots(22)$$

Si la distancia que se separan los electrodos M y N tienden a cero el factor geométrico queda:

$$K = \pi \frac{L^2}{a} \quad \dots(23)$$

Que tiende a infinito. Sin embargo, la resistividad aparente es finita, ya que ΔV en la ecuación (16) decrece al mismo tiempo que **a**. Tendremos pues:

$$\rho_a = \lim \pi \lim_{a \rightarrow 0} \pi \frac{L^2}{a} \frac{\Delta V}{I} = \pi \frac{L^2}{I} \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{a} = \pi \frac{L^2}{I} E \quad \dots (24)$$

Donde **E** es el campo eléctrico.

La idea del dispositivo Schlumberger consiste, pues, en utilizar una distancia **MN = a** muy corta, de tal forma que pueda tomarse como válida la ecuación anterior. Los desarrollos teóricos se establecen suponiendo que lo que medimos realmente es el campo **E** el cual, en la práctica, se toma igual a $\Delta V/a$. Trabajar con el campo eléctrico reporta ventajas teóricas a la hora de manejar expresiones analíticas.

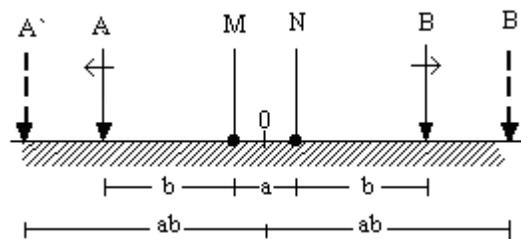


Figura 6. Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras que M y N están fijos.

I.2.4. Sondeo Eléctrico Vertical

El objetivo del sondeo eléctrico vertical (SEV) es determinar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes en el punto cero del dispositivo, a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se utiliza sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales en suelos estratificados. La experiencia demuestra que los resultados teóricos obtenidos para medios de esta clase, son totalmente válidos para estratos inclinados hasta 30°. (Ver Figura. 7).

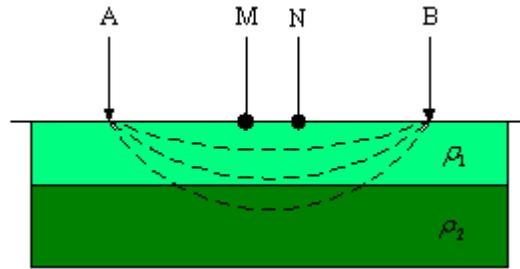


Figura 7. Corriente continúa desplazándose por medios de diferente resistividad (Orellana, 1972).

La penetración de la corriente aumenta con la separación de los electrodos de corriente **AB**. Si la separación **AB** se amplía la penetración de la corriente es mayor, pero su densidad disminuye; podría pensarse, equivocadamente, que la separación **AB** es proporcional a la profundidad. La penetración dependerá de la distribución de resistividades en el subsuelo.

II.2.5. La relación entre la transformada de resistividad y la distribución de los estratos

La transformada de resistividad es una función que depende sólo de los parámetros de los estratos. En una sección de dos estratos, el estrato **A** se ubicará en la superficie, el estrato **B** se encontrará en el subsuelo inmediatamente después del estrato **A**, compartiendo límites.

$$T_{AB}(u) = \rho_a \frac{I + k_{AB} e^{-2d_A/u}}{I - k_{AB} e^{-2d_A/u}} \quad \dots(25)$$

$$u = \frac{I}{\lambda} = \exp \left(\frac{2d_A}{u} \right) \quad \dots (26)$$

$$k_{AB} = \frac{\rho_B - \rho_A}{\rho_B + \rho_A} \quad \dots (27)$$

U tiene dimensiones de longitud.

La transformada de resistividad de una sección con cualquier número de estratos puede ser deducida por la siguiente regla iterativa adaptada por Koefoed (1970).

$$T_n \approx \frac{T'_{AB} + T_{n-1}}{I + T'_{AB} T_{n-1} / \rho_A^2} \quad (28)$$

Donde

T_n = Resistividad transformada de la sección n-estrato

T_{n-1} = Resistividad transformada de la misma sección con el estrato **A** removido

T'_{AB} = Resistividad transformada de dos secciones de estrato dadas por el caso especial

$k_{AB} = -I$

La aplicación de (28) puede ser demostrada derivando la expresión para **T** por tres secciones de estratos **ABC** donde **A** es el superior, **B** el intermedio y **C** el estrato inferior.

$$T_{ABC} \approx \frac{T'_{AB} + T_{BC}}{I + T'_{AB} T_{BC} / \rho_A^2} \quad \dots(29)$$

T_{BC} es dado por (25) como:

$$T_{BC} = \rho_B \frac{I + k_{BC} e^{-2d_B/u}}{I - k_{BC} e^{-2d_B/u}} \quad \dots (30)$$

Sustituyendo (g) en (f) obtenemos la:

$$T_{ABC}(u) = \rho_A \frac{\{I + k_{AB} k_{BC} e^{-2d_B/u}\} + \{k_{AB} e^{-2d_A/u} + k_{BC} e^{-2(d_A+d_B)/u}\}}{\{I + k_{AB} k_{BC} e^{-2d_B/u}\} - \{k_{AB} e^{-2d_A/u} + k_{BC} e^{-2(d_A+d_B)/u}\}} \quad \dots(31)$$

I.3. ZONA DE ESTUDIO

I.3.1. Localización y extensión territorial

El Estado de Sonora se localiza en la porción noroeste de la República Mexicana, limita al norte con los Estados Unidos de América (Arizona y Nuevo México), al sureste con el Estado de Sinaloa, al este con el Estado de Chihuahua, y al oeste con el Golfo de California.

La extensión territorial del Estado de Sonora es de 185 492 km² que corresponden al 9.4% de la superficie nacional, cuenta con litorales en una extensión de 916 km a lo largo del Golfo de California. Complementan el territorio sonorense algunas islas, entre las que se encuentran la isla Tiburón, que es la de mayor importancia y extensión del país, con 1 212 km², considerada actualmente como una Reserva Ecológica Nacional. Al norte del territorio sonorense se encuentran también las islas Pelicano, San Jorge, Patos, San Esteban, Turner, Alcatraz, San Pedro, Lobos, Huiulay y el Ciari, mencionadas de norte a sur (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora, 1992*).



Figura 8. Ubicación y Mapa del Estado de Sonora. Imagen tomada de mapasmexico.net.

II.3.2. División municipal y población

Sonora cuenta con una población total de 2, 839, 969 habitantes, de los cuales 50.1% son hombres y 49.9% mujeres según datos de XI Censo General de Población realizado en 2000. El Estado se encuentra dividido en 70 municipios, los cuales llevan generalmente el nombre de sus cabeceras respectivas, ya que son los núcleos de población más importante. Los seis municipios más poblados son: Hermosillo, con el 24.66% de la población estatal; Cajeme con el 17.07%; Guaymas, con el 7.08%; Navojoa, con el 6.72%; San Luis Río Colorado, con el 6.12% y Nogales, con el 5.88%. Estos seis municipios comprenden el 76.53% del total de los habitantes de la entidad. Para el año de 2000, la población de Sonora, representaba el 2.4% de la población total del país y ocupa el décimo lugar en Republica Mexicana. La densidad poblacional promedio en el estado es de 9.8 habitantes por kilómetro cuadrado, cociente que sitúa a Sonora como el estado con menor densidad de población del país (*Censo general de población y vivienda*, INEGI, 2000).

I.3.3. Vías de comunicación

El Estado de Sonora cuenta con un sistema de comunicaciones conformado por 240385 Km de caminos, brechas y carreteras; 1,858 Km de vías férreas, 3 aeropuertos internacionales y 43 aeropistas principales. Además el estado cuenta con siete puertos principales, uno de altura, Guaymas, y los demás para la pesca y el turismo. La red de telecomunicaciones está integrada por microondas, telefonía y telegrafía, principalmente (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora*, 1992).

EXPLORACIÓN GEOHIDROLÓGICA Y UBICACIÓN DE UN MANTO ACUÍFERO EN NAVOJOA,
SONORA.



Figura 9. Localización de la zona de estudio. Imagen tomada de mapasmexico.net

I.3.4. Energía

Para el abastecimiento de energía eléctrica, el Estado de Sonora cuenta con nueve plantas generadoras, con una capacidad global de 1,377.8 Mw.

La distribución de la energía generada por estas plantas se realiza mediante 66 subestaciones, de las cuales 14 operan con potencia de 230 Kw y 52 con 115 Kw de 2,400 km. En el estado se cuenta con un sólo gasoducto para transporte de combustible (Naco-Hermosillo), el cual tiene una longitud de 339 km con diámetro de 16 pulgadas y capacidad de 14,000 m³ por hora. El trayecto de este gasoducto es Naco-Cananea-Imuris Magdalena-Santa Ana-Hermosillo. Se tiene programado prolongar este gasoducto hasta Navojoa pasando por Guaymas y Ciudad Obregón (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora*, 1992).

El principal centro de almacenamiento de PEMEX para la distribución de hidrocarburos en el estado se localiza en el puerto de Guaymas, lugar al que llegan los combustibles por medio de barcos.

I.3.5. Clima

En el extenso territorio sonorense se presenta una gran variedad de climas los cuales, en términos generales, se pueden agrupar por su grado de temperatura en tres tipos: calidos, semicálidos y templados. Cada uno de ellos con variantes en relación a la precipitación, desde los muy secos, hasta los subhúmedos, con las características distintivas siguientes: el grupo de climas cálidos presenta temperatura media anual mayor a 22° C con precipitaciones de menos de 300mm anuales desde los muy secos, hasta 700mm anuales de los semisecos. Este grupo de climas se presenta en las porciones central y sur del estado (INEGI, 2004).

El grupo de climas semicálidos presenta temperatura anual media que fluctúa de 18° C a 22° C. Los semicálidos muy secos, son los que abarcan una mayor superficie de la entidad, caracterizándose por una precipitación media anual de menos de 300mm, se presentan en la parte norte de la llanura sonorense. Los semicálidos secos presentan precipitación media anual de 300 mm a 500 mm; mientras que los semicálidos-semisecos la tienen de 500 mm a 700 mm Finalmente los climas semicalidos subhúmedos presentan precipitación de 700 mm a 1,000 mm Estos climas se presentan diseminados en la porción central del Estado, desde el norte hasta las proximidades de Rosario y Quiriego (INEGI, 2004).

El grupo de climas templados presenta en sus variedades de templados secos y semisecos una temperatura media anual de 16° C a 18° C, con una precipitación media anual de 300 mm a 400 mm, localizándose en la porción noreste del estado. Los templados subhúmedos presentan una temperatura media anual de 12° C a 16° C y su rango de precipitación media anual fluctúa entre 600 mm y 1,000 mm, localizándose en las porciones oriental y central de la entidad (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora*, 1992).

EXPLORACIÓN GEOHIDROLÓGICA Y UBICACIÓN DE UN MANTO ACUÍFERO EN NAVOJOA, SONORA.

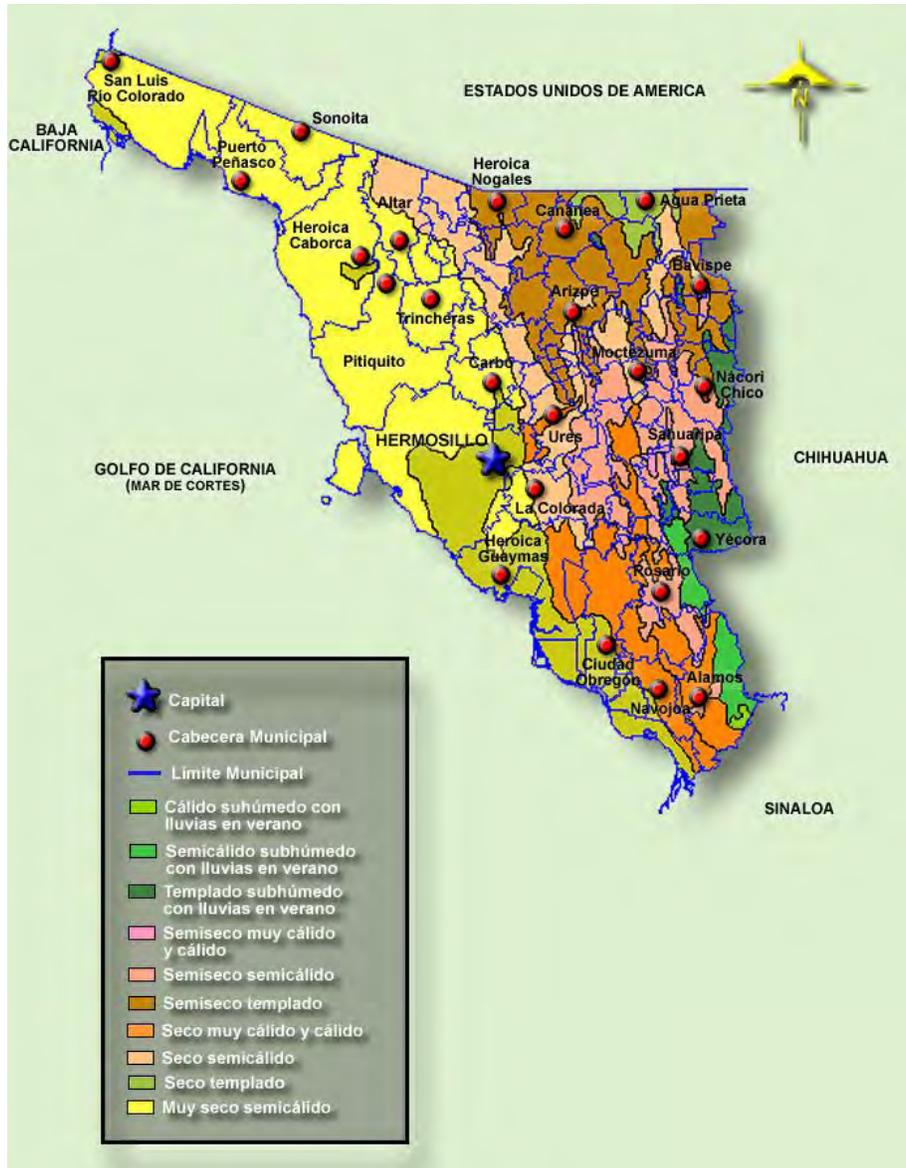


Figura 10. Principales características climáticas de Sonora (INEGI)

I.3.6. Vegetación

Los tipos de vegetación en el Estado de Sonora están directamente relacionados con los aspectos fisiográficos y las condiciones climatológicas predominantes en cada una de las diferentes regiones. De esta manera, en la llanura sonorenses se tiene una vegetación constituida por plantas de zonas costeras, así como desérticas, representadas por manglares y matorrales, respectivamente, además cuenta con zonas de agricultura de riego y de temporal. Así mismo cuenta con vegetación de dunas costeras y desiertos arenosos. En las subprovincias de Sierras y Valles Paralelos, predominan la selva baja caducifolia, los pastizales y los encinos; mientras que en las partes altas de la sierra, dominan los bosques de pino y encinos, con presencia ocasional de bosques de táscate (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora, 1992*).

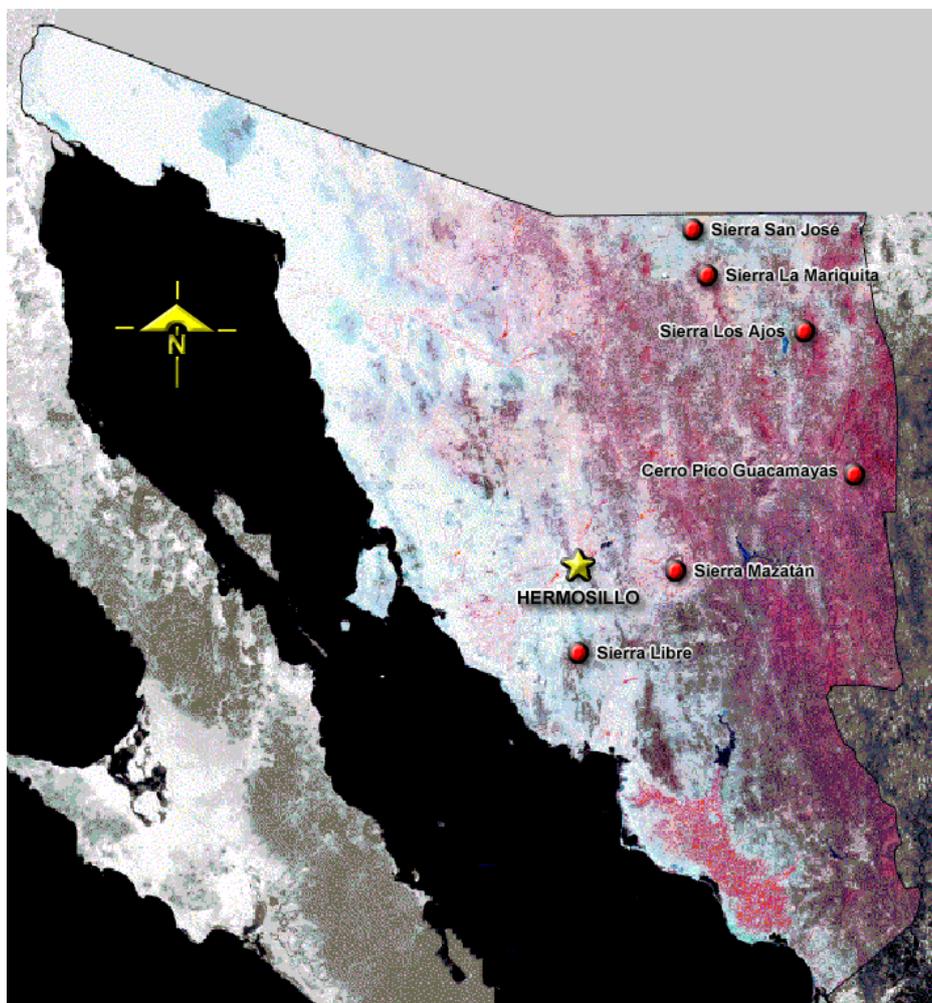


Figura 11. Thematic Mapper. INEGI 2004

El *Thematic Mapper* está hecho a partir de imágenes Landsat TM (*Thematic Mapper*) tomada en el año de 1993 con una combinación de falso color normal que permite distinguir: en tonos rojo la vegetación cuando es verde; en color azul tenue, las grandes localidades urbanas; en color negro, las presas y lagos, cuando son profundos y transparentes, cuando no lo son, aparecen en tonos de azul; en tonos rosa, las áreas de cultivo de riego en lugares planos; en tonos blancos, áreas de cultivo de temporal.

I.3.7. Hidrología

Con base en la clasificación de cuencas definida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2005), el Estado de Sonora cuenta con cinco regiones hidrológicas que son las siguientes: Río Colorado, Sonora Norte, Sonora Sur, Sinaloa y la región Cuencas Cerradas del Norte.

I.3.7.1. Aguas superficiales

La región hidrológica de Río Colorado tiene como corriente principal el Río Colorado, el cual forma el límite natural entre Sonora y Baja California, sus aguas riegan una importante zona del valle de San Luís Río Colorado. La región hidrológica Sonora Norte comprende las cuencas de los ríos San Ignacio, Concepción, El Plomo, Altar, Cocospera y Sonorita. En esta región se encuentran las presas: El Plomo, Cuauhtémoc y Comaquito.

Mientras, la región hidrológica Sonora Sur es la más extensa e importante de Sonora, comprendiendo las cuencas de los ríos Mayo, Yaqui, Matape, Sonora y Bacoachi. En esta región se localizan las presas más importantes como la Adolfo Ruiz Cortines Lázaro Cárdenas (La Angostura), Plutarco Elías Calles, Álvaro Obregón, Ignacio L. Alatorre y Abelardo L. Rodríguez. La región hidrológica Sinaloa comprende una parte del sureste de la parte de Sonora, perteneciente a la cuenca del Río Fuerte. La región hidrológica Cuenca Cerradas de Norte comprende sólo la parte noreste del estado, perteneciente a la cuenca del Río Casas Grandes.

En las regiones antes mencionadas se tiene un volumen de 6,200 millones de m³ de escurrimientos anuales de los principales ríos del estado, de los cual se tienen controlados 5 600 millones de m³, mediante obras hidráulicas, teniéndose un aprovechamiento del 90% de los recursos fluviales (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora*, 1992).

Dentro de la clasificación elaborada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2005), la zona de estudio queda comprendida dentro de la clasificación región hidrológica número 9, Sonora Sur. Ésta resalta por su importancia pues da cabida a los principales ríos de la entidad (Mayo, Yaqui, Mátepe, Sonora y Bacoachi), de cuyas cuencas se capta el 98.9% del volumen total de almacenamiento. El principal uso que se le da a dicha agua es el agrícola, en segundo término el doméstico y comercial, y finalmente el pecuario e industrial.

PRESA	CAPACIDAD (Millones m ³)	USO
El Plomo	13.2	Riego
Cuauhtémoc	51	Riego
Comaquito	31.2	Riego
Abelardo L. Rodríguez	287.3	Doméstico, riego, control avenidas

Tabla I. SONORA: Capacidades y usos de las principales presas (INEGI, 2004)

I.3.7.2. Aguas subterráneas

En el Estado de Sonora los escurrimientos de las aguas superficiales manifiestan de manera regional una tendencia del noreste al sureste hasta llegar a la planicie costera, que se caracteriza por terrenos planos y de baja pendiente, cuya constitución mineralógica y granulométrica son adecuadas para la infiltración del agua. Esta planicie abarca una franja de 100 km de ancho a partir de la línea de costa, disminuyendo hacia el sureste hasta cerca de 50 km en la planicie. Para extraer el agua subterránea, se perforan pozos con una profundidad promedio de 150 m.

En la región sur de la planicie costera de Sonora se extraen del subsuelo 1,764 millones de m³ anuales de agua, por medio de 2,620 pozos. El mejor acuífero de la región es de la costa de Hermosillo ya que, a través de 506 pozos, se extraen anualmente 900 millones de m³. Sin embargo, la sobreexplotación del subsuelo ha provocado el avance de aguas salinas. (Steinch, 2000).

La región noreste de la planicie costera, que comprende los municipios de Caborca, Puerto Peñasco, San Luís Río Colorado, Altar y Pitiquito, es muy árida y el

abastecimiento del área se realiza por medio de pozos profundos que captan acuíferos que se recargan con aguas de los ríos Asunción, Colorado y Sonoyta. La escasez de agua en el Estado de Sonora ha propiciado el desarrollo de importantes obras hidráulicas, sin embargo, también ha sido necesario recurrir a la explotación de los mantos acuíferos a fin de proveerse de agua. (*Programa estatal de mediano plazo. Aprovechamiento sustentable del agua*, 2004)

Existen en Sonora 47 acuíferos: 19 se encuentran en equilibrio, 13 subexplotados y 15 en condiciones de sobreexplotación. A nivel regional, la recarga media es de 2,500 hm³/año, con poco más de 4,800 millones de metros cúbicos. De los acuíferos sobreexplotados, los que registran el mayor grado de afectación son el de Guaymas, Costa de Hermosillo, Sahuaral y Caborca; en los dos primeros existe también el problema de intrusión salina, (Steinich, 2000).

I.3.8. Fisiografía

De acuerdo con la *Monografía geológico minera del Estado de Sonora*, el territorio del estado queda comprendido dentro de cuatro provincias fisiográficas, la provincia de la Sierra Madre Occidental, la provincia Sierras Sepultadas, la provincia de Sierras y Llanuras del Norte (*Basing and Ranges*) y la provincia de la Llanura Costera del Pacífico. La provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental se divide en dos subprovincias, denominadas: de Barrancas (Altiplanicie lávica) y de Sierras y Valles Paralelos (Sierras Alargadas).

La provincia fisiográfica de Sierras Sepultadas, comprende más del 50% del Estado de Sonora y se divide en tres subprovincias: la del Desierto de Sonora, la de la Llanura Costera y la de Estribaciones de Piamonte. La del Desierto de Sonora es la más ampliamente distribuida, extendiéndose hacia el norte hasta los Estados Unidos, en donde forma el Desierto de Mohave y el Desierto de Gila. En esta sub provincia afloran las rocas metamórficas y sedimentarias de edad Precámbrica, las más antiguas de México (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora*, 1992).

La provincia fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte, está constituida por una sucesión de sierras y valles que forman la planicie localizada al norte del estado, representando la continuación de la provincia *Basin and Ranges* de los Estados Unidos.

La provincia fisiográfica de la Llanura Costera del Pacífico cubre las partes bajas del relieve en la porción sureste del estado y está diseccionada por varias corrientes de la

vertiente occidental de la Sierra Madre. En Sonora solamente se encuentra representada la subprovincia nombrada Llanura Costera Deltas de Sonora y Sinaloa.

I.3.9 Marco geológico

El Estado de Sonora presenta un contexto geológico muy complejo, con edades que varían del Precámbrico al Reciente y una gran heterogeneidad litológica, predominando las rocas ígneas, destacando las de carácter ácido intermedio. En segundo término están las rocas sedimentarias, tanto continentales como marinas, distribuidas desde Caborca y Agua Prieta hasta Sinaloa. Por último están las rocas metamórficas que afloran principalmente en la porción noreste del estado. Respecto a los sedimentos recientes, predominan los aluviales, cubriendo la porción oeste del estado, formando la Llanura Sonorense.

El Precámbrico se forma de tres conjuntos de roca bien definidos de edad proterozoica. El más antiguo constituido por un complejo basal metamórfico, de origen ígneo y sedimentario, que constituye el basamento cristalino, representado por el complejo Bamori (**Pm**) y el complejo Sonobari con los esquistos de la Sierra de las Mesteñas. (Longoria et al;1978). El segundo conjunto lo representa el Granito Aibo (**Pp**) y el tercero lo forman secuencias de cuarcitas y dolomías, que cubre discordantemente a las rocas metamórficas del primer conjunto y rocas sedimentarias ligeramente metamorfizadas (**Ps**).

Las secuencias paleozoicas se componen básicamente de calizas y areniscas de plataforma. El Mesozoico de Sonora se representa por una secuencia marina regresiva, con depósitos zoneados calcáreos, arcillo-calcáreos y arcillo-arenosos, y otra netamente continental areno conglomerática. Afloran también rocas ígneas intrusivas y extrusivas de composición ácida a intermedia.

Durante el Terciario Inferior, en la región noreste del estado, se desarrolló un evento intrusivo batolítico responsable de la mayoría de las mineralizaciones de cobre diseminado. Para el Terciario Medio se presentaron grandes eventos volcánicos, caracterizados por varias emisiones de lavas riolíticas, con eventuales coladas de basalto, tobas y depósitos clásticos, de edad Oligoceno-Mioceno con una amplia distribución en el estado.

En el Plio-Cuaternario se desarrollaron amplios y potentes paquetes de sedimentos continentales, principalmente hacia el oeste, con presencias de esporádicas coladas de basaltos y aparatos volcánicos. Hacia la costa occidental de estado afloran extensas

llanuras costeras cubiertas por capas de sedimentos eolíticos (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora*, 1992).

I.3.10. Marco tectónico

Los principales eventos tectónicos que han afectado a través del tiempo geológico al Estado de Sonora se pueden considerar en orden cronológico los siguientes: la Orogenia Mazatzal, de edad Proterozoico Temprano, que se corresponde con un proceso de metamorfismo regional (complejos metamórficos Bamori e indiferenciados). Durante el Proterozoico Tardío tuvo lugar la depositación de la secuencia carbonatada-clástica del en zonas de plataforma de aguas someras y la prolongación hacia el sur del Geosinclinal Cordillerano. Posteriormente, durante el Paleozoico, se presentó una estabilidad tectónica, depositándose secuencias sedimentarias de facies de plataforma en distintas partes del estado. Como fase subsecuente sobrevino una depositación de cuenca ligada a un arco magmático, originado como la consecuencia de la subducción de la litosfera oceánica en el margen occidental de Norteamérica, durante el Triásico Tardío-Jurásico Temprano, produciendo un evento de metamorfismo regional que transforma la secuencia durante el Jurásico Medio-Tardío.

Durante el Cretácico Inferior inició una trasgresión marina, con una fase compresiva durante el Cretácico Medio, que provocó el plegamiento de la secuencia del Cretácico Inferior y terrenos de la franja volcánogénica Jurásica. En el intervalo del Cretácico Inferior al Terciario Inferior se presentó la Orogenia Laramide, con una etapa magmática asociada. Este evento originó el emplazamiento de un importante conjunto volcánico-plutónico durante el Terciario Temprano-Cretácico Tardío. La tectónica distensiva que originó el golfo de California y la formación de la provincia de Sierras y Valles Paralelos se considera del Mioceno Temprano (*Monografía geológico-minera del Estado de Sonora*, 1992).

La denudación tectónica con eventos compresivos menores, erupciones por fisuras profundas y acción continúa de fuerzas exógenas, produjeron el desarrollo de depósitos no consolidados de aluviones y terrazas del Mioceno hasta el Reciente.

I.4 Instrumentación utilizada en el trabajo de campo

El equipo utilizado durante el levantamiento fue un resistivímetro Syscal R1 Plus marca IRIS con las especificaciones siguientes.

Transmisor: resolución $10\mu\text{A}$; precisión 0.3; máxima salida de corriente 2.5 A; voltaje máximo 600 V; potencia máxima 600W; duración del pulso 0.5s, 1s, 2s;

Receptor, especificaciones de la medición de voltaje: resolución $1\mu\text{V}$; convertidor A/D 20 Bit; precisión 0.3% Impedancia de salida 10 Mohms; rango de salida de voltaje $\pm V$

I.5 Logística de campo

Pre-campo: se hizo una búsqueda bibliografía que incluyo: geología a nivel regional y a nivel local, información referente a las características geográficas del lugar (vías de comunicación, ubicación de caminos asfaltados y de terracería, etc.) y, finalmente, se hizo un revisión de trabajos de corte teórico y metodológico. Esto con el fin de facilitar el trabajo de campo.

Una vez obtenidos lo datos requeridos básicos se hizo la planeación previa al estudio de campo, con el objetivo de optimizar el trabajo a realizar en campo.

Campo: reconocimiento de la zona a estudiar, en base a la información geológica previa y con el reconocimiento superficial de esta, se llevo acabo el levantamiento geoelectrico, que consto de tres sondes integrados por ocho SEV'S cada uno. Esto permitió obtener los datos necesarios para evaluar las características litológicas que determina la estructura del subsuelo de la zona de estudio.

I.5.1 Actividades realizadas

Reconocimiento superficial. Con el fin de recabar información se caminó el área, así se identificaron los lugares donde era más practico y posible realizar los sondeos eléctricos verticales y en el cual no hubiera problema en llegar a las aberturas necesarias.

Nivelación topográfica. Se identificaron zonas de topografía regular y se midieron las elevaciones que existían, para de ser necesario hacer las corrección por nivel topografico.

EXPLORACIÓN GEOHIDROLÓGICA Y UBICACIÓN DE UN MANTO ACUÍFERO EN NAVOJOA,
SONORA.

METODOLOGÍA

II.1. PROCEDIMIENTO PRÁCTICO PARA OBTENER LA CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE

Una vez obtenidos los datos, es necesario encontrar las curvas de resistividad aparente, así como generar un modelo geológico que permita conocer la constitución del subsuelo. Para ello se recurrió a las aportaciones teóricas realizada por diversos autores, entre los que destaca Ghosh (1971). De acuerdo con este último autor, la curva de resistividad aparente se obtiene siguiendo dos pasos:

El primero consiste en modelar la curva de resistividad aparente, a partir de los valores simples de la función de la transformada de la resistividad, mismos que se obtienen por modelos de la tierra. Para ello $\mathbf{T(u)}$ es calculada como una función de \mathbf{U} , con la ayuda de las ecuaciones (18) y (19) y, posteriormente graficada en la porción superior derecha del papel transparente bilogarítmico. Posteriormente la función $\mathbf{T(u)}$ es simplificada y muestreada en un intervalo de un tercio de 25 cm. para mostrar la transformación del valor simple de \mathbf{Tm} . Alternativamente, la función $\mathbf{T(y)}$ puede ser calculada en incrementos iguales de \mathbf{y} , de un tercio de 25 cm. (por ejemplo 0.77) y los valores deben ser mostrados o graficados en el papel transparente bilogarítmico. De esta forma, es posible constituir la tabla de transformación. Aplicar la aproximación gráfica sugerida por Koefoed, para la construcción de las curvas Kernel, simplifica considerablemente el cálculo de la función \mathbf{T} . El uso del papel monologarítmico (\mathbf{U} debe estar en una escala lineal) permite términos como $\mathbf{K e^{-2d/u}}$ en la expresión de transformación como líneas rectas. Utilizando la escala monologarítmica es posible visualizar claramente valores grandes y pequeños de \mathbf{U} , facilitando el cálculo de la función \mathbf{T} y por ende la obtención del valor muestra de \mathbf{Tm} de la curva \mathbf{T} . Es necesario muestrear e igualar los incrementos a $\mathbf{y = Ln (u) = 0.77}$

El segundo paso consiste en convolucionar los valores muestra de la transformada con los coeficientes filtro \mathbf{bj} dados en la tabla uno para obtener los valores de resistividad aparente \mathbf{Rm} algebraicamente mostrados:

$$R_m = \sum_{j=\beta}^{\alpha} b_j T_{m-j} \quad \text{para } m = 0, 1, 2, 3 \dots (32)$$

Donde

Para el arreglo Schlumberger: $\alpha = 5$ y $\beta = -3$

Para el arreglo Wenner: $\alpha = 8$ y $\beta = -1$,

La ecuación (32) puede ser evaluada numéricamente.

Los valores de salida, llamados valores de resistividad R_m , obtenidos de la ecuación (32), refieren los puntos de la abscisa del campo del lado izquierdo, en relación con los valores transformados de entrada. Éstos corresponden al estado terrestre en ambos arreglos electrónicos.

Lo anteriormente expuesto debe ser señalado para mostrar las salidas correspondientes que permitan alinear los valores T . Para la alineación izquierda, el arreglo Schlumberger necesita cinco valores más alejados de T , mientras que con el arreglo Wenner son necesarios ocho valores (valores menores de u). Respecto a la alineación derecha para el arreglo de Schlumberger se necesitan tres valores y , para el de Wenner, uno (por ejemplo los valores mayores de u). Esto está fundamentado en la teoría de filtros digitales y puede ser también verificado gráficamente.

En lo que se refiere a las aplicaciones gráficas es necesario seguir tres pasos:

En primer lugar, los coeficientes dados en la tabla uno se grafican en un papel bilogarítmico donde bo está a la izquierda de $x=0$ (el centro de operación de filtros es de 3.7 in para el arreglo Schlumberger y de 3.4 cm para el arreglo Wenner). Los demás coeficientes están graficados con respecto a bo manteniendo el espacio constante de un tercio de 25 cm. El cruce está localizado en $x = 0$ y ordenado en valores de uno, esta gráfica puede ser llamada "Cuadro de filtros".

En el segundo paso, el cuadro de transformación se superpone en el cuadro de filtros con el quinto punto izquierdo extra, para el arreglo de Schlumberger y el octavo punto extra para el arreglo de Wenner en el cruce. Los puntos de filtro están trazados en el cuadro de transformación. Este procedimiento se repite hasta el tercer punto extra para Schlumberger y el primer punto extra para Wenner (hacia el lado derecho de la alineación). Éstos deben de estar sucesivamente en el cruce y en el filtro. Posteriormente los puntos son sumados (una contribución para los coeficientes negativos obtenidos, de cualquier modo para ser substraídos) para expresar los valores de resistividad aparentes correspondientes con los valores muestra de transformación.

En el tercer paso se debe dibujar la curva de resistividad aparente, interpolando los valores. Es necesario utilizar segundo conjunto de valores de transformación, definido entre el primer conjunto y los coeficientes del filtro, para ayudar a la interpolación. La interpolación debe mostrar los valores de resistividad como un espacio más reducido,

por ejemplo en sexto de 25 cm \approx 0.38. Los ejemplos ilustran un procedimiento gráfico similar de operación con los coeficientes de filtros que han sido dados por Ghosh (1971).

Los métodos existentes (CGG 1955, Flate 1955, Van Dam 1965, Mooney *et al.* 1966) para la teoría de cálculo de las curvas de resistividad dependen de la evaluación de la integral de Stefanescu (Stefanescu Bet al. 1930). Ya sean un producto de la función Kernel y la función Bessel los métodos no pueden ser dados en una forma simple conteniendo sólo funciones elementales. Como la función Kernel es un coeficiente de funciones exponenciales, el procedimiento más comúnmente aceptado es expandirlas en series infinitas de términos e integrarlas término por término. La función Kernel también puede ser descompuesta en series de fracciones parciales, en especial en los casos de un conductor perfecto o un sustrato resistivo. Para una rápida convergencia de las series en cualquiera de estos métodos es necesario que los espesores sean múltiples o haya algunos espesores comunes.

El método presente tiene estas diferencias esenciales para la evolución de la integral de Stefanescu. No hay restricciones al número de estratos ni a la longitud de su espesor, esto esta en función de la corriente que se inyecte.

b_{-3}	b_{-2}	b_{-1}	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	
0.0225	-0.0499	0.1064	0.1854	1.9720	-1.5716	0.4018	-0.0814	0.0148	
b_{-1}	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
0.0284	0.458	1.5662	-	0.3473	-	0.0416	-	0.0179	-0.0067
	2		1.3341		0.0935		0.0253		

Tabla II. Coeficientes de filtro invo digital (Ghosh 1971)

RESULTADOS

En las siguientes tablas se muestran los datos de los sondeos eléctricos verticales (SEV) obtenidos en campo, en las localidades de Jijiri (S11), Tetapeche (S14) y Tierra Blanca (S12). Los valores de resistividad aparente ρ_a se encuentran en (ohm * metro) [$\Omega \cdot m$] y, la abertura $AB/2$ está dada metros (m).

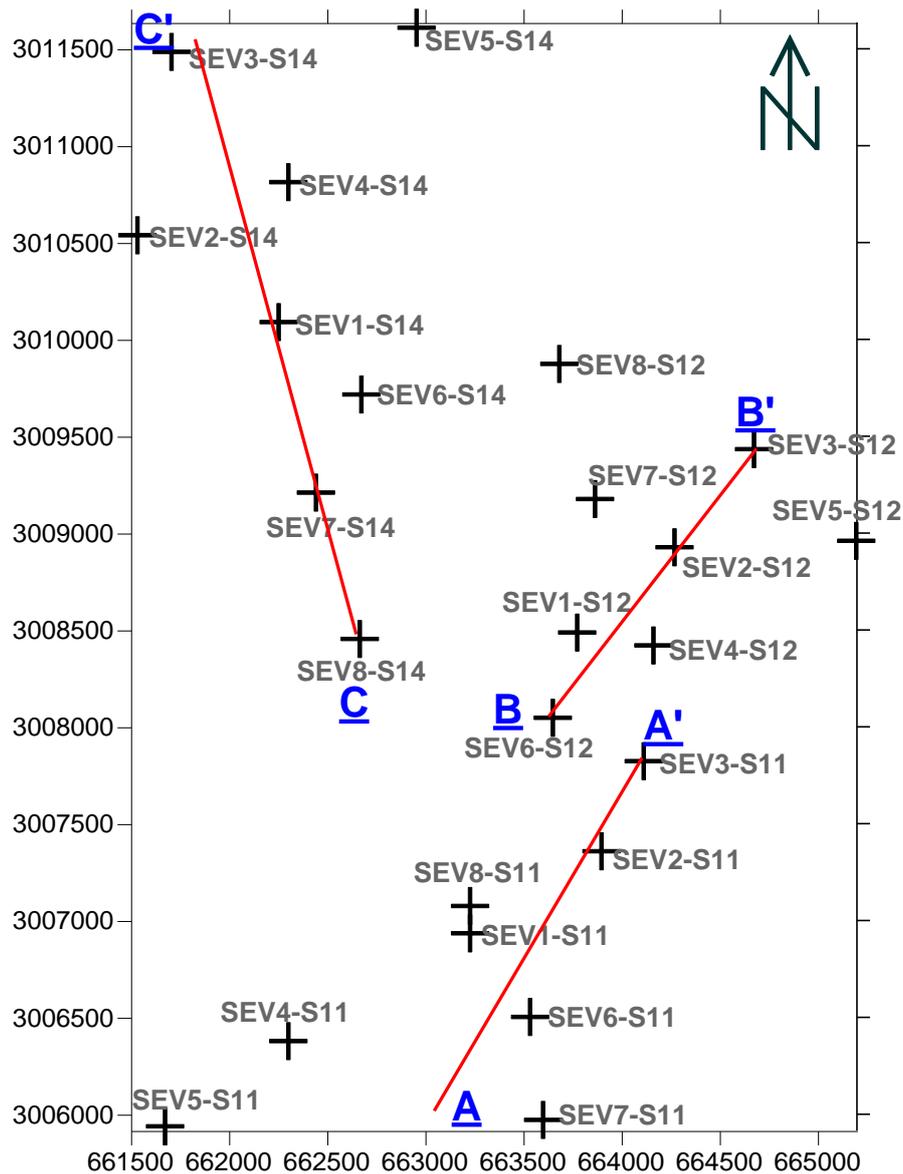


Figura 12. Proyección en línea de los perfiles

LOCALIDAD JIJIRI. SONDEO 11

AB/2	SEV-1	SEV-2	SEV-3	SEV-4	SEV-5	SEV-6	SEV-7	SEV-8
1.00	77.30	45.70	32.70	61.10	31.30	39.30	69.60	26.90
1.50	60.30	36.20	36.60	56.50	27.00	27.80	57.60	32.60
2.00	62.10	34.20	37.30	58.80	28.20	23.40	55.30	40.20
3.00	71.90	35.80	37.00	60.70	27.70	25.60	60.60	61.10
4.50	87.20	38.50	31.70	65.60	24.90	37.70	62.90	81.70
7.00	98.80	35.10	27.90	64.60	20.20	52.50	56.90	106.20
10.00	98.30	32.80	31.30	66.20	19.70	67.80	50.30	133.90
15.00	73.85	27.05	34.75	66.30	20.55	86.10	40.60	163.40
22.00	59.20	20.50	39.50	57.90	24.00	87.00	30.90	132.60
32.00	45.00	15.20	49.30	50.00	33.40	65.85	19.35	61.50
46.00	28.90	13.20	55.00	35.10	38.40	56.30	13.50	36.10
68.00	26.80	13.30	53.05	33.45	51.25	36.10	11.10	33.10
100.00	21.40	17.50	44.40	38.30	50.20	29.20	12.70	40.60
145.00	26.80	25.40	38.50	41.10	48.30	34.80	16.00	50.80
180.00	32.60	30.90	35.90	39.00	44.70	48.80	14.35	38.25
215.00	36.30	31.90	36.80	37.30	39.55	58.60	17.10	31.80
265.00	41.30	29.90	40.40	38.00	38.30	77.30	18.80	21.20
315.00	45.20	39.70	43.60	37.30	31.60	81.00	15.80	20.10
465.00	63.00	50.70	55.90	39.30	45.00	103.1	15.00	19.10

Tabla III. Resultados obtenidos en campo en la localidad Jijiri.

Estos datos son el resultado de aplicar prospección eléctrica utilizando un arreglo electródico tipo Schlumberger, donde se genera un campo eléctrico, inyectando una intensidad de corriente en el electrodo A, esta pasa por el subsuelo (que es parte del circuito) para salir por electrodo B, donde se cierra el circuito. Los electrodos M y N, se encuentran entre los electrodos A y B, midiendo la diferencia de potencial, las leyes del fenómeno se encuentra fundamentadas en las leyes de Maxwell ya descritas en esta practica.

MODELOS GEOLÓGICOS Y CURVAS DE RESISTIVIDAD DE LA LOCALIDAD JIJIRI CORRESPONDIENTE AL SONDEO 11

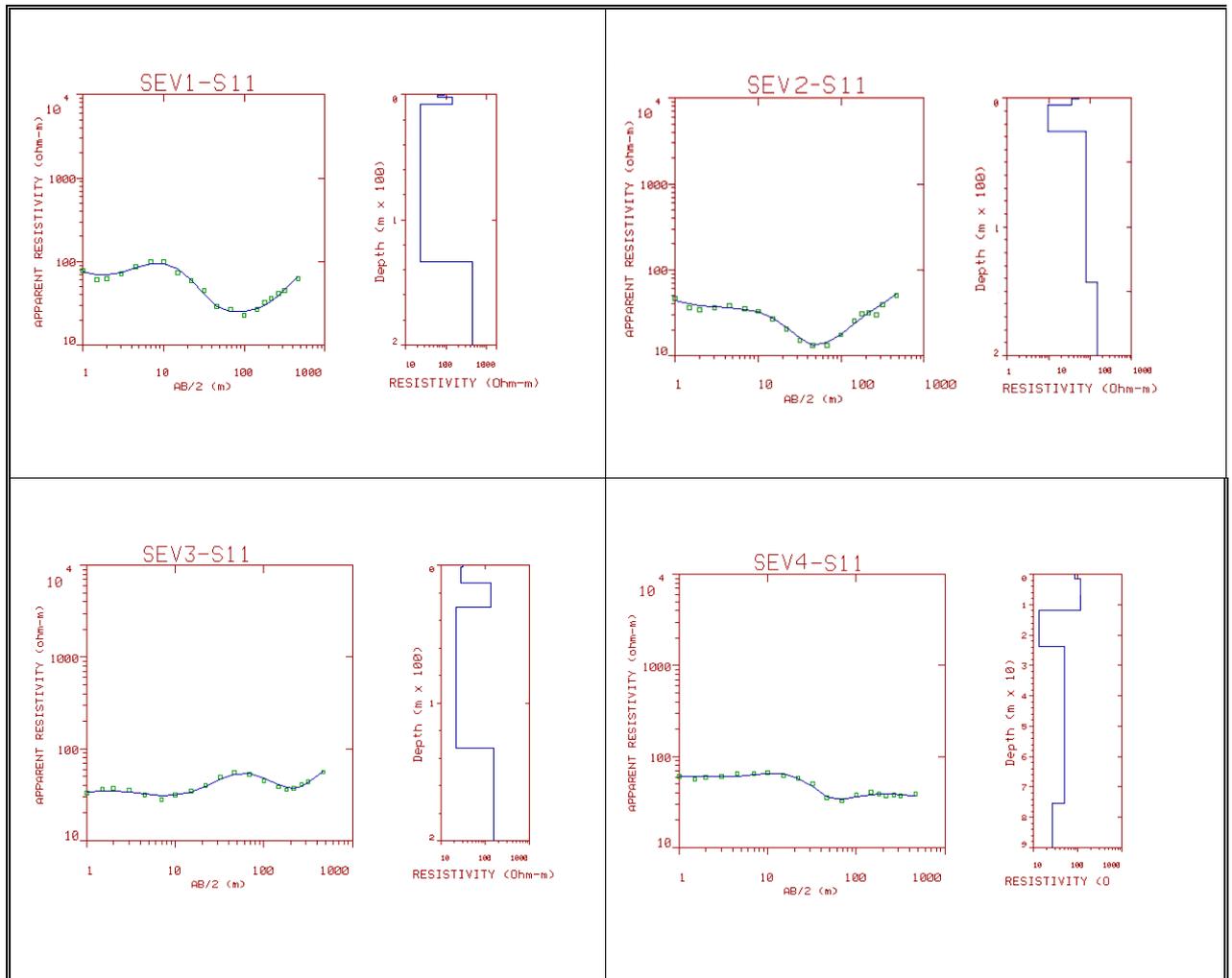


Figura 13. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Jijiri. Sondeo 11

Las curvas de resistividad aparente son obtenidas de la respuesta del medio a la intensidad de corriente conocida que se le indujo. Los modelos geológicos son el resultado de aplicar un problema inverso, fueron corregidas dejando fija la primera capa. En la figura 11, se muestran las curvas de resistividad aparente correspondientes a los SEVs 1, 2, 3, y 4 del Sondeo 11 (S11), así como sus modelos geológicos.

De acuerdo con lo anterior, en el SEV1-S11 podemos observar cuatro capas, respuesta de las resistividades del medio, las cuales se pueden correlacionar con una litología característica, como se muestra en las conclusiones. Es conveniente analizar todas las resistividades del sondeo juntas, con esta información se genera un corte geoelectrico,

sin especular que tipo de litología es a priori. En el SEV2-S11 se ven cuatro capas, correspondientes al contraste fuerte de resistividades que muestra la curva. En el SEV3-S11 se ven tres capas. En el SEV4-S11

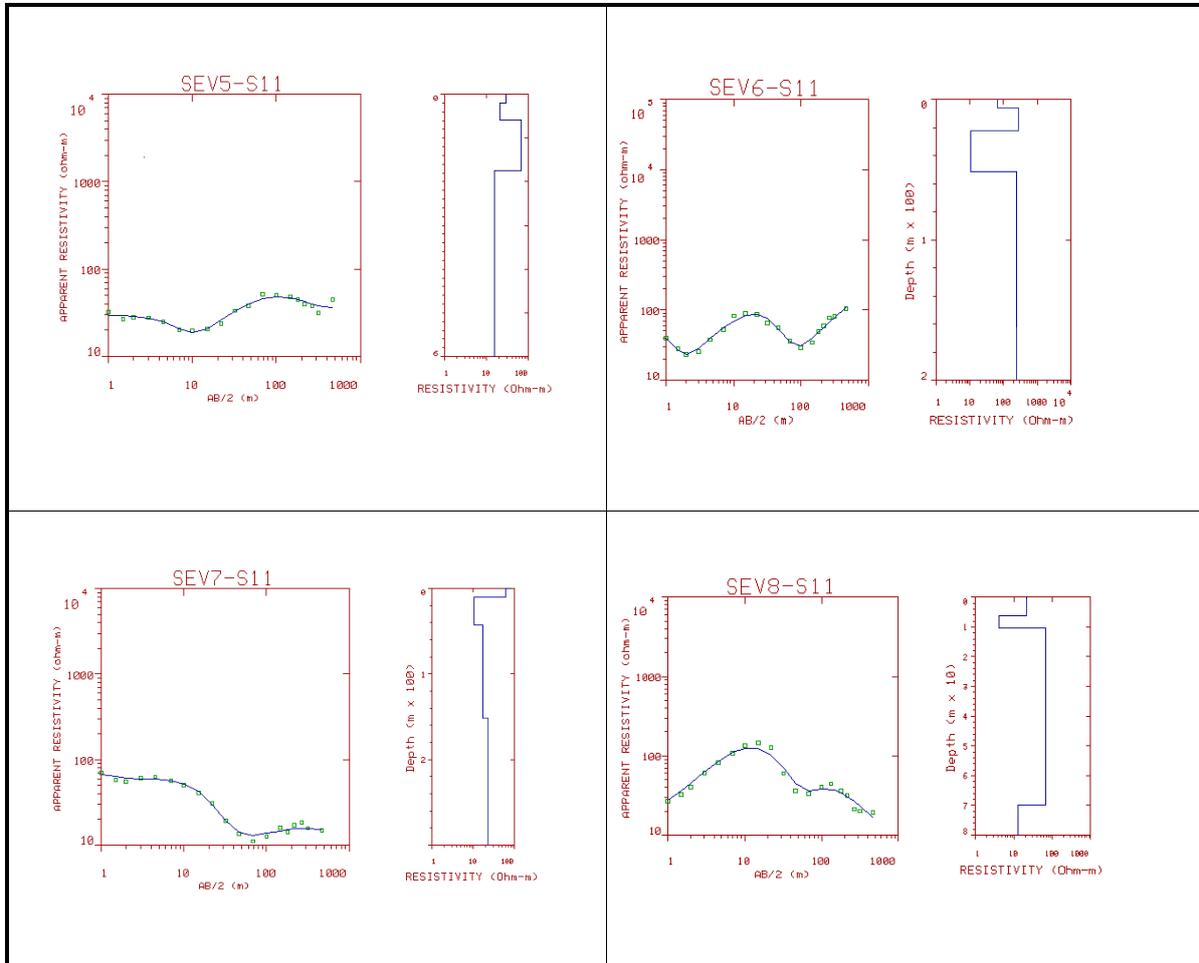


Figura 14. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Jijiri. Sondeo 11.

En el SEV5-S11 observamos cuatro cambios de resistividad en la curva, que corresponden a cuatro capas en el modelo geológico. En el SEV6-S11 se consideran cuatro capas, debido a la respuesta de la curva. En el SEV7-S11 se aprecian cuatro cambios notables en la respuesta del medio a la corriente, de ello se deduce la existencia de cuatro estratos en el subsuelo, correspondientes a cada capa. En el SEV8-S11 la respuesta de la curva es un poco extraña pero después de interpretarla se llegó a que da como resultado la posibilidad de existencia de cuatro capas, esto en la figura 12. Posteriormente los modelos se colocarán en línea y se correlacionarán para generar un perfil geoelectrico.

LOCALIDAD TETAPECHE. SONDEO 14

AB/2	SEV-1	SEV-2	SEV-3	SEV-4	SEV-5	SEV-6	SEV-7	SEV-8
1.00	32.20	40.20	23.30	14.00	30.80	122.30	47.40	45.40
1.50	38.80	46.90	18.90	21.40	38.20	162.90	31.50	40.20
2.00	45.70	54.60	19.90	25.40	44.70	181.60	20.50	35.70
3.00	41.80	56.90	23.40	32.70	48.80	201.80	10.70	36.70
4.50	38.40	49.70	30.00	40.80	51.80	187.80	8.60	47.00
7.00	39.80	35.80	41.00	48.70	43.40	159.20	9.70	72.50
10.00	34.50	32.60	47.10	52.10	39.30	146.10	11.20	106.70
15.00	50.10	35.15	44.00	44.25	36.95	113.30	12.75	152.20
22.00	59.80	40.70	32.70	43.40	41.90	84.00	14.30	192.30
32.00	63.80	44.00	25.10	50.90	58.10	63.15	14.20	171.75
46.00	57.60	44.70	20.70	56.80	61.80	57.70	15.40	79.70
68.00	55.35	38.50	18.75	53.80	46.05	63.50	15.25	57.30
100.00	40.40	28.20	15.10	40.80	30.80	68.00	14.90	23.00
145.00	45.80	20.20	15.10	35.60	21.40	74.00	18.20	16.00
180.00	56.50	18.10	14.30	32.80	14.90	81.80	21.60	16.80
215.00	64.85	18.85	14.85	30.10	12.10	78.65	23.75	18.00
265.00	72.90	21.30	13.00	31.00	13.10	75.20	24.30	20.90
315.00	77.70	22.90	12.30	33.60	14.00	75.90	25.00	24.30
465.00	80.30	30.10	15.70	38.50	16.90	61.70	33.10	29.60

Tabla IV. Resultados obtenidos en levantamiento en campo correspondiente a la localidad Tetapeche.

Los datos obtenidos del Sondeo 14 de la localidad Tetapeche se muestran en la tabla II, estos se obtuvieron a través de un arreglo electródico tipo Schlumberger, y sus unidades son en ohm * m. las aberturas de AB/2 comenzaron en un metro de longitud y llegando hasta un AB/2 de 465 metros, como máxima abertura, y con lo que se alcanzó una profundidad aproximada de 130 metros de profundidad. Estos datos son resistividades aparentes, se proseguirá a obtener las curvas de resistividad y modelos geológicos, a través del software Resixp y así obtener una estimación de las resistividades verdaderas del medio, con lo que se construirán perfiles geoelectricos y se correlacionara con la litología.

MODELOS GEOLÓGICOS Y CURVAS DE RESISTIVIDAD DE LA LOCALIDAD
TETAPECHE CORRESPONDIENTE AL SONDEO 14

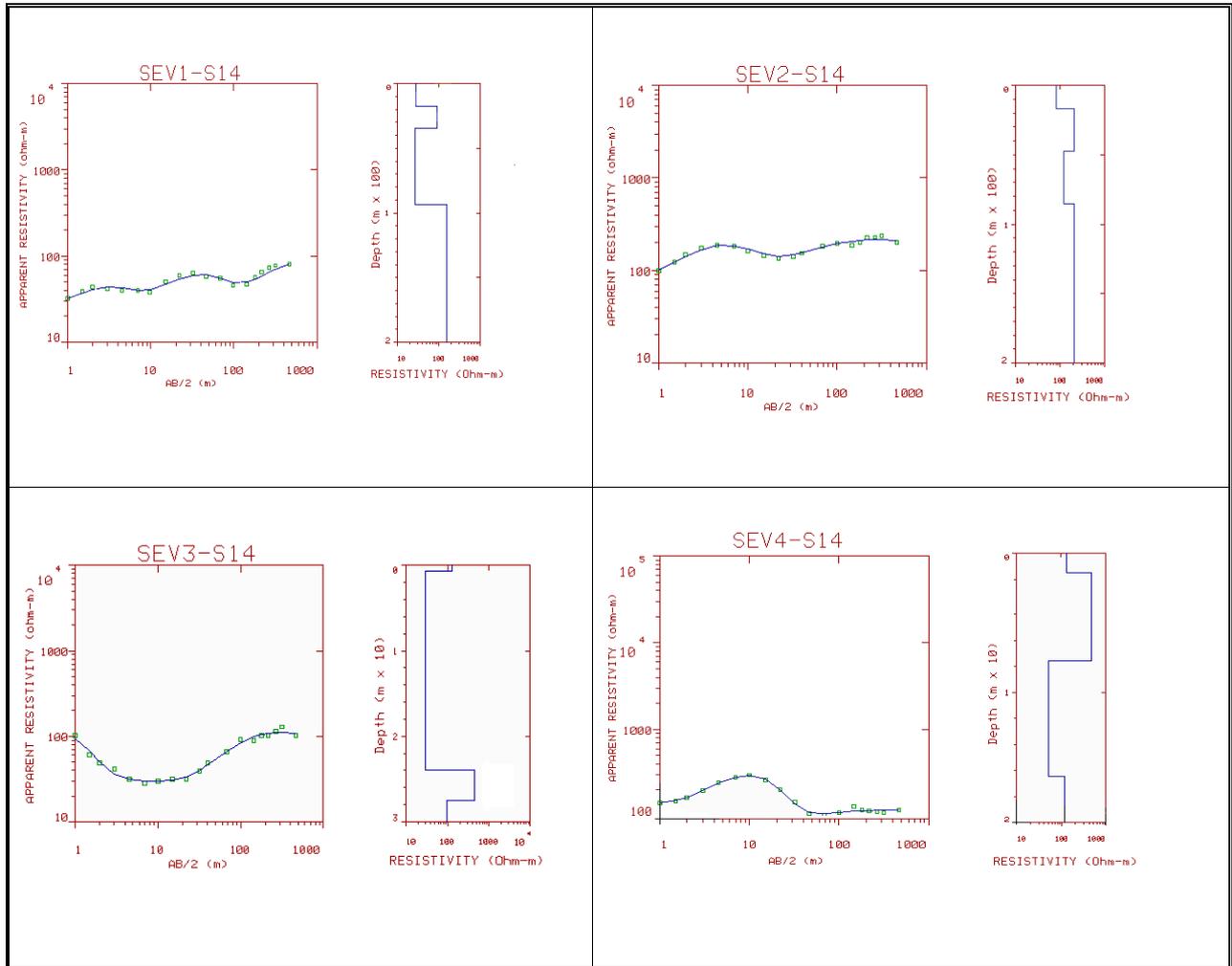


Figura 15. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Tetapeche. Sondeo 14.

En la figura 13 se muestran cuatro curvas de resistividad y cuatro modelos geológicos, correspondientes a las curvas, del SEV1 hasta el SEV4 del Sondeo 14.

De la primer curva y modelo geológico SEV1-S14 se determinan 4 cambios de resistividad, dando lugar cuatro capas en el modelo geoelectrico, del segundo cuadro SEV2-S14 podemos apreciar la curva con un comportamiento conductor-resistivo-conductor-resistivo el cual da lugar a cuatro capas con diferentes materiales conductivos. En el SEV3-S14 la profundidad a la que se llego es menor que en la anteriores, se pueden ver cuatro capas debidas a la respuesta de curva de resistividad, la primera es muy somera y puede que solo nos indique la resistividad debida al suelo, la segunda capa es de un espesor no despreciable y es correlacionable con los SEVs anteriores, termina con dos capas mas, el comportamiento de la curva seria resistivo-

conductor-resistivo-conductor. En el SEV4-S14 el comportamiento de la curva es conductor-resistivo-conductor-resistivo, también se aprecia que la profundidad a la que se logro llegar es menor.

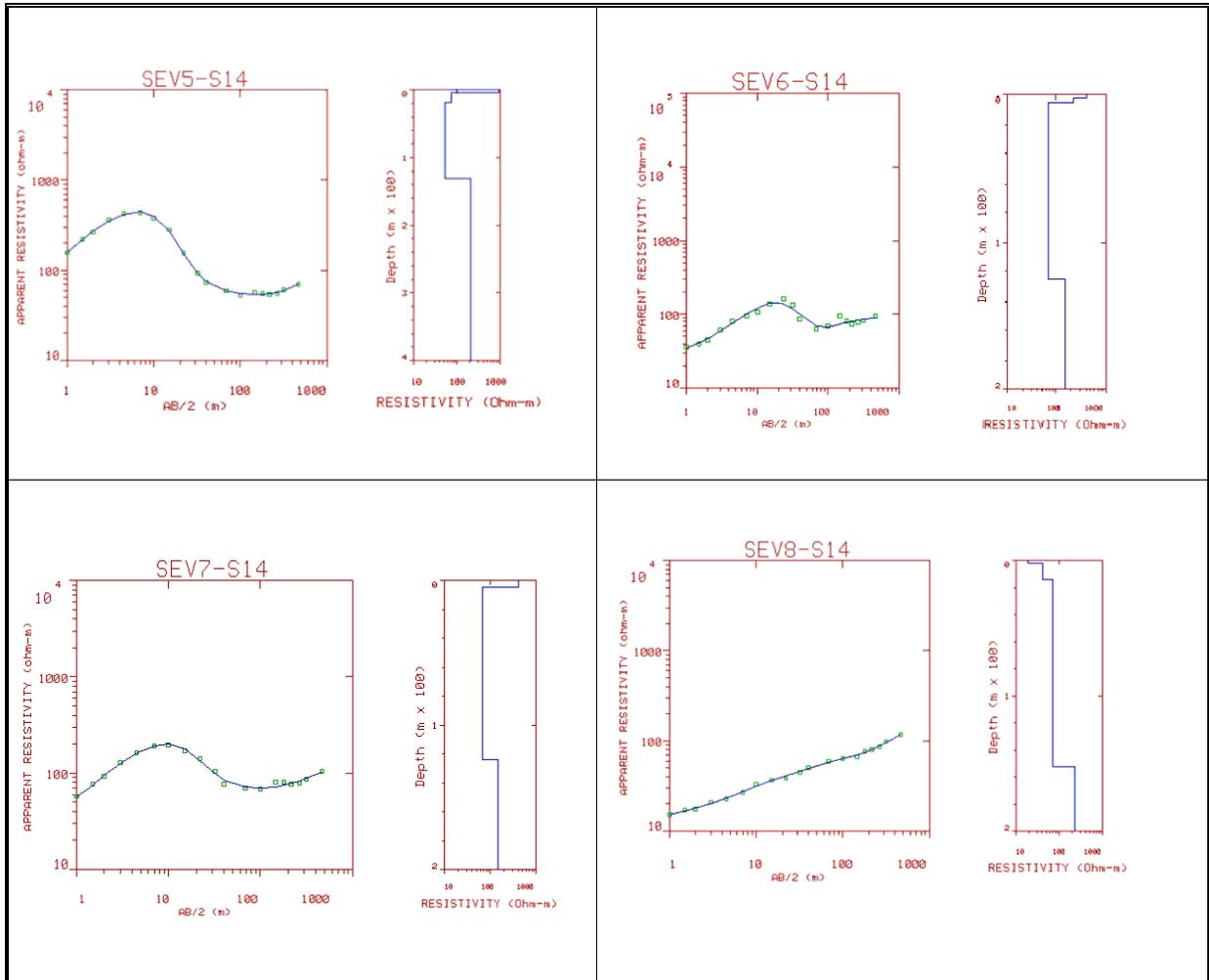


Figura 16. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Tetapeche. Sondeo 14.

En el SEV5-S14 muestra la posibilidad de existencia de 5 capas, conductor-resistivo-conductor-conductor-resistivo, la segunda capa, parece encontrar demasiada resistencia a la corriente, podría tratarse de un lente de un material altamente resistivo. El SEV6-S14 no se considera, dada la poca penetración a la que llego. El SEV7-S14 se pueden apreciar tres capas de comportamiento resistivo-conductor-resistivo. En el SEV8-S14 se aprecian cuatro capas, donde la primera es muy delgada y podría ser desechada, dependiendo del contexto general del sondeo, su comportamiento es resistivo-resistivo-resistivo-resistivo, esto en la figura 14.

LOCALIDAD TIERRA BLANCA. SONDEO 12

AB/2	SEV-1	SEV-2	SEV-3	SEV-4	SEV-5	SEV-6	SEV-7	SEV-8
1.00	22.10	40.20	23.30	14.00	30.80	122.30	47.40	45.40
1.50	24.10	46.90	18.90	21.40	38.20	162.90	31.50	40.20
2.00	25.70	54.60	19.90	25.40	44.70	181.60	20.50	35.70
3.00	25.10	56.90	23.40	32.70	48.80	201.80	10.70	36.70
4.50	26.80	49.70	30.00	40.80	51.80	187.80	8.60	47.00
7.00	29.50	35.80	41.00	48.70	43.40	159.20	9.70	72.50
10.00	37.60	32.60	47.10	52.10	39.30	146.10	11.20	106.70
15.00	46.65	35.15	44.00	44.25	36.95	113.30	12.75	152.20
22.00	56.20	40.70	32.70	43.40	41.90	84.00	14.30	192.30
32.00	63.40	44.00	25.10	50.90	58.10	63.15	14.20	171.75
46.00	60.50	44.70	20.70	56.80	61.80	57.70	15.40	79.70
68.00	52.45	38.50	18.75	53.80	46.05	63.50	15.25	57.30
100.00	58.30	28.20	15.10	40.80	30.80	68.00	14.90	23.00
145.00	70.10	20.20	15.10	35.60	21.40	74.00	18.20	16.00
180.00	82.70	18.10	14.30	32.80	14.90	81.80	21.60	16.80
215.00	86.60	18.85	14.85	30.10	12.10	78.65	23.75	18.00
265.00	86.90	21.30	13.00	31.00	13.10	75.20	24.30	20.90
315.00	84.20	22.90	12.30	33.60	14.00	75.90	25.00	24.30
465.00	95.60	30.10	15.70	38.50	16.90	61.70	33.10	29.60

Tabla V. Resultados obtenidos en levantamiento en campo correspondiente a la localidad Tierra Blanca.

Los datos obtenidos del Sondeo 12 de la localidad Tierra Blanca se muestran en la tabla II, estos se obtuvieron a través de un arreglo electródico tipo Schlumberger, y sus unidades son en ohm * m. las aberturas de AB/2 comenzaron en un metro de longitud y llegando hasta un AB/2 de 465 metros, como máxima abertura, y con lo que se alcanzó una profundidad aproximada de 130 metros de profundidad. Estos datos son resistividades aparentes, se proseguirá a obtener las curvas de resistividad y modelos geológicos, a través del software Resixp y así obtener una estimación de las resistividades verdaderas del medio, con lo que se construirán perfiles geoelectricos y se correlacionara con la litología.

MODELOS GEOLÓGICOS Y CURVAS DE RESISTIVIDAD DE LA LOCALIDAD TIERRA BLANCA .SONDEO 12.

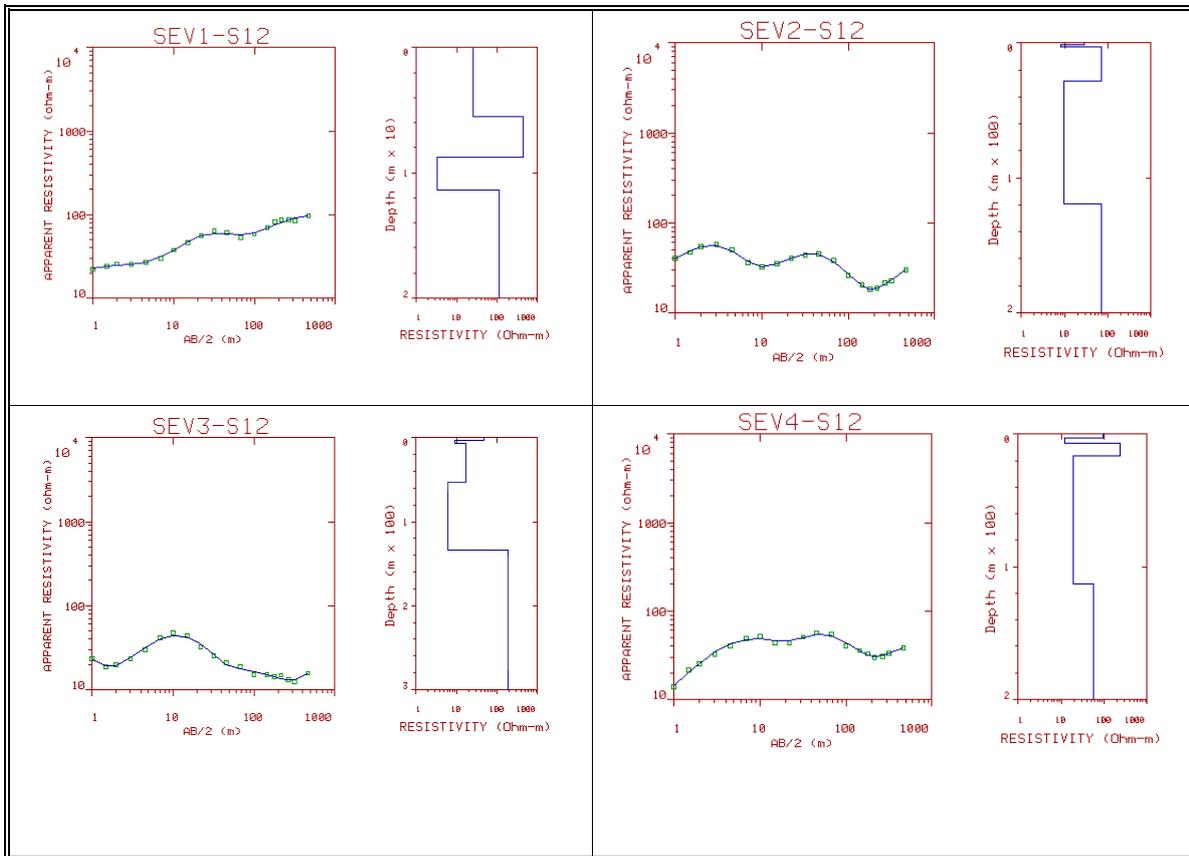


Figura 17. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Tierra Blanca. Sondeo 12.

En el primer SEV1-S12 la curva tiene un contraste de resistividades de la forma conductor-resistivo-conductor-resistivo y no nos da mucha información del subsuelo, dado que sólo penetró 10 m de profundidad y solo se tiene información esos diez metros. En el SEV2-S12 el comportamiento de la curva es resistivo-conductor-resistivo-conductor-resistivo las primeras capas son muy someras se debe de tener cuidado dado que no es posible que se vea tanto detalle. En el SEV3-S12 se ven cinco capas igual las dos son muy someras y hay que tener cuidado en considerarlas, el comportamiento que da la curva es resistivo-conductor-resistivo-conductor-resistivo. En el SEV4-S12 el modelo arroja cinco capas de resistividades diferentes el comportamiento es resistivo-conductor-resistivo-conductor-resistivo.

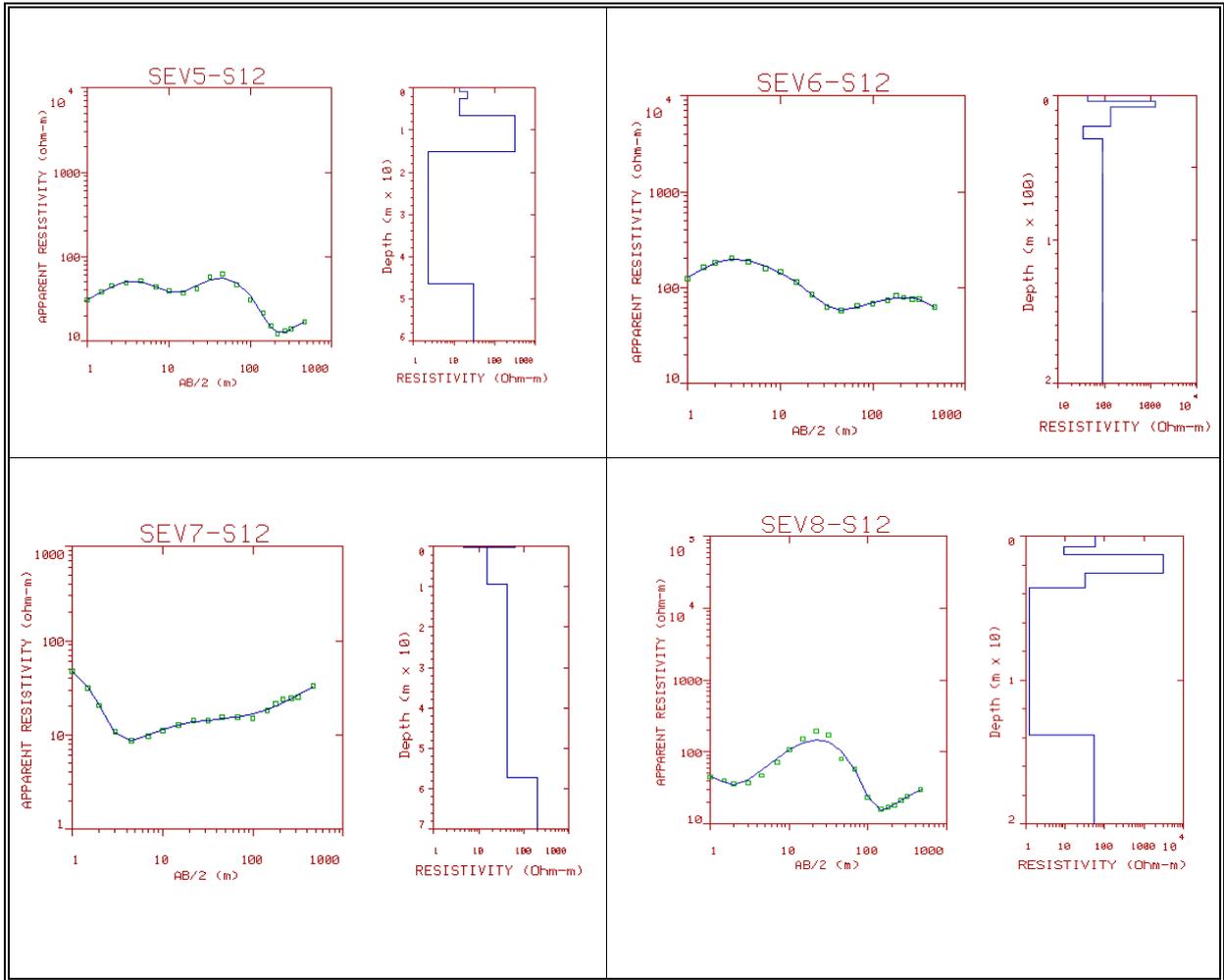


Figura 18. Modelos geológicos y curvas de resistividad de la localidad Tierra Blanca. Sondeo 12.

En el SEV5-S12 tenemos 5 capas con un comportamiento resistivo-conductor-resistivo-conductor-resistivo. En el SEV6-S12 el comportamiento de la curva es conductor-resistivo-conductor-conductor-resistivo, se logran identificar cinco capas. En el SEV7-S12 tenemos un comportamiento del medio que se refleja en la curva de resistividades aparentes como conducto-resistivo-conductor-resistivo-resistivo, las primeras dos capas son despreciables debido a su pequeño tamaño. En el SEV8-S12 se tiene un comportamiento de la curva resistivo-conductor-resistivo-conductor-conductor-resistivo, donde habría que tener cuidado con la capa cuatro, debido a su pequeña longitud.

DISCUSIÓN

IV.1. Mediante el procesamiento de los datos de resistividad obtenidos en Jijiri, Tetapeche y Tierra Blanca, se generaron modelos y perfiles geológicos que hicieron posible distinguir cinco unidades litológicas según la localidad. A través de la interpretación de los modelos y perfiles geológicos se fundamentó el tipo de litología, correlacionando los valores de las resistividades, de esta forma se delimitó también su espesor. También fue posible identificar el nivel freático en cada unos de los lugares mencionados y se obtuvieron los siguientes valores:

Jijiri

La profundidad del nivel freático varía en la localidad Jijiri entre los 29 y 31 m aproximadamente y las resistividades que se asociaron están dentro de los valores de 100 (ohm) * (m) a 130 (ohm) * (m). También se toma en cuenta la información suministrada por CONAGUA de pozos cercanos a la localidad.

Sev	Profundidad del Nivel Freático (m)
1	31 m
2	30 m
3	29 m
4	31 m
5	29 m
6	30m
7	30 m
8	29 m

Tabla VI. Profundidad del nivel freático localidad Jijiri.

Tetapeche

La profundidad del nivel freático varía en la localidad Tetapeche varian entre los 24 y 26 m aproximadamente y las resistividades que se asociaron están dentro de los valores de 100 (ohm) * (m) a 130 (ohm) * (m). También se toma en cuenta la información suministrada por CONAGUA de pozos cercanos a la localidad.

Sev	Profundidad del Nivel Freático (m)
1	26 m
2	24 m
3	24 m
4	24 m
5	25 m
6	26 m
7	24 m
8	25 m

Tabla VII. Profundidad del nivel freático localidad Tetapeche.

Tierra blanca

La profundidad del nivel freático varía en la localidad Tierra Blanca varia entre los 29 y 30 m aproximadamente y las resistividades que se asociaron están dentro de los valores de 100 (ohm) * (m) a 130 (ohm) * (m). También se toma en cuenta la información suministrada por CONAGUA de pozos cercanos a la localidad.

Sev	Profundidad del Nivel Freático (m)
1	29 m
2	30 m
3	29 m
4	30 m
5	29 m
6	28 m
7	28 m
8	30 m

Tabla VIII. Profundidad del nivel freático localidad Tierra Blanca.

IV.2.MODELOS GEOLOGICOS

Mediante el procesamiento de los datos elaborados en campo, utilizando el software Resixp, se encontraron las siguientes capas de lo modelos geológicos. Cuyos valores se muestran en las tablas presentadas a continuación.

SONDEO 11. LOCALIDAD JIJIRI.

SEV 1						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	85.3325	58.1455	156.6447	24.2432	400.45	
Profundidad (m)	0.25	0.8	4	158		
SEV 2						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	57.2662	35.1053	8.9388	86.6305	152.2189	
Profundidad (m)	0.3376	10.0271	47.6753	294.0336		
SEV 3						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	21.2132	38.296	29.5645	160.1755	27.6535	249.2996
SEV 4						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	42	105	10.67	53	36	
Profundidad (m)	2.7	12	22	75		
SEV 5						
Capa	1	2	3	4		
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	29.9.5856	12	74	36		
Profundidad (m)	2	5.75	45			
SEV 6						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	15	130	16	118	11	
Profundidad (m)	0.5727	1.2594	38	163		
SEV 7						
Capa	1	2	3	4		
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	70	12	18	15		
Profundidad (m)	5	44	244			
SEV 8						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	24	180	6	76	14	
Profundidad (m)	1.5	7.3	10	70		

Tabla_IX. Resistividades y espesores reales localidad, Jijiri..

SONDEO14. LOCALIDAD TETAPECHE.

SEV 1						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	13.7414	115.8739	13.9348	97.5307	12.610	186.1199
Profundidad (m)	0.3034	1.0726	4.2776	25	82	
SEV 2						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	61.7321	265.9474	102.7462	196.9285	231.3583	170.3312
Profundidad (m)	0.4655	3.2024	16.8521	35	265	
SEV 3						
Capa	1	2	3	4		
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	105.9987	29.0823	371.22	145.7298		
Profundidad (m)	0.2386	24.0252	25.7476			
SEV 4						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	133.1665	411.1942	24.411	179.9924	109.0595	
Profundidad (m)	1.3113	9.5066	16.4808	49.2619		
SEV 5						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	63	1055	80	51.2434	204	
Profundidad (m)	0.35	3	19	290		
SEV 6						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	42.3337	1000.6332	108.3208	36.3374	92.8536	11.4583
Profundidad (m)	0.2592	0.6413	9.0355	25.2997	280.7881	
SEV 7						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	62.5371	4.5246	15.0361	42.2275	195.9327	
Profundidad (m)	0.2133	0.7354	92.0985	571.5134		
SEV 8						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	67.8968	9.5243	3108.3613	31.8465	1.2656	54.0978
Profundidad (m)	0.2113	0.33029	2.5854	3.5624	13.8579	

Tabla_X. Resistividades y espesores reales localidad, Tetapeche.

SONDEO12. LOCALIDAD TIERRA BLANCA.

SEV 1						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	12.6718	24.9858	363.7642	7.2513	109.5964	
Profundidad (m)	0.1311	5.5415	8.3735	11.6043		
SEV 2						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	28.866	202.803	7.5215	64.6103	7.1711	70.3054
Profundidad (m)	0.6048	1.291	2.9353	29.8211	109.4493	
SEV 3						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	48.6084	13.4552	438.7044	8.9714	17.0866	5.8756
Profundidad (m)	0.332	1.7418	2.7604	5.3752	108.5856	
SEV 4						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	2.8222	480.3558	103.8295	11.9653	248.7395	12.2377
Profundidad (m)	0.1821	0.3948	2.6843	6.5606	15.88059	
SEV 5						
Capa	1	2	3	4	5	6
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	21.1628	90.7523	12.4319	296.4828	2.1007	39.4365
Profundidad (m)	0.5336	2.4619	6.9309	15.9567	46.8415	
SEV 6						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	32.9623	171.2105	449.8832	67.3768	100	
Profundidad (m)	1.3872	4.2231	10.918	203.3664		
SEV 7						
Capa	1	2	3	4		
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	39.1611	370.7149	67.59	152.8639		
Profundidad (m)	0.641	5.2589	160.4247			
SEV 8						
Capa	1	2	3	4	5	
Resistividad ($\Omega\cdot m$)	10.2593	18.9795	41.0181	70.3839	235.7044	
Profundidad (m)	0.3869	2.2354	16.3879	156.0216		

Tabla_XI . Resistividades y espesores reales Localidad, Tierra Blanca.

IV.3. MAPAS DE ISORRESISTIVIDAD

Se formaron mapas de isorresistividad mediante el software Surfer para ver la distribución de resistividades en planta a diferentes profundidades aproximadas con apertura máxima de AB/2 de 465 m

IV.3.1. MAPAS DE ISORRESISTIVIDAD CORRESPONDIENTES A LA LOCALIDAD TIERRA BLANCA. SONDEO 12

Mapas de isorresistividad localidad Tierra Blanca. Sondeo 12.

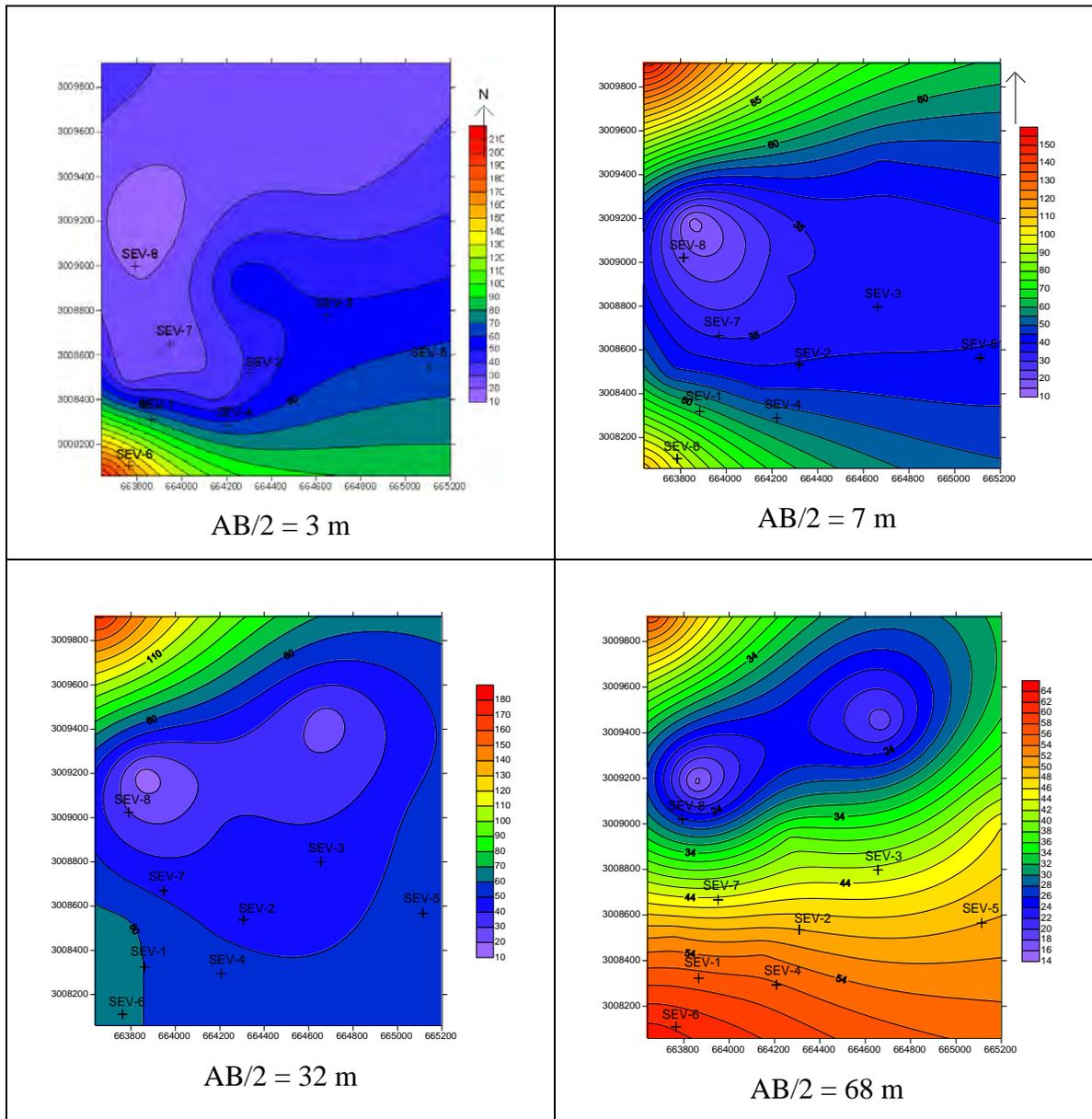


Figura 19. Mapas de isorresistividad con diferente apertura en AB/2

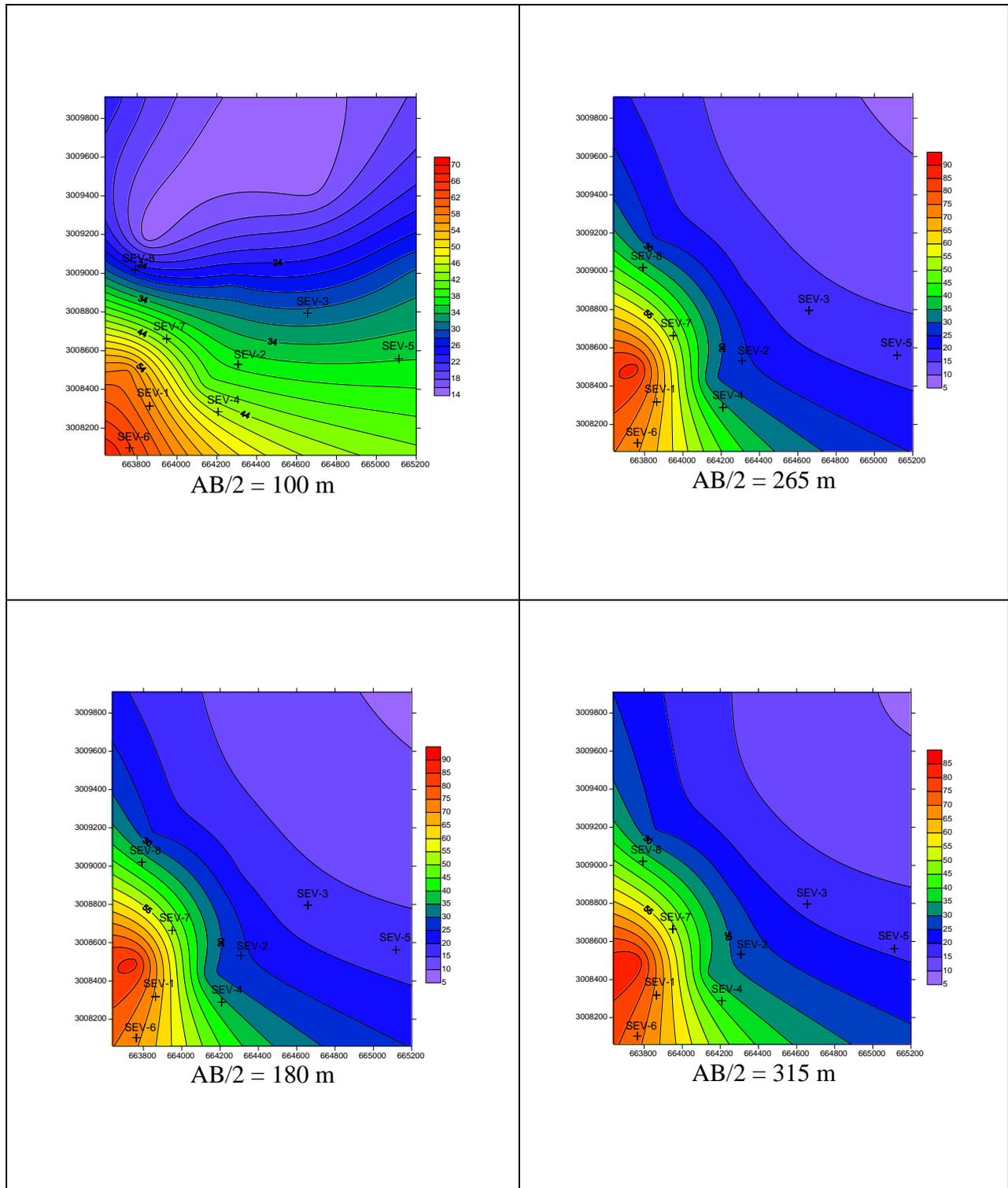


Figura 20. Mapas de isorresistividad con diferente abertura en $AB/2$

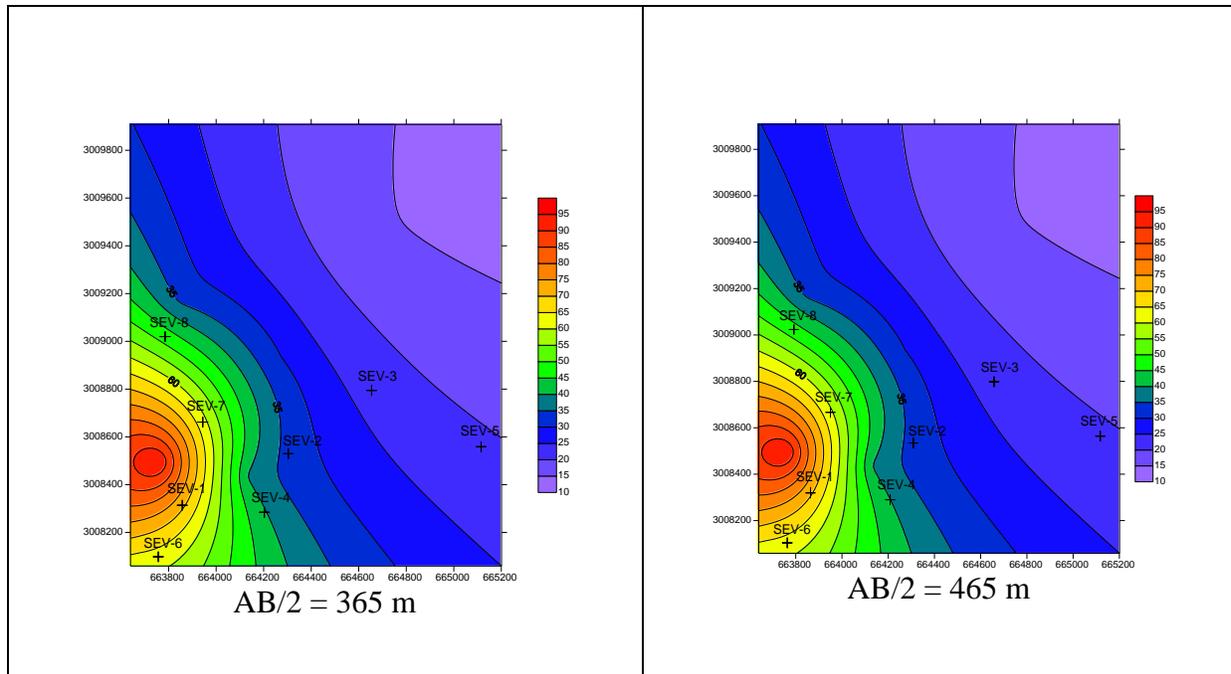


Figura 21. Mapas de isorresistividad con diferente abertura en $AB/2$

Observando la distribución de resistividades en los mapas anteriores, podemos decir que en la abertura $AB/2=3$ las resistividades varían de $10 \Omega m$ hasta $240 \Omega m$, y se alcanza a ver una estructura circular. En $AB/2=15$ los valores de los materiales van de $10 \Omega m$ a $150 \Omega m$ y se sigue viendo una estructura circular. Al descender los valores de resistividad en $AB/32$ a 120 a $40 \Omega m$, se observan dos estructuras circulares. En $AB/2 = 68$ es donde por última vez se distinguen las estructuras como de dos cuerpos circulares.

En el mapa correspondiente a $AB/2 = 100$ se ven los últimos indicios de lo que fueran círculos en los mapas anteriores, y se normaliza la distribución de resistividades hasta la máxima abertura de $AB/2 = 465m$.

IV.3.2. MAPAS DE ISORESISTIVIDAD CORESPONDIENTES A LA LOCALIDAD TETAPECHE. SONDEO 14

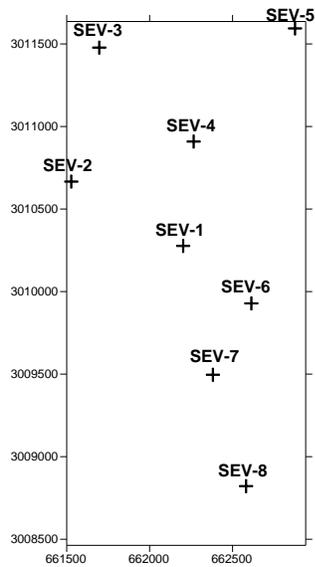


Figura 22. Ubicación de los SEV'S en la localidad Tetapeche

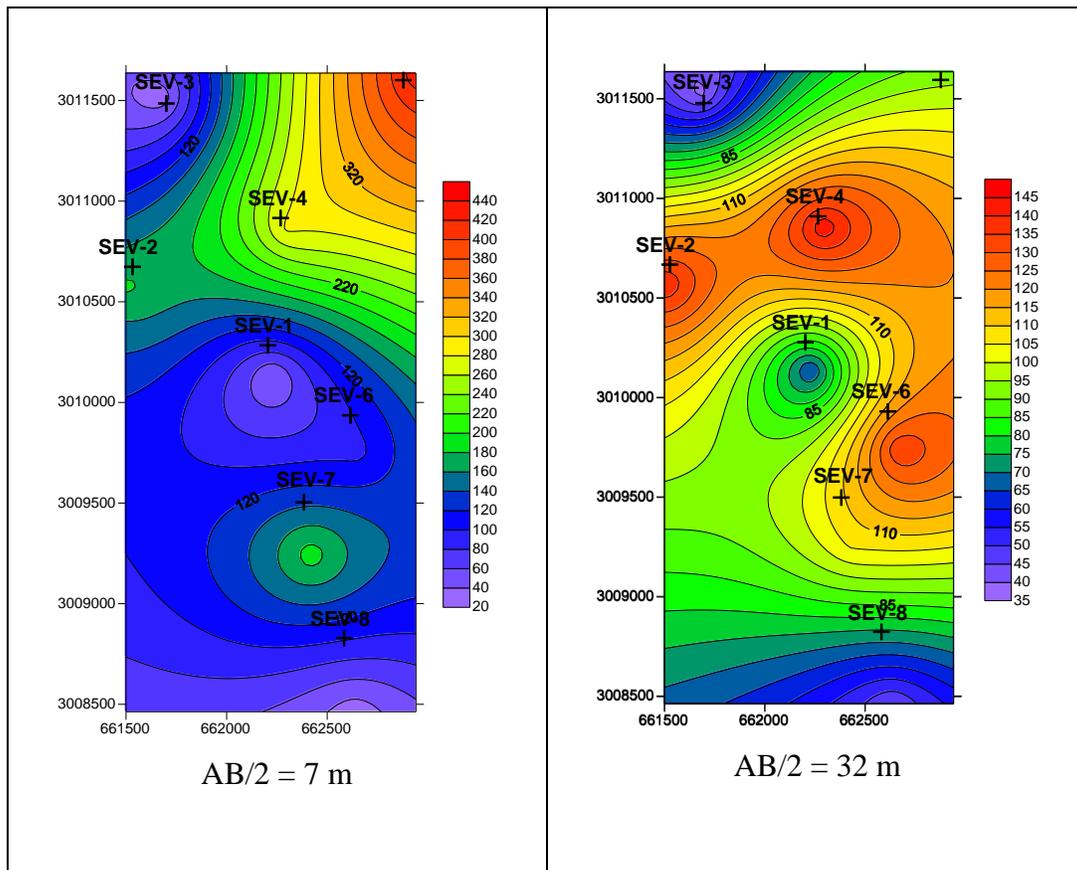


Figura 23. Mapas de isorresistividad con diferentes AB/2

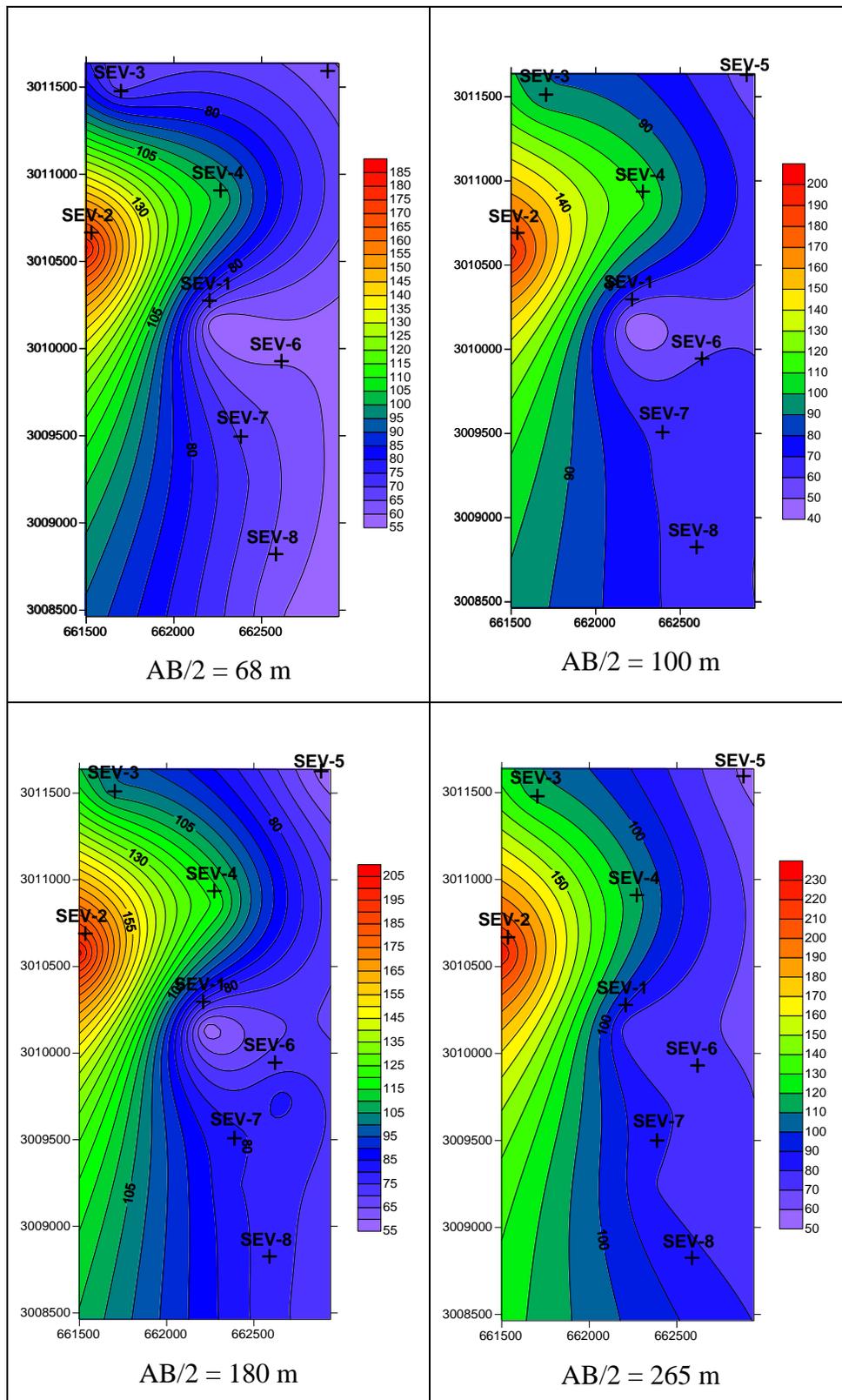


Figura 24. Mapas de isorresistividad con diferentes $AB/2$

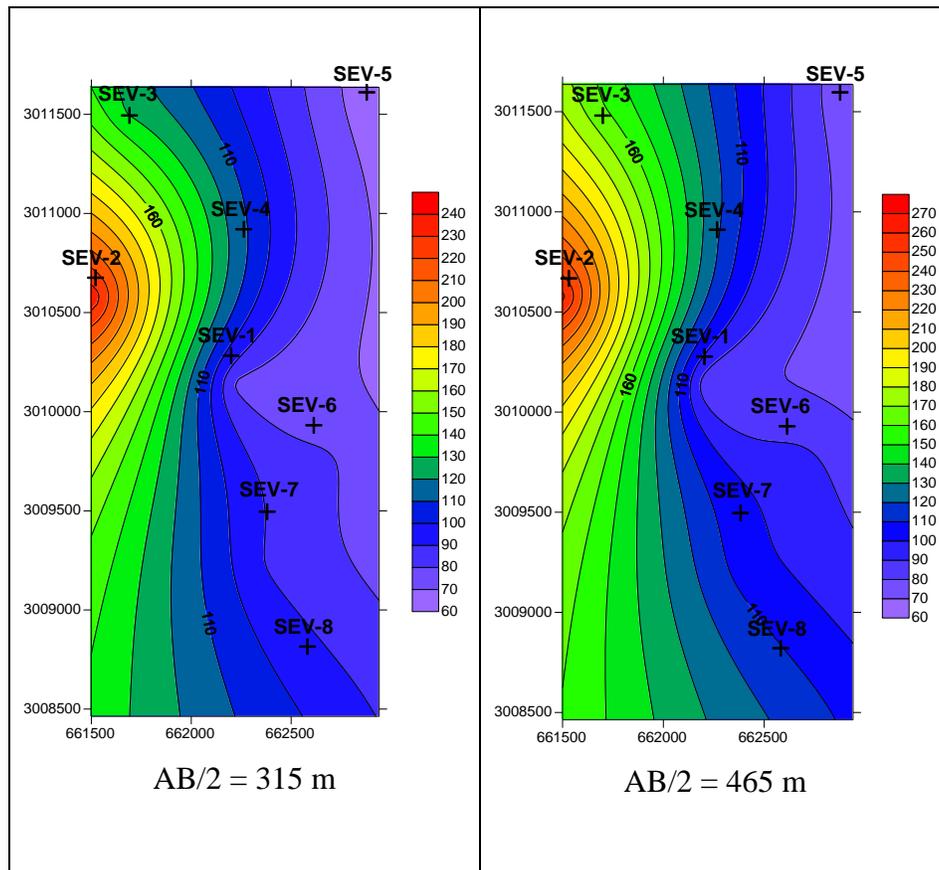


Figura 25. Mapas de isorresistividad con diferentes $AB/2$.

En los mapas correspondientes a la localidad de Tetapeche observamos variaciones fuertes en los primeros dos mapas correspondientes a $AB/2=7$ m y $AB/2=32$ m teniendo valores de resistividad más altos en el mapa concerniente a la abertura $AB/2=32$. Se logran identificar geometrías circulares y elípticas de resistividades, de allí en adelante del $AB/2 = 68$ m hasta el $AB/2= 465$ m la zona se divide marcadamente en dos: en un lado (el lado derecho) tenemos valores de resistividad bajos, aumentando progresivamente hasta llegar al lado opuesto (izquierdo), donde se encontraron los valores correspondientes a las resistividades más altas. En el $AB/2 = 100$ m y en el $AB/2 = 180$ m parece formarse una estructura circular (cilíndrica) de resistividades bajas del orden de 40 a 60 Ω m.

IV.3.3. MAPAS DE ISORESISTIVIDAD CORESPONDIENTES A LA LOCALIDAD JIJIRI. SONDEO 11

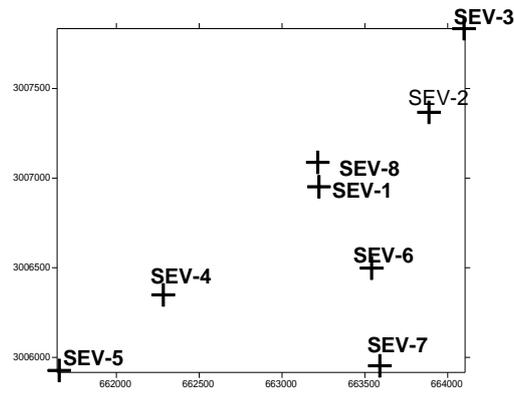


Figura 26. Ubicación de los SEV'S en la localidad Jijiri.

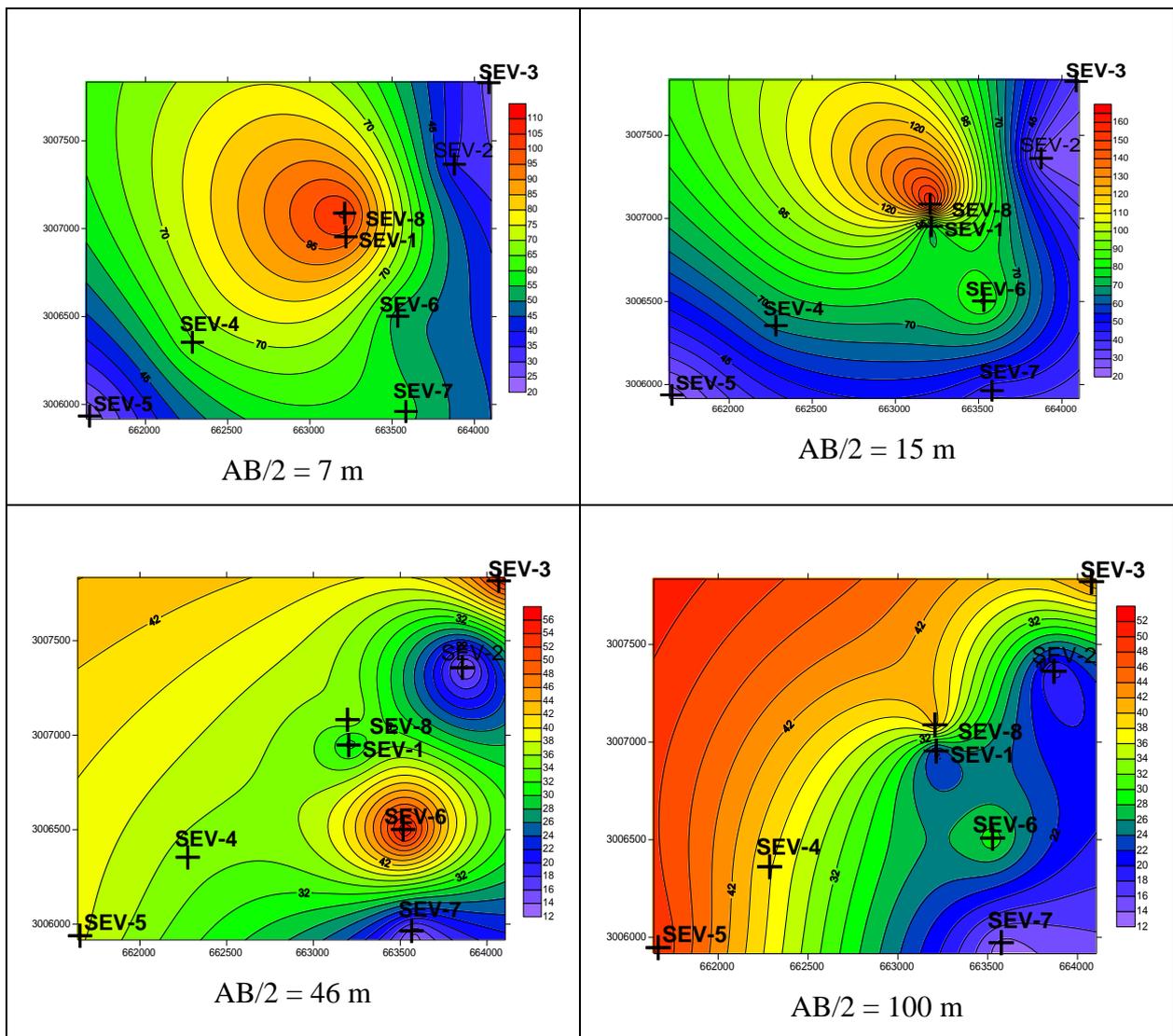


Figura 27. Mapas de isoresistividad con diferentes AB/2

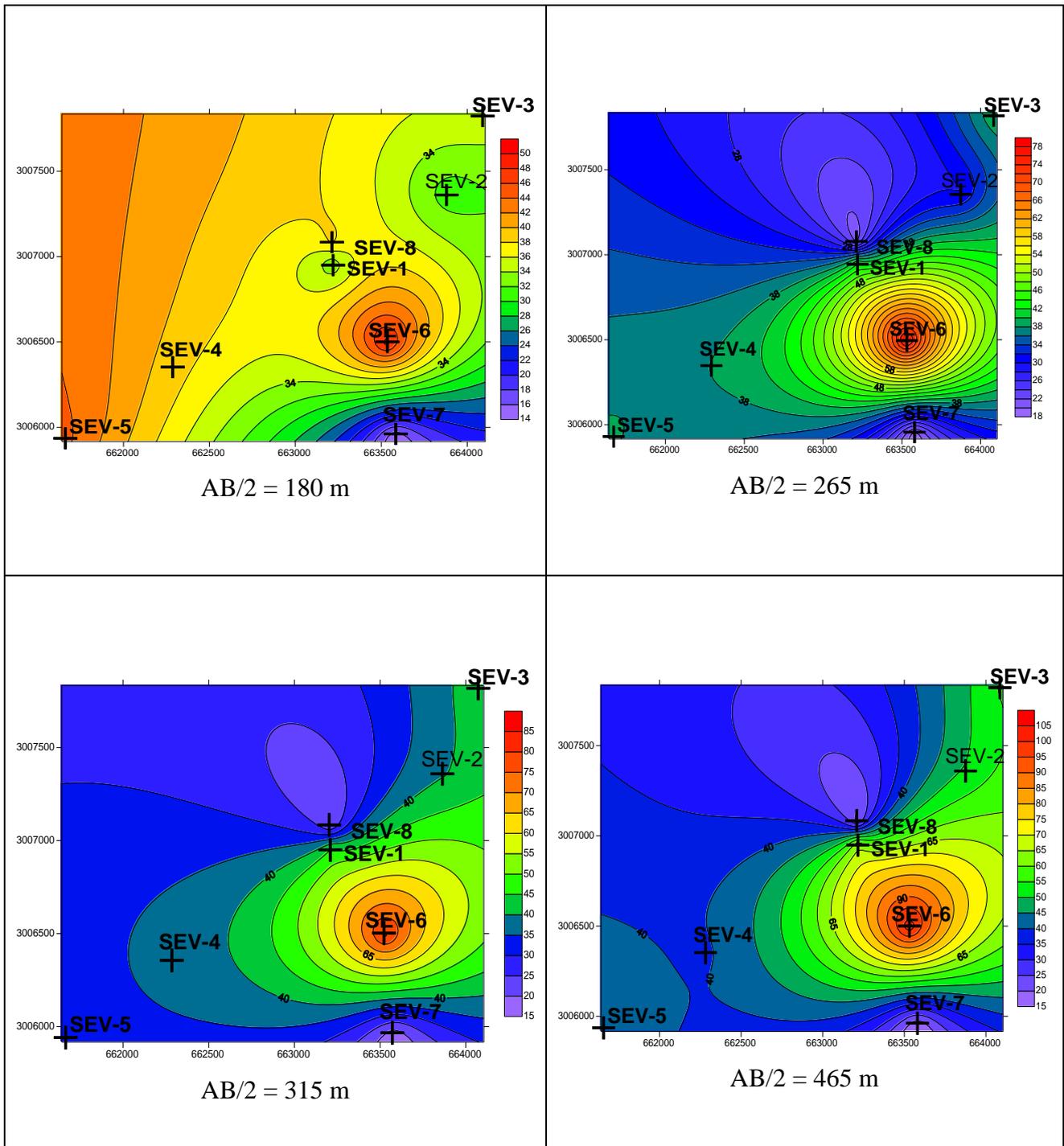


Figura 28. Mapas de isorresistividad con diferentes $AB/2$.

Los mapas obtenidos en la localidad Jijiri muestran una distribución de resistividades en $AB/2 = 7$ m y $AB/2 = 15$ m muy similares mostrando en el centro las resistividades mayores y disminuyendo del centro a los extremos, en la abertura de $AB/2=46$ m se muestra un cambio en la distribución de resistividades manteniéndose así hasta la abertura $AB/2=100$ m una de las principales diferencias es que el contraste de

resistividades se concentra en dos puntos opuestos y muy cercanos. Para la abertura de $AB/2=180$ m el cambio en la imagen es mas marcado y muestra principalmente una concentración de resistividades. De la abertura $AB/2=265$ m pasando por $AB/2=315$ m y llegando a la abertura final de $AB/2=465$ m la distribución se mantiene estable y muestra una concentración de resistividades altas en el centro disminuyendo hacia los extremos similar a la distribución en las aberturas iniciales.

Se presentan las siguientes dos columnas estratigráficas, correspondientes a un estudio previo de la zona de estudio en Navojoa, con el fin de correlacionar los perfiles y las columnas estratigráficas obtenidas con las columnas estratigráficas ya existentes.

CORTE LITOLÓGICO NORIA LOCALIDAD LOS COCOS, NAVOJOA

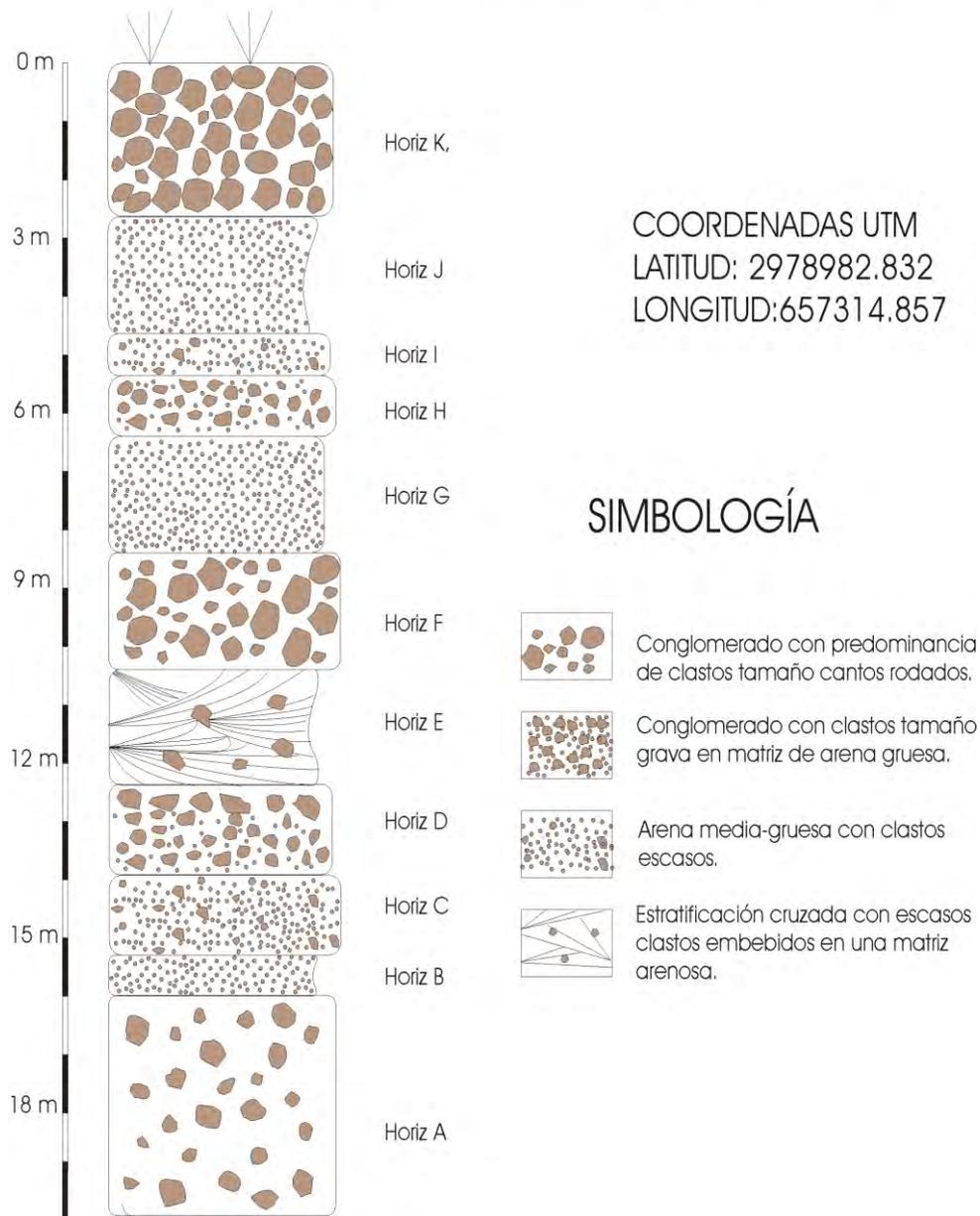


Figura 29. Columna litológica correspondiente a la localidad de Los Cocos, Navojoa.

CORTE LITOLÓGICO BANCO DE MATERIAL LOCALIDAD LOS POLLOS, HUATABAMPO.

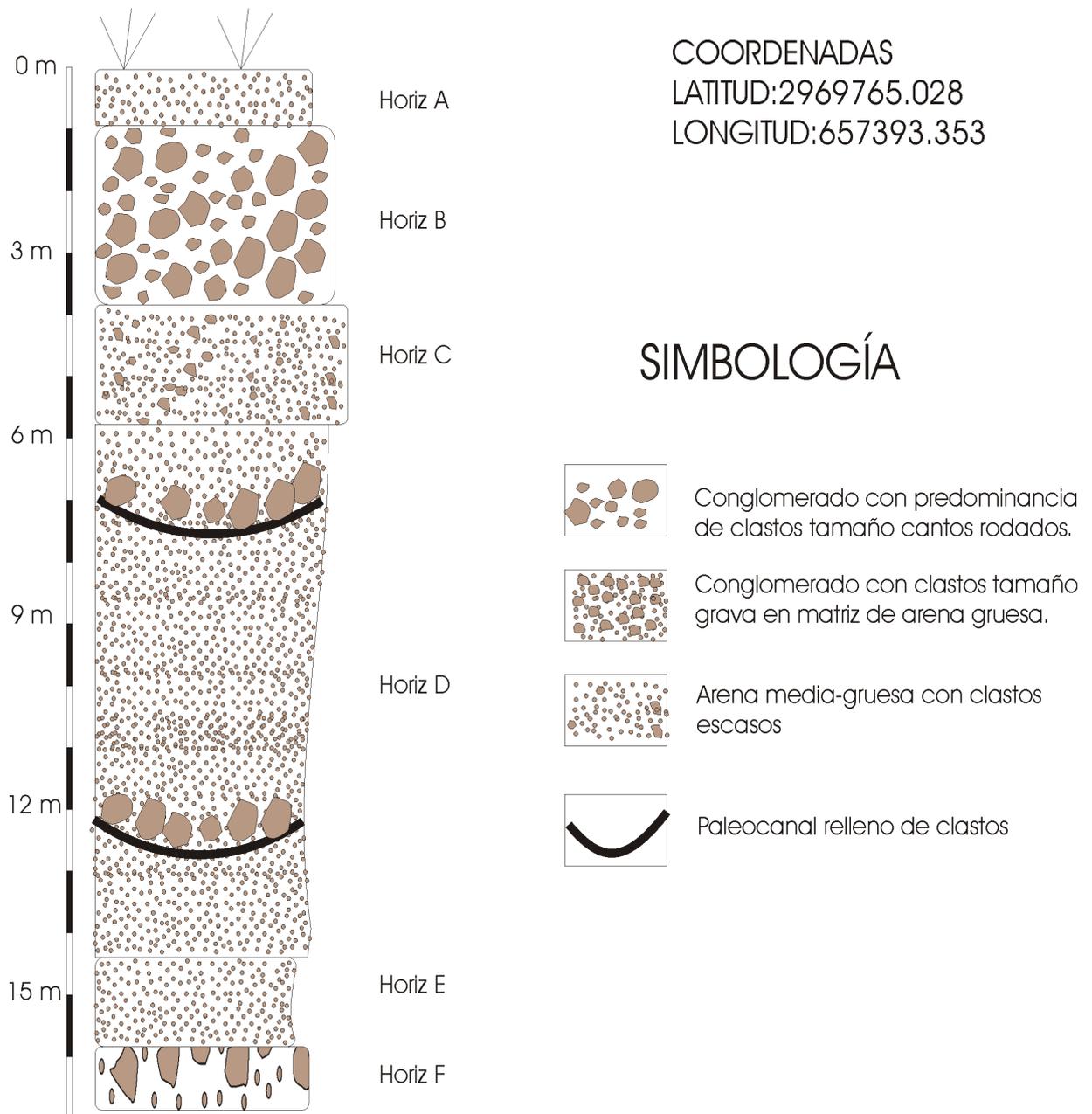


Figura 30. Columna litológica correspondiente a la localidad de Los Pollos, Huatabampo.

IV.4. PERFILES

Se generaron tres perfiles geoelectricos correlacionados entre sí, para construir un modelo geológico fundamentado en las resistividades litológicas del subsuelo, que permitiera explicar las características geológicas de la zona de estudio. Estos tres perfiles son los cortes A A', BB', CC', que pueden observarse en la figura 10 y 11. Para construir el modelo se procesaron, con el software Resixp, los datos obtenidos en campo. Esto permitió conocer, en teoría, las capas que componen el subsuelo. Una vez conocidas las capas, utilizando el software Surfer, se generó un perfil, que es un corte vertical; éste se obtuvo acomodando los modelos geológicos subyacentes en los cortes AA', BB' y CC'.

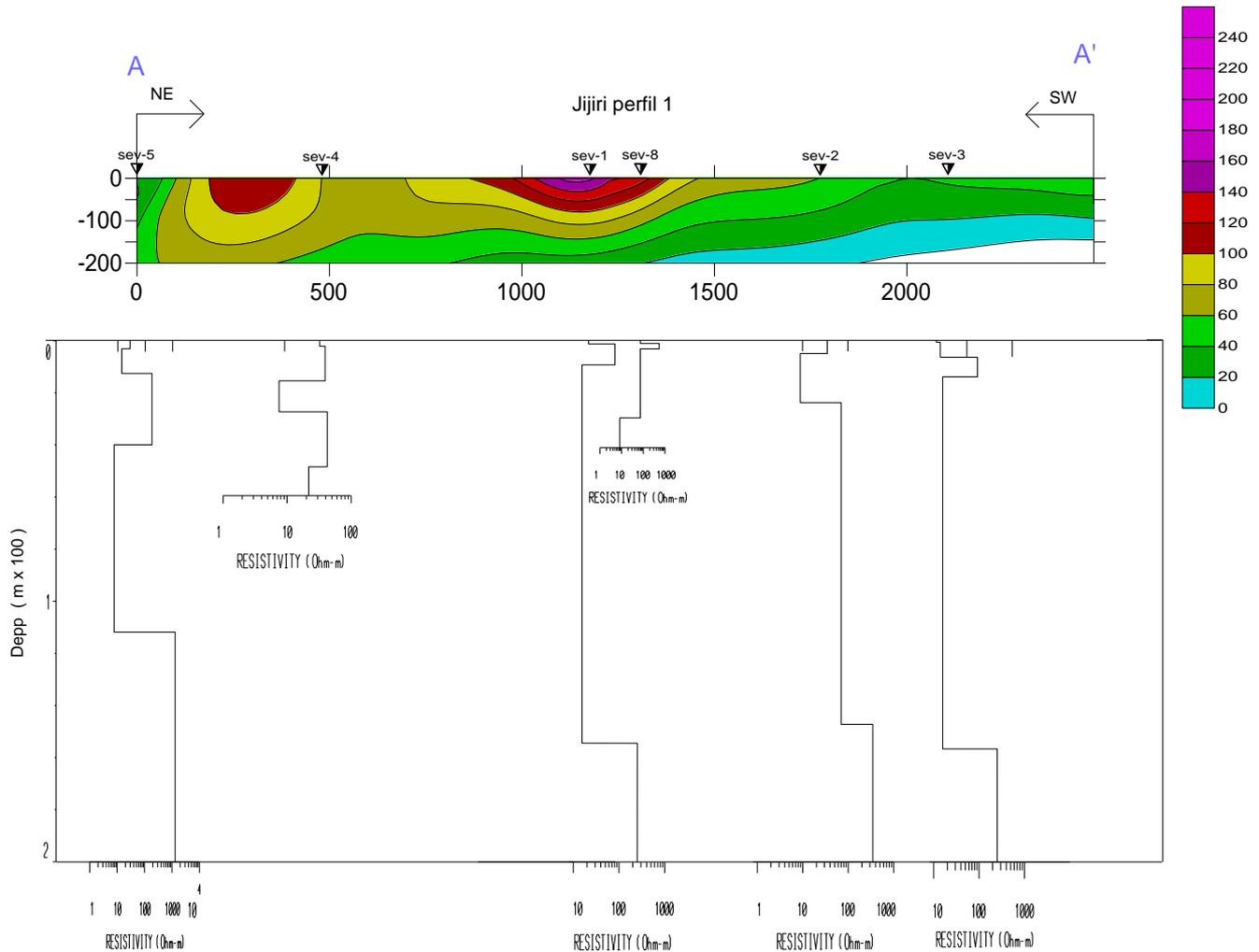


Figura 31. Perfil geoelectrico de la localidad de Jijiri.

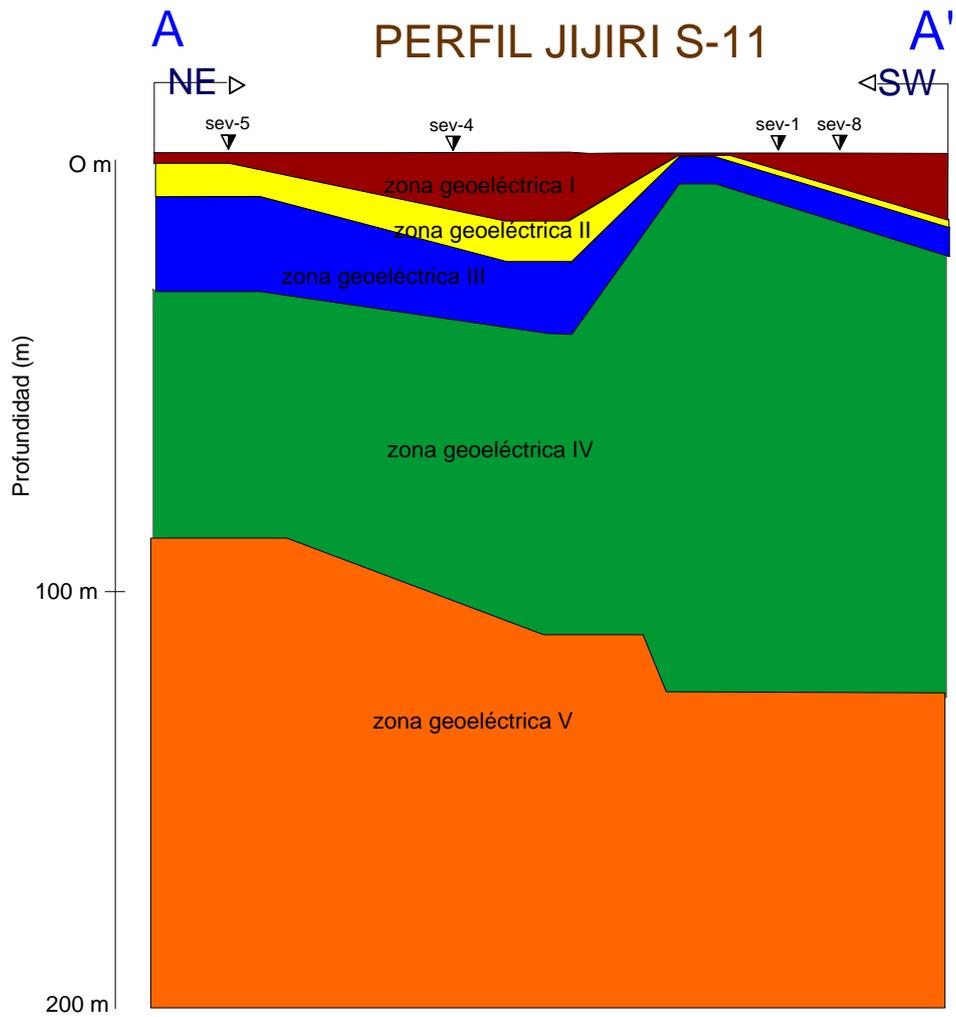


Figura 32. Corte de zonas geoelectricas de la localidad de Jijiri.

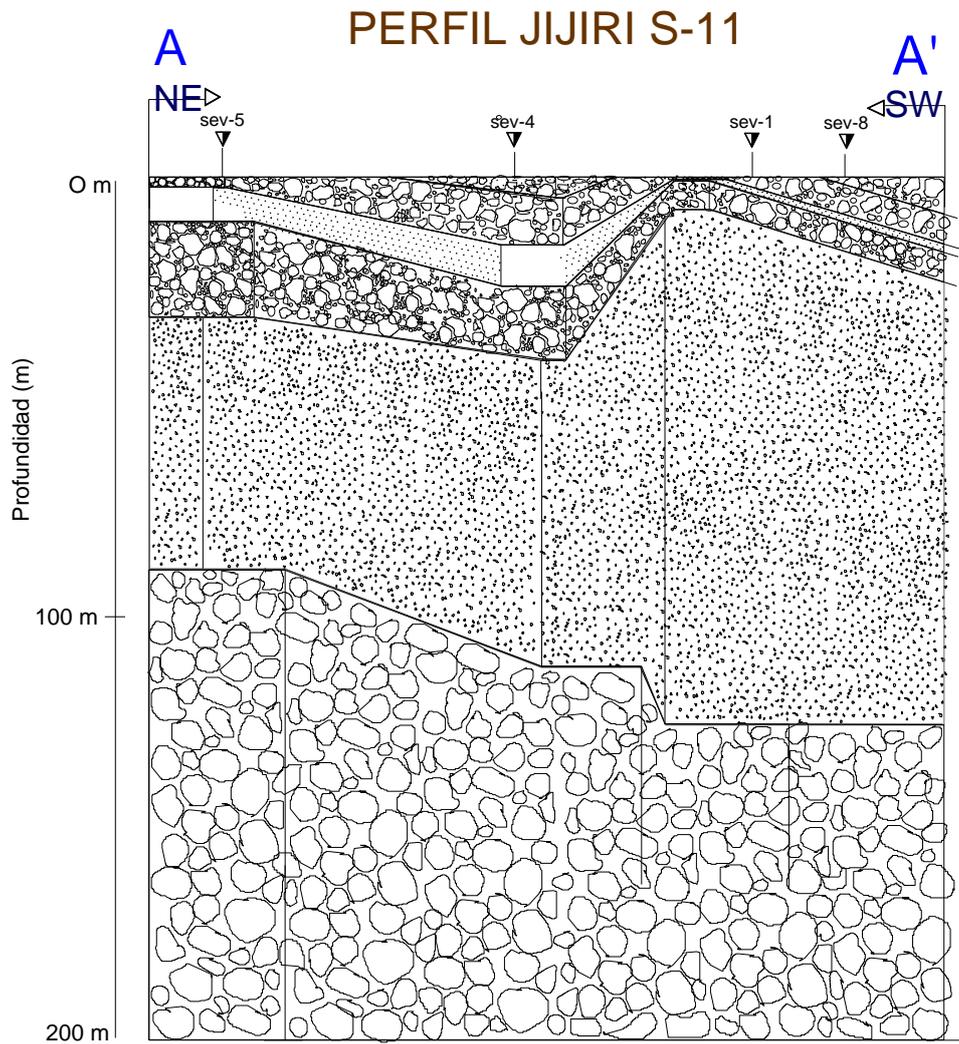


Figura 34. Corte litológico de la localidad de Jijiri.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA CORRESPONDIENTE A LA LOCALIDAD JIJIRI

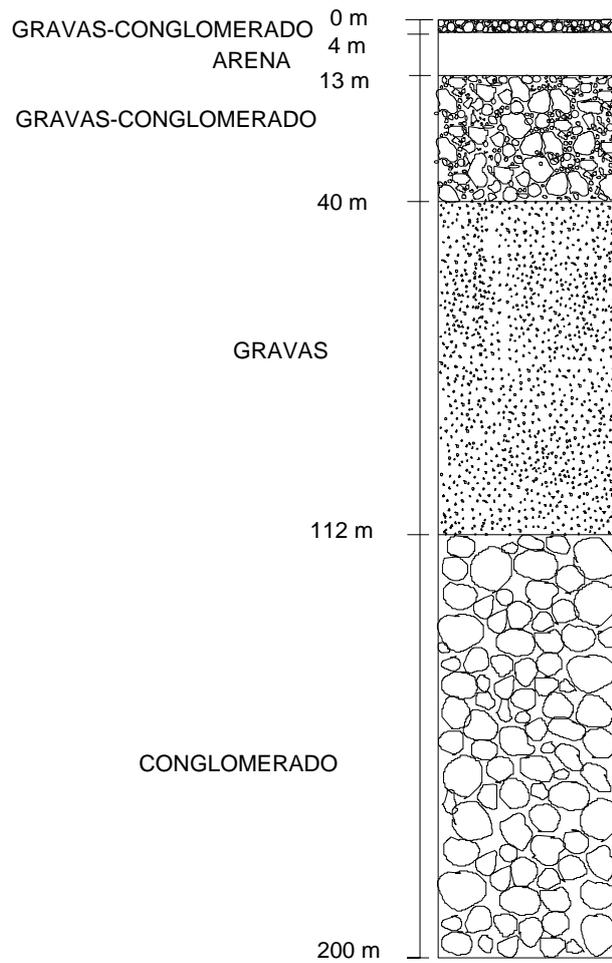


Figura 35. Columna estratigráfica de la localidad de Jijiri.

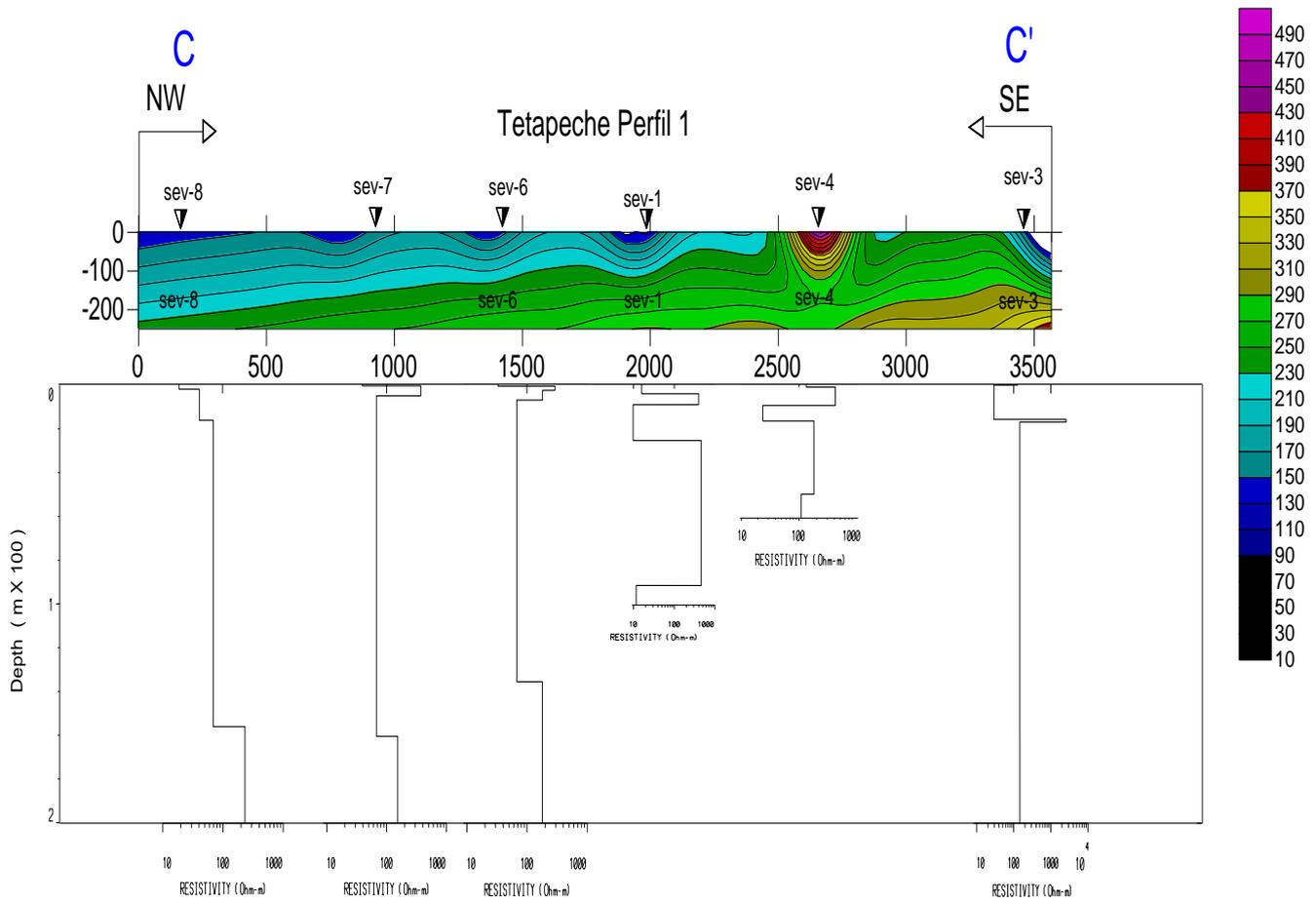


Figura 36. Perfil geoelectrico de la localidad de Tetapeche.

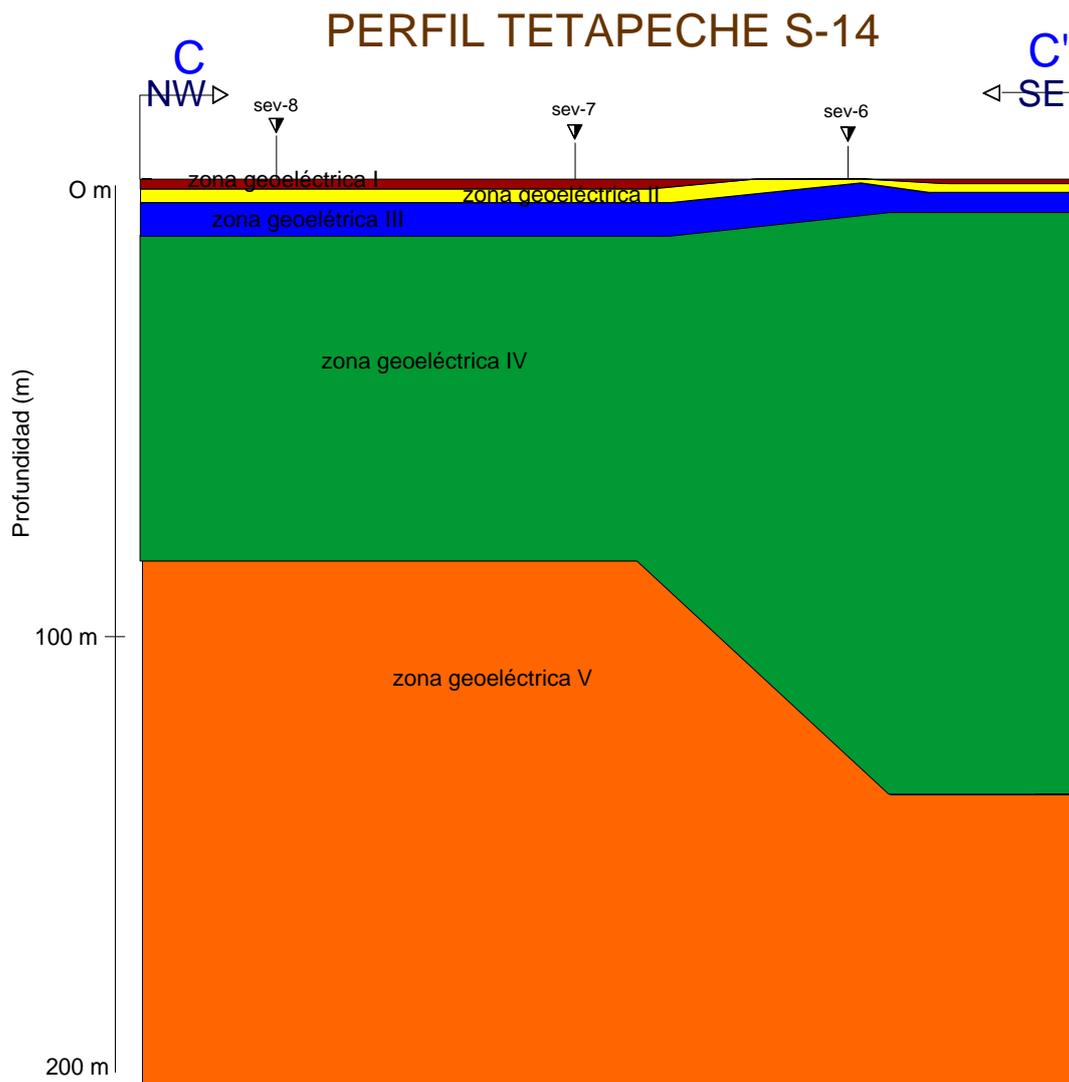


Figura 37. Corte de zonas geoelectricas de la localidad de Tetapeche.

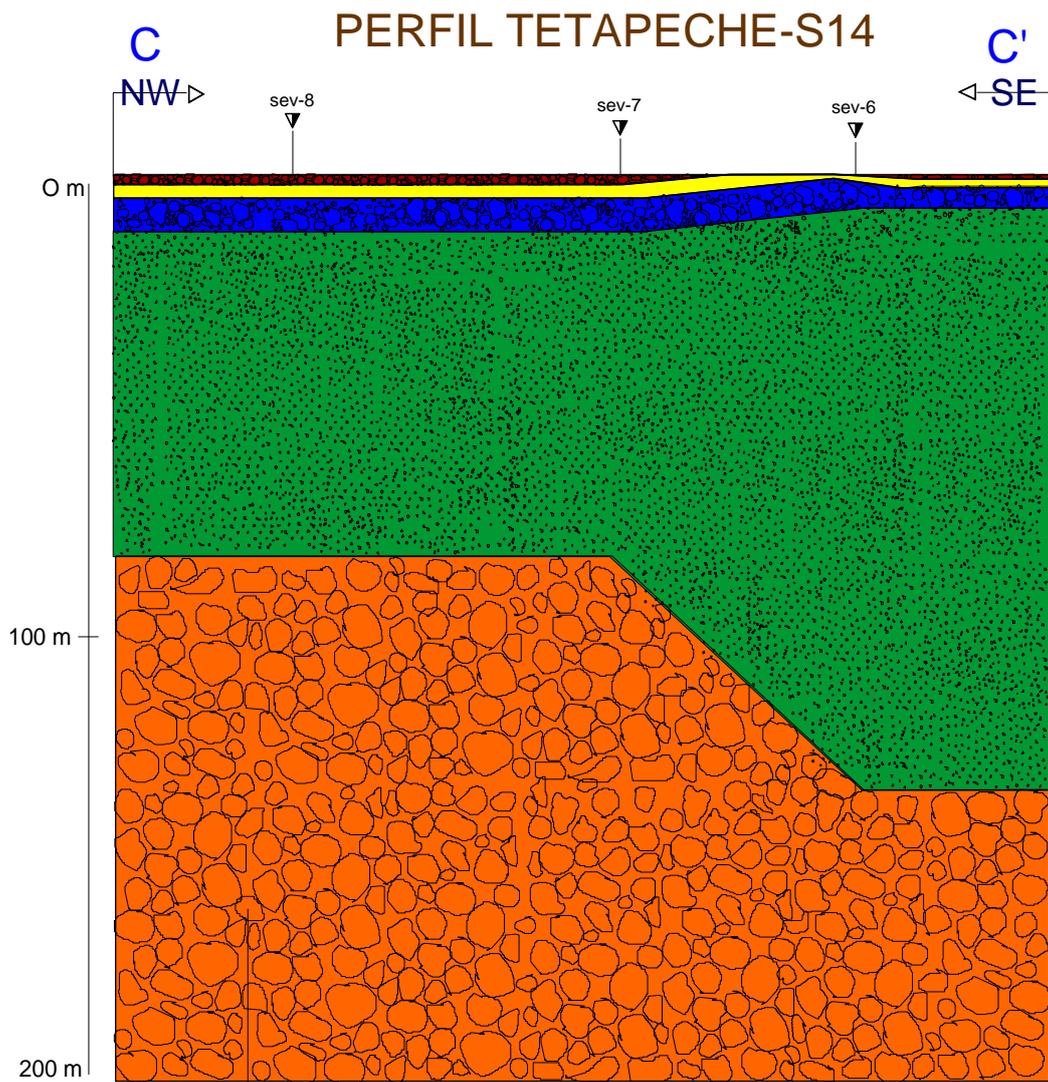


Figura 38. Correlación de las resistividades y la litología de la localidad de Tetapeche.

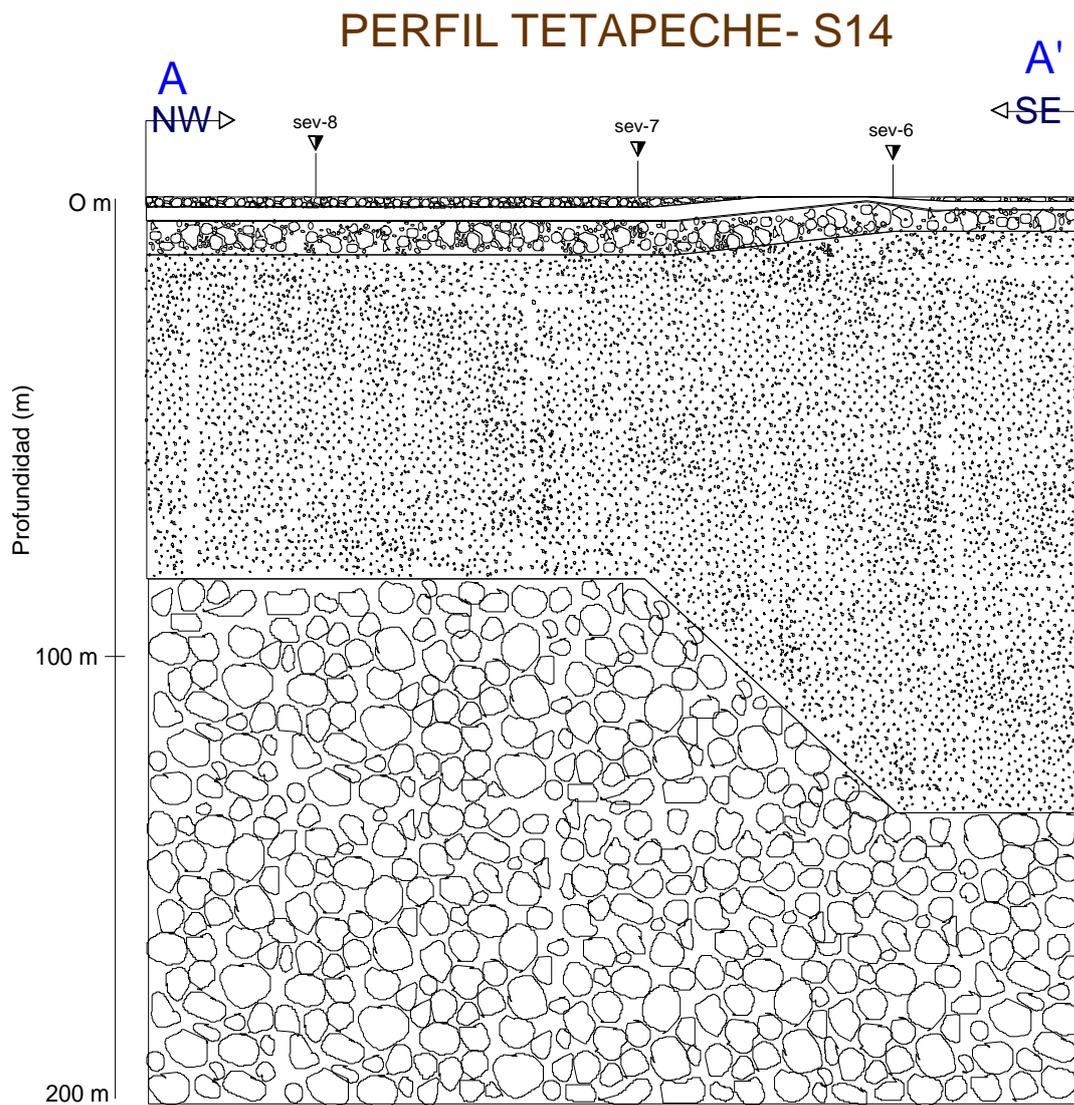


Figura 39. Corte litológico de la localidad de Tetapeche

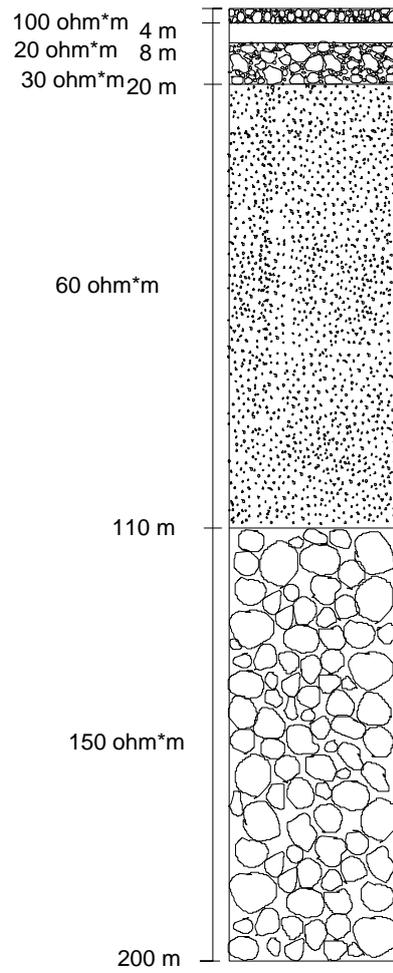


Figura 40. Columna estratigráfica de la localidad de Tetapeche.

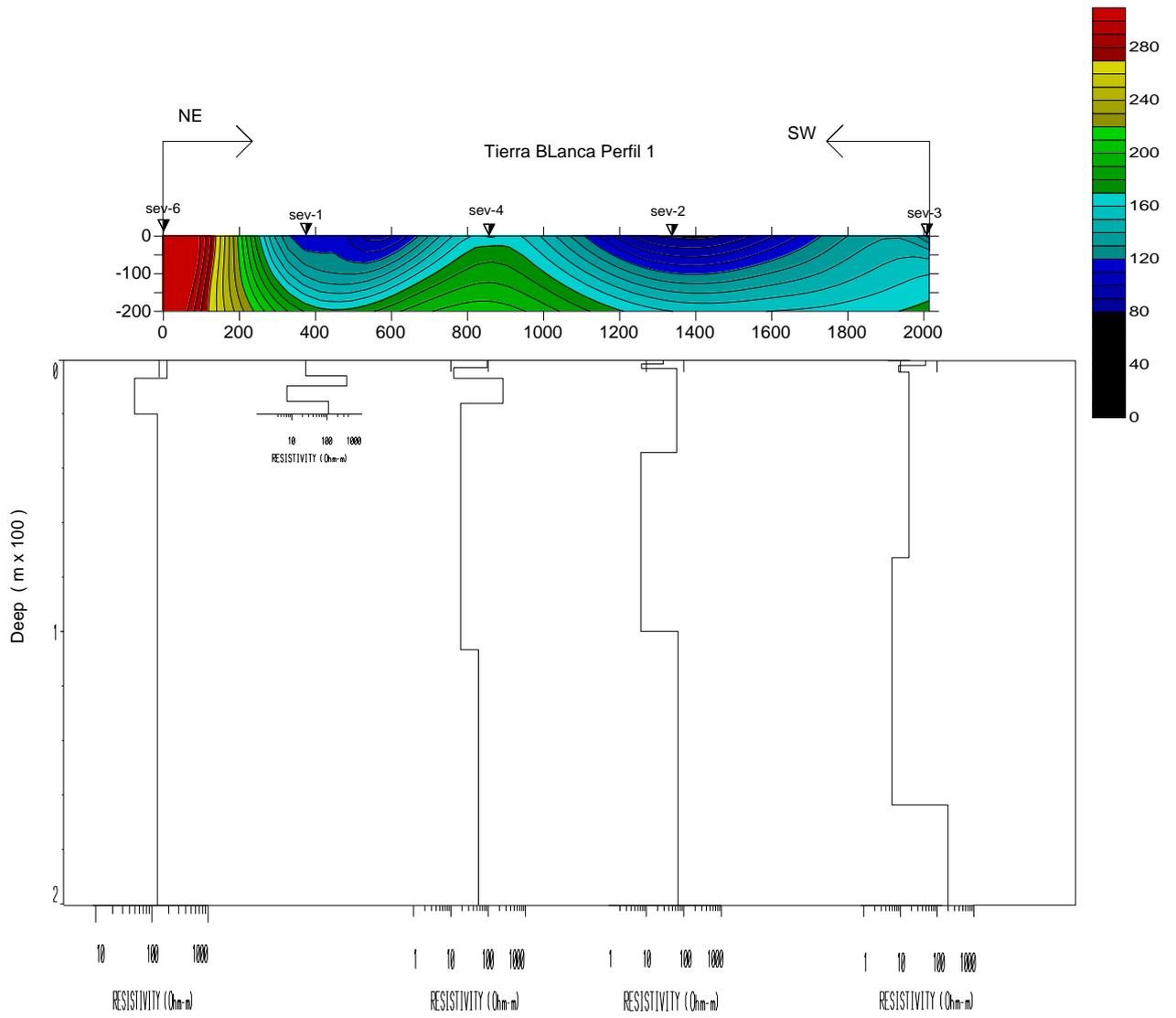


Figura 41. Perfil geoelectrico de la localidad de Tierra Blanca.

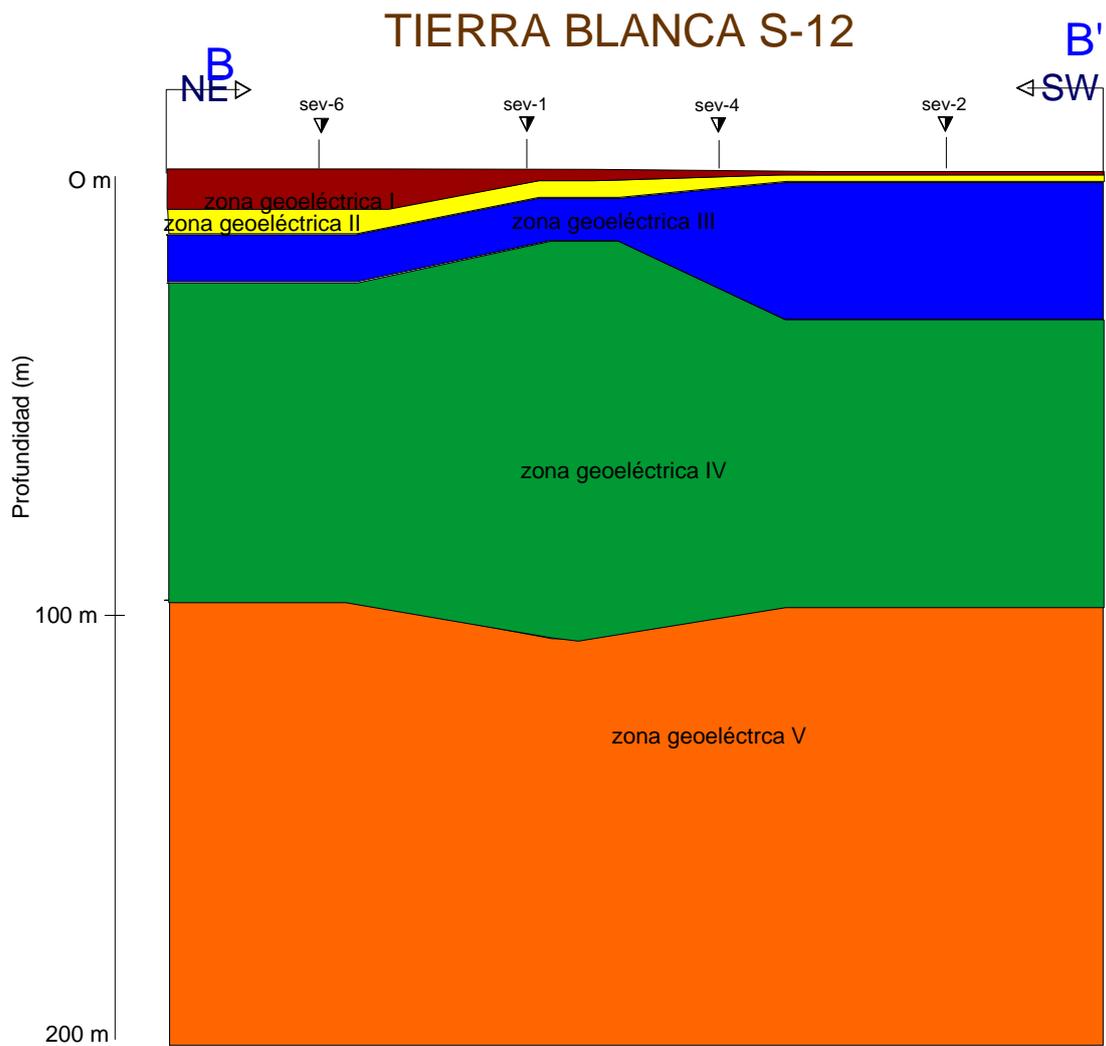


Figura 42. Corte de zonas geoelectricas de la localidad de Tierra Blanca.

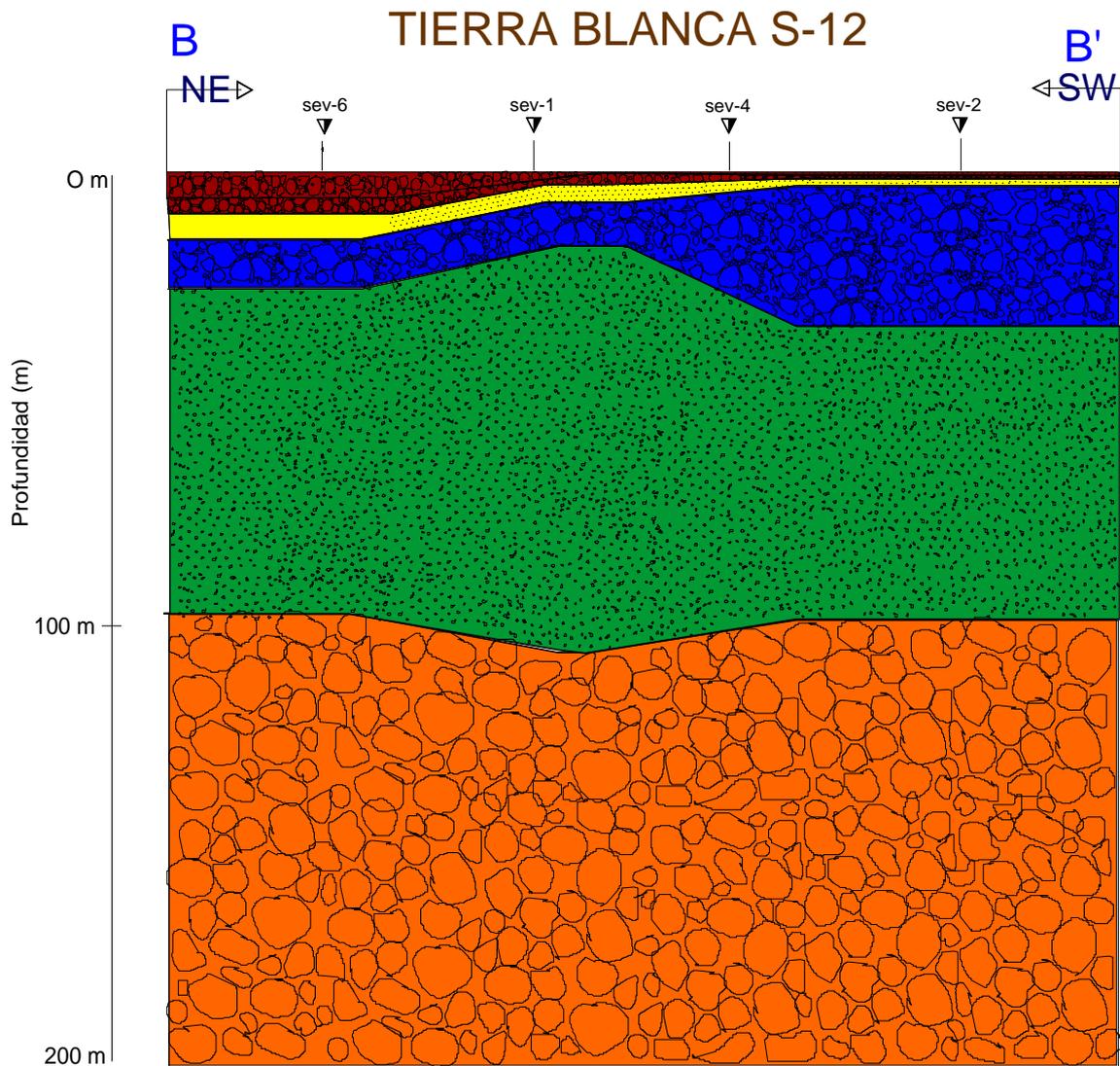


Figura 43. Correlación de las resistividades y la litología de la localidad de Tierra Blanca.

TIERRA BLANCA S-12

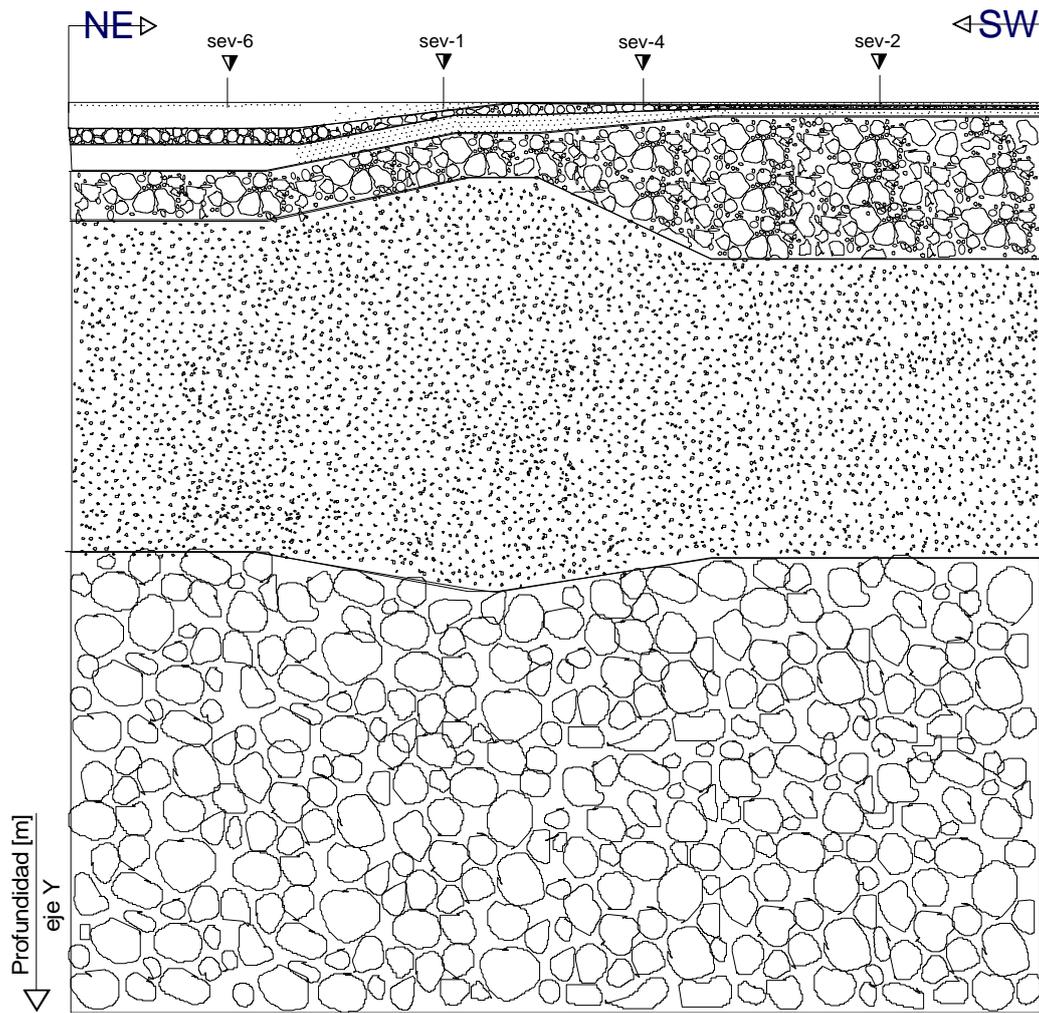


Figura 44. Corte litológico de la localidad de Tierra Blanca.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA CORRESPONDIENTE A LA LOCALIDAD TIERRA BLANCA

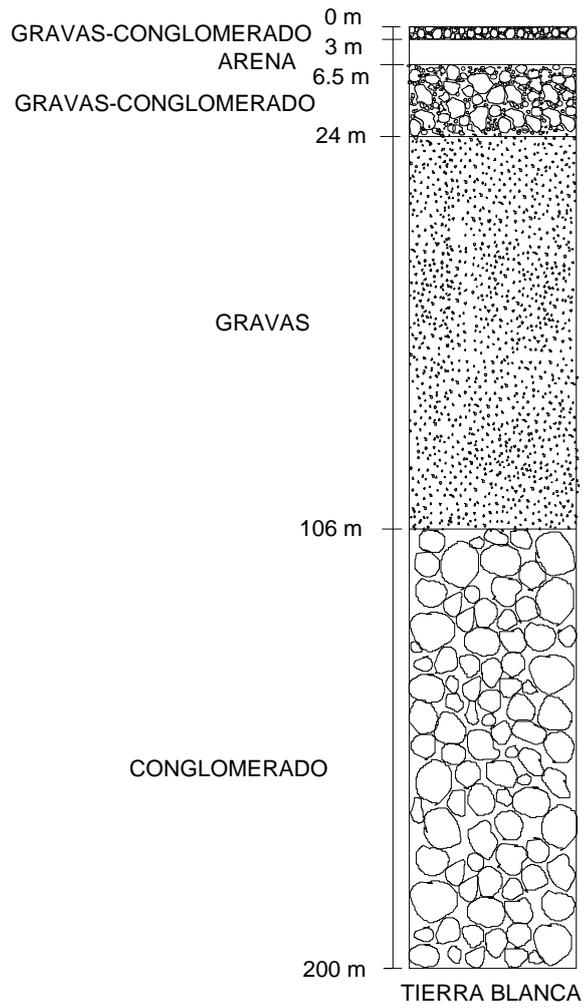
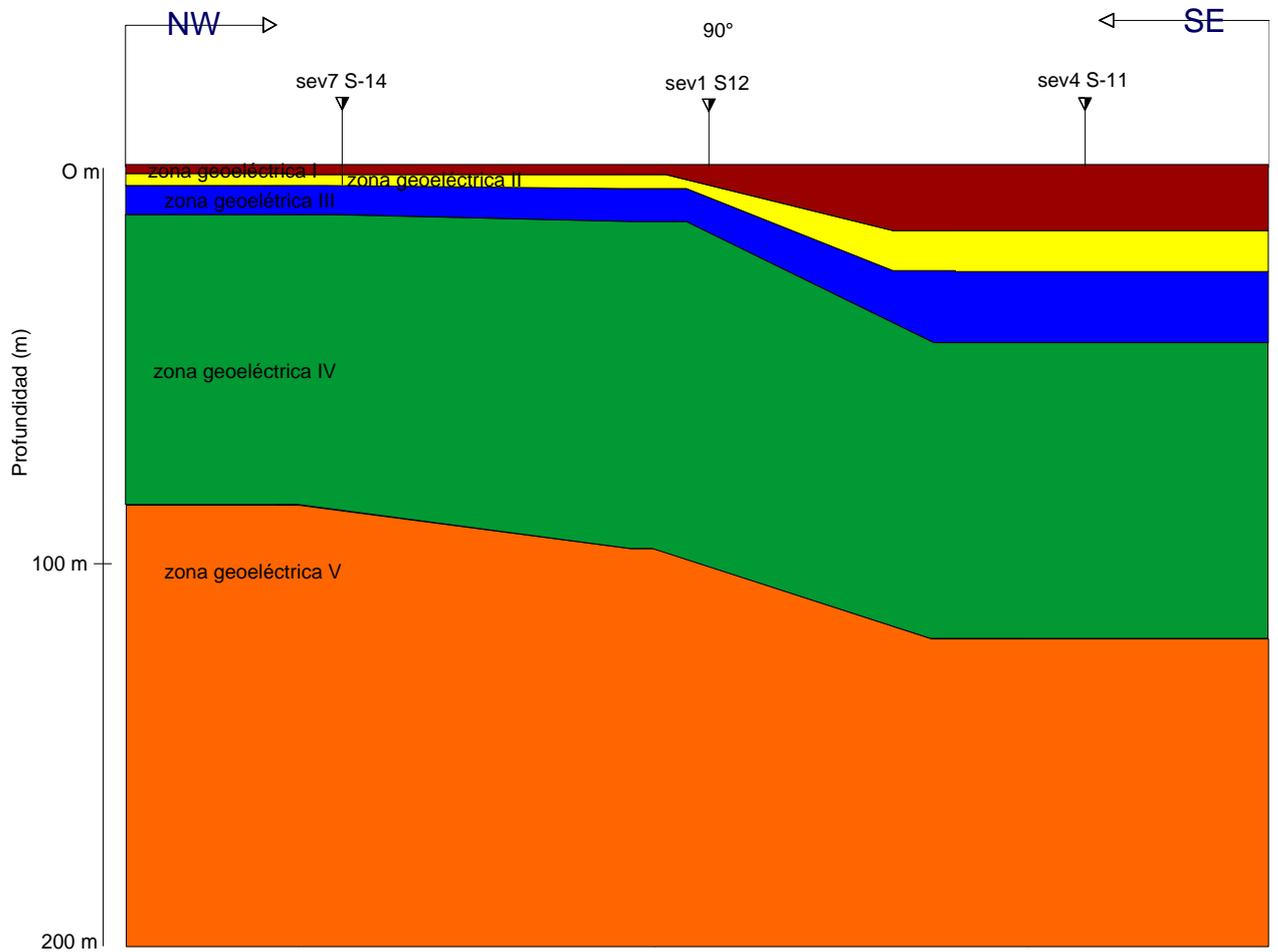


Figura 45. Columna estratigráfica de la localidad de Tierra Blanca

Perfil que incluye a modelos de los tres diferentes cortes geoelectricos generados por sondeos



40-130 ohm*m – gravas-conglomerado
 20-30 ohm*m – arenas
 30-140 ohm*m – gravas-conglomerado
 20-70 ohm*m – gravas
 110*200 ohm*m – conglomerados

Figura 46. Corte de zonas geoelectricas de las localidades de Jijiri, Tetapeche y Tierra Blanca (J, T, TB), utilizando un SEV's de cada localidad.

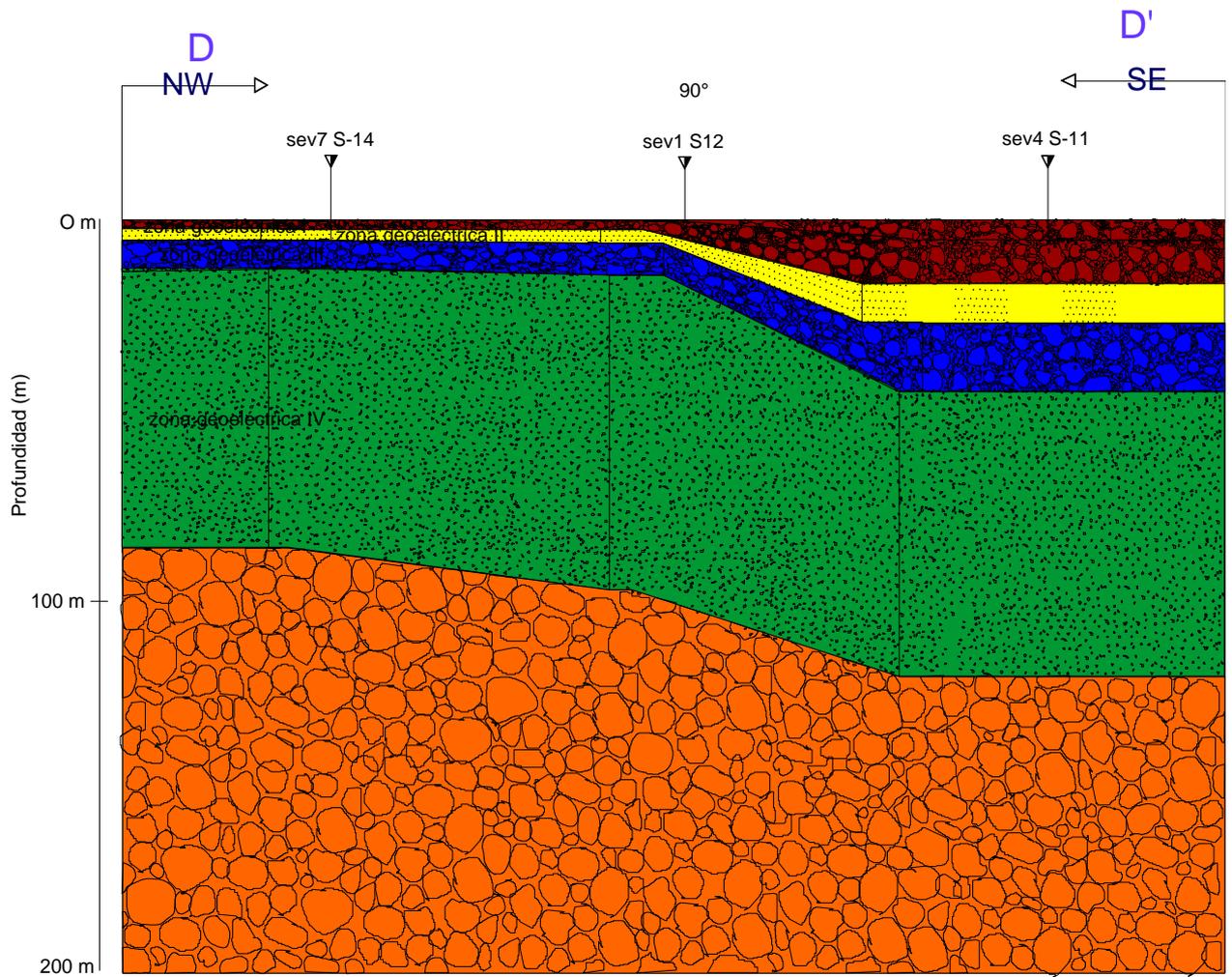


Figura 47. Correlación de las resistividades y la litología de las localidades de Jijiri, Tetapeche y Tierra Blanca.

- 40-130 ohm*m - gravas-conglomerado
- 20-30 ohm*m - arenas
- 30-140 ohm*m - gravas-conglomerado
- 20-70 ohm*m - gravas
- 110*200 ohm*m - conglomerados

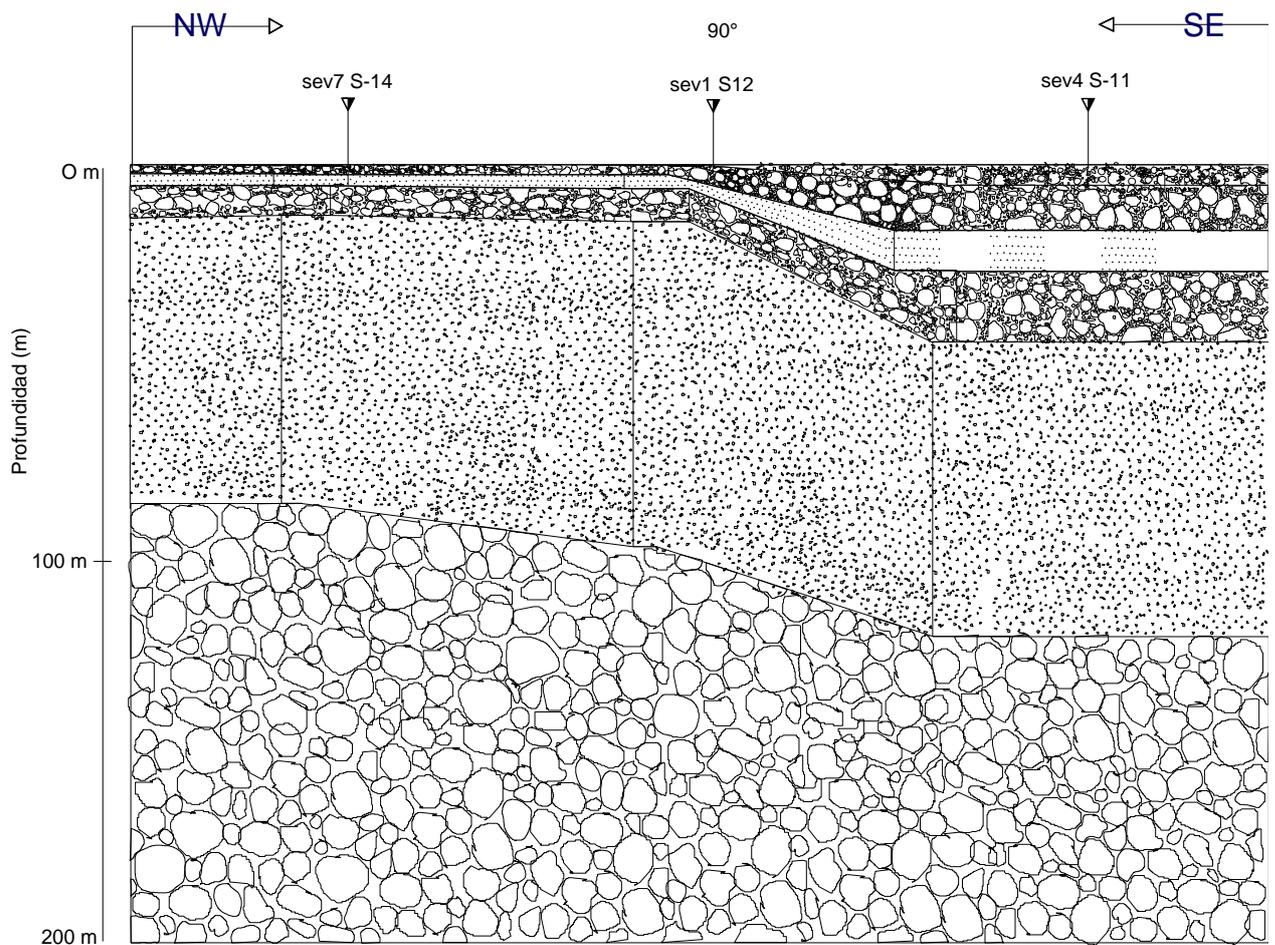
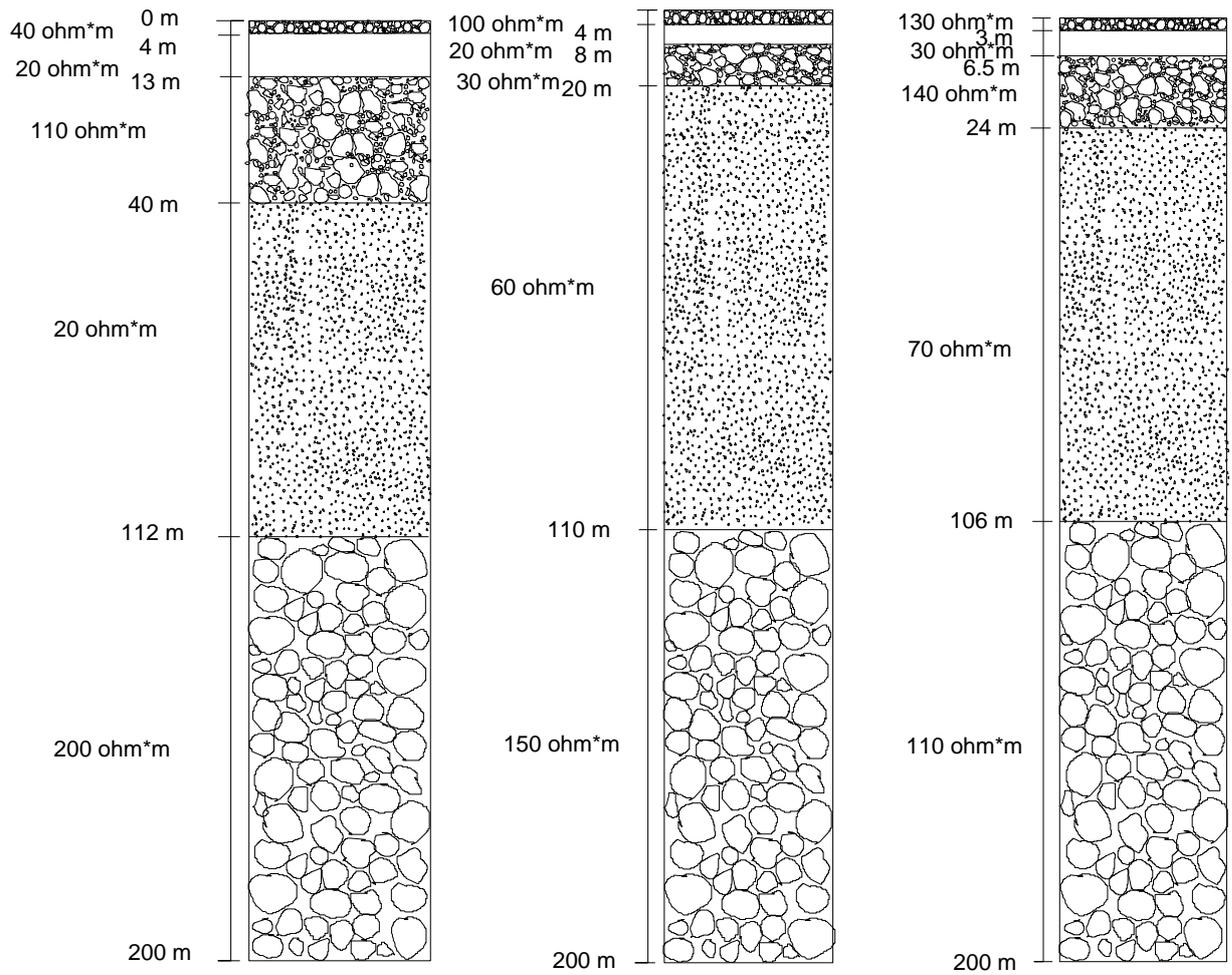


Figura 48. Corte litológico de las localidades de Jijiri, Tetapeche y Tierra Blanca

- 40-130 ohm*m - gravas-conglomerado
- 20-30 ohm*m - arenas
- 30-140 ohm*m - gravas-conglomerado
- 20-70 ohm*m - gravas
- 110*200 ohm*m - conglomerados

De cada uno de los perfiles que se obtuvieron se generó la columna estratigráfica correspondiente a esa localidad o corte. La correlación de estas columnas permitió conocer la geología del subsuelo correspondiente a cada localidad. Así mismo fue posible observar el nivel estático del manto acuífero. A continuación se presentan las conclusiones generales de este estudio.



40-130 ohm*m - gravas-conglomerado
 20-30 ohm*m - arenas
 30-140 ohm*m - gravas-conglomerado
 20-70 ohm*m - gravas
 110*200 ohm*m - conglomerados

Figura 49. Columnas estratigráficas de las localidades de Jijiri, Tetapeche y Tierra Blanca.

CONCLUSIONES.

Con base a los estudios geoelectricos realizados, que corresponden a 24 SEV'S , se propone un modelo geológico, donde se encontraron principalmente cinco capas (estratos) que corresponden a cinco unidades litológicas diferentes, por medio de su resistividad correlacionan con gravas, areniscas y conglomerados.

La primera capa cuenta con un espesor aproximado de 4 m, con resistividades que varían de 40 ohm*m hasta 130 ohm* m correlacionándose con un estrato compuesto por gravas y conglomerados. La segunda tiene un espesor aproximado de 6 m de espesor, con resistividades que varían entre los 20 ohm*m a los 30 ohm*m correspondiendo litologicamente estas resistividades a un estrato compuesto por arenas. A la tercera capa corresponde un espesor de aproximadamente 22 m, con resistividades de 30 ohm*m hasta 140 ohm*m correlacionando con un estrato compuesto por gravas y conglomerados. El cuarto estrato tiene un espesor aproximado de 85 m y sus resistividades tienen los valores de 20 ohm*m a 70 ohm*m correlacionando esta capa de resistividad con gravas. Por último, la quinta capa posee un espesor indeterminado, pero mayor a 100 m, con resistividades de 110 ohm*m a 200 ohm*m correlacionándose con un conglomerado. Además, se encontraron resistividades más altas que las ya mencionadas, como de 400 ohm*m y de 900 ohm*m, pero éstas están localizadas en áreas muy pequeñas y puntuales, siendo casos especiales y escasos, pero dignos de mencionarse. Estas últimas resistividades se pueden justificar debido a la existencia de lentes de material más resistivo, como micas de biotita -reportadas en informes geológicos- en los conglomerados.

El nivel freático encontrado varía entre los 24 y 33 metros, y no se encontraron resistividades concernientes a contaminación salina. Esta información ha sido confirmada por estudios previos (Ismael Herrera, 1981) lo que permite concluir que es posible la extracción de agua para uso agrícola, doméstico e industrial.

En lo que respecta a este estudio es importante señalar que resultó muy provechoso el uso de la prospección eléctrica para identificar los diferentes estratos, ya que facilitó el mapeo del subsuelo de la zona de estudio. Los perfiles e imágenes obtenidas con esta metodología cuentan con gran detalle para visualizar la litología del subsuelo a nivel somero (de 0 a 150m). La identificación de intrusiones salinas a través de sus resistividades características, es otro de los elementos importantes que permite el uso de SEV's. Este método ha sido ampliamente utilizado, de modo que es sencillo encontrar

herramientas de apoyo como artículos científicos, libros, etc., que facilitan el uso de la prospección eléctrica y el análisis de los datos obtenidos por esta vía.

Considero que es necesario para hacer mejor uso de la prospección eléctrica apoyarse en estudios geológicos y geofísicos previos que permitan elaborar una aproximación más certera al modelo geológico propuesto para determinada área.

Utilizar la prospección eléctrica a la par de otro tipo de prospección, como la electromagnética, para verificar los datos obtenidos, aumenta la confiabilidad de los modelos elaborados. Me parece necesario, además, utilizar la información de pozos que contengan la descripción litológica de la perforación –si es que existen- para lograr resultados óptimos.

BIBLIOGRAFIA

Aprovechamiento sustentable del agua, 2004-2009. Secretaría de agricultura, ganadería, recursos hidráulicos, pesca y acuicultura/ Comisión estatal del agua, Mexico, 2004. Obtenido en: <http://www.sonora.gob.mx/biblioteca/documentos/pmp/agua.pdf>

BLAKELY, Richard J. *Potential theory in gravity and magnetic applications*, Cambridge University Press, E.U., 1996.

GRIFFITHS, D.H. y KING, R.F. *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos*, Pergamon Press. España. 1972.

Geophysical Prospecting, Vol. 19. Tomo, 3-4, 1971. 769-775

GRANT F. S. y WEST, G. F. *Interpretation Theory in applied Geophysics*, Editorial McGraw-hill Book Company, E.U., 1965. Págs. 403-407.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, *Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Valle del Mayo, Estado de Sonora.* Subdirección general técnica, Gerencia de aguas subterráneas, Subgerencia de evaluación y modelación hidrogeológica, México, 2002.

Estudio geohidrológico de los acuíferos en el valle del río mayo- Sonora, PLANIMEX, Ingenieros consultores S.A., México, 1970.

LOWRIE, William, *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge University Press, E.U., 1997.

Monografía geológico- minera del Estado de Sonora, José Cárdenas Vargas, coord., Consejo de recursos minerales, Subsecretaría de minas e industria básica, México, 1992.

ORELLANA, E., *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*, Editorial Paraninfo, Madrid, España, 1972.

_____ *Prospección Geoeléctrica por campos variables*, Editorial Paraninfo, Madrid, España 1974.

SHERIFF, Robert E. *Geophysical Methods*, Prentice Hall. E.U., 1989.

TELFORD, W. M., L. P. Geldart y R. E. Sheriff, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.