

03060

10  
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOLOGÍA  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA RESISTIVIDAD  
APARENTE EN FUNCIÓN DE LA SATURACIÓN Y  
CALIDAD DE AGUA PARA MEDIOS POROSOS: LOS CASOS  
DE LOS VALLES DE HERMOSILLO Y EL YAQUI, SONORA

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
(AGUAS SUBTERRÁNEAS)

P R E S E N T A

MARÍA ISABEL SIMÓN VELÁZQUEZ

Ciudad Universitaria

Mayo, 1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

273061 i



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**Análisis de sensibilidad en la resistividad aparente en función de la saturación y calidad de agua para medios porosos: los casos de los valles de Hermosillo y el Yaqui, Sonora.**

Dedicatoria	i
Indice	ii
Resumen	
I.- Introducción	1
II.- Metodología	4
a) Orden esquemático para la obtención de los resultados	6
III.- Bases teóricas	9
a) Factores que afectan la resistividad del subsuelo	9
1) Porosidad	10
2) Saturación	13
3) Calidad del agua	15
b) Sondeo Eléctrico Vertical	18
1) Resistividad aparente	18
2) Potencial eléctrico en la superficie	18
3) Filtrado digital	21
IV.- Marco hidrogeológico de las zonas de estudio	25
a) Valle de Hermosillo	25
1) Área de estudio	25
2) Geología	26
3) Hidrogeología	28
b) Valle del Yaqui	31
1) Área de estudio	31
2) Geología	31
3) Hidrogeología	33

V.- Resultados y discusión	36
a) Modelación e interpretación	36
b) Análisis de sensibilidad para la saturación	49
c) Análisis de sensibilidad para la calidad del agua	57
VI.- Conclusiones	69
Referencias.	71
Reconocimientos	77

## Resumen

Sonora es uno de los estados con mayor producción agrícola de México, a pesar de encontrarse en una zona árida. Los valles de Hermosillo y del Yaqui son los distritos de riego más importantes en este estado y mientras que en el valle de Hermosillo la producción se basa completamente en la explotación de sus acuíferos, en el valle del Yaqui se aprovecha además el agua superficial. Cuando la explotación de los acuíferos se hace de manera desmedida da lugar a procesos como la salinización de suelos e intrusión de agua marina.

En este estudio se consideraron los resultados de la modelación de 101 sondeos eléctricos verticales distribuidos sobre dos mallas más o menos regulares y muestras de agua de más de 100 pozos en estas dos regiones.

La estimación de las porosidades resultó en una variabilidad más amplia de este parámetro en el valle de Hermosillo, siendo el rango de porosidad de 7 a 31% en comparación de 7 a 19% para el caso del valle del Yaqui.

El análisis de saturación demostró mayor sensibilidad respecto a este parámetro en las curvas de resistividad del valle de Hermosillo. Las saturaciones que se obtuvieron para los mejores ajustes de las curvas sintéticas a las de campo resultaron en valores del 10 al 50% para el acuífero del valle del Yaqui y del 20 al 65% para el acuífero del valle de Hermosillo.

La sensibilidad respecto a la calidad del agua resultó ser mayor para las curvas de resistividad del valle del Yaqui. En este caso se consideró una dependencia de la calidad del agua con la profundidad.

## I. Introducción

Muchos de los acuíferos que se explotan en México para obtener el agua necesaria en las diversas actividades agrícolas, industriales o consumo diario son acuíferos costeros. La creciente necesidad de agua ha llevado a la explotación de zonas que, por su situación geográfica, cuentan con climas semiáridos o áridos. Tal es el caso del Estado de Sonora donde dos de sus más importantes distritos de riego son zonas consideradas áridas, antiguos deltas de ríos y cuya fuente principal de agua lo constituye la explotación de sus acuíferos, como en el caso del valle de Hermosillo, o sistemas de riego a partir del agua de presas, como en el caso del valle del Yaqui (INEGI, 1993).

Las características del acuífero del valle de Hermosillo son muy similares a las del acuífero del valle del Yaqui. Ambos están constituidos por medios granulares con intercalación de lentes de arcilla, posiblemente contaminados por intrusión salina y ambos son explotados para fines agrícolas (INEGI, 1993). La diferencia básica es que mientras el distrito de riego de Hermosillo depende totalmente de la explotación del agua subterránea, en el valle del Yaqui se aprovecha también el agua superficial con el uso de un sistema muy elaborado de canales provenientes del río Yaqui. El río Sonora que antes alimentaba la zona de Hermosillo, ha sido manejado como presa y por tanto el valle de Hermosillo ya no recibe este aporte (INEGI, 1993).

La necesidad de conocer los problemas que pueden afectar un acuífero ha llevado al estudio sistemático de sus características (geometría, dimensiones, potencial, etc.) por diversas técnicas de la hidráulica, hidrogeología, química y geofísica (Biella et al, 1983; Freeze and Cherry, 1979; Hem, 1970; McNeill, 1980). De entre ellas la geofísica ha sido usada para determinar zonas de baja o alta permeabilidad, delimitación de la geometría del acuífero, determinación

relativa de los materiales constituyentes de un acuífero, por mencionar algunas (Van Dam, 1976). Los métodos más usados en esta tarea son los eléctricos y electromagnéticos. Los métodos eléctricos, por su bajo costo, han sido utilizados en un alto porcentaje para el estudio de problemas hidrogeológicos en México. Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), constituyen la herramienta geofísica más popular en el estudio de la geometría de acuíferos, y por eso mismo su uso en algunas ocasiones se ha vuelto indiscriminado (Van Dam, 1976).

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), tiene muchas limitantes que tienen que ver por un lado con la geometría del arreglo que se usa y por otro lado con las características del medio en que se aplica. Entre las pocas fuentes en la literatura que mencionan este hecho se encuentran las referencias de Negi y Saraf (1989) y Van Dam (1976). Con respecto a la geometría del arreglo, el usuario puede influir en esta variable de diversas formas que van desde la elección de entre varios arreglos tradicionales (Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, etc.) hasta el diseño de uno particular para un problema específico. Con respecto a las características del medio, el usuario se ve limitado ya que, sobre ellas, él no puede influir. Cuando se habla de características del medio, se está refiriendo básicamente a la porosidad, saturación y calidad de agua en los pozos, (McNeill, 1980).

La importancia de hacer un estudio de sensibilidad sobre curvas de resistividad aparente con respecto a los parámetros mencionados, radica en que basándose en sus resultados, se podría prever que calidad de datos en sondeos eléctricos verticales se obtendría en zonas semiáridas de medios porosos. Este análisis al estarse realizando en datos reales de campo y no en pruebas de laboratorio, aumentaría la confiabilidad de posteriores tomas de datos de resistividad eléctrica.

Los objetivos de este trabajo fueron:

1. obtener valores estimados para la porosidad del subsuelo,
2. estudiar la sensibilidad de la resistividad aparente en función de la saturación de agua para modelos estratificados,
3. obtener estimaciones de la saturación para las zonas vadosa, intermedia y saturada para ambas zonas de estudio y
4. estudiar la sensibilidad de la resistividad aparente en función de la calidad de agua en medios saturados para medios estratificados.



## II.- Metodología

Se realizaron 101 sondeos eléctricos verticales en dos campañas distintas, para dos sitios distintos del Estado de Sonora, México (Figura II.1). La primera se llevó a cabo en diciembre de 1996, en el valle de Hermosillo donde se realizaron 51 sondeos eléctricos de corriente continua con aperturas máximas AB/2 entre 675m y 215m. La segunda se realizó en el valle del Yaqui durante el mes de marzo de 1997 y las aperturas de AB/2 fueron 675m en todos los casos. El dispositivo electrónico utilizado en todos los casos fue el Schlumberger. El equipo usado fue un Syscal, R1 de fabricación francesa. La distribución de los sondeos, en ambos lugares, se hizo de acuerdo a una malla más o menos regular con el objeto de tener una cobertura homogénea sobre las áreas de interés. La localización de los sitios se hizo con un posicionador global de satélite GPS, GARMIN 50. A partir de estos datos de campo se procedió a la generación de modelos calculados por un programa de computación, utilizando los filtros de Ghosh (1971) y O'Neill (1975) para medios estratificados, de autoría personal.

Aparte de los datos de resistividad eléctrica, se contó con datos de conductividad eléctrica de muestras de agua de 70 pozos agrícolas en el valle de Hermosillo (Marín et al, 1996) y 30 pozos de la red de monitoreo en el valle del Yaqui (González, 1993).

El tratamiento estadístico de los datos, así como la generación de gráficas, mapas, secciones geoelectricas, etc. Se realizó usando los paquetes GMT (v.3) (Wessel y Smith, 1995), Surfer (v.6) y Excel (97).

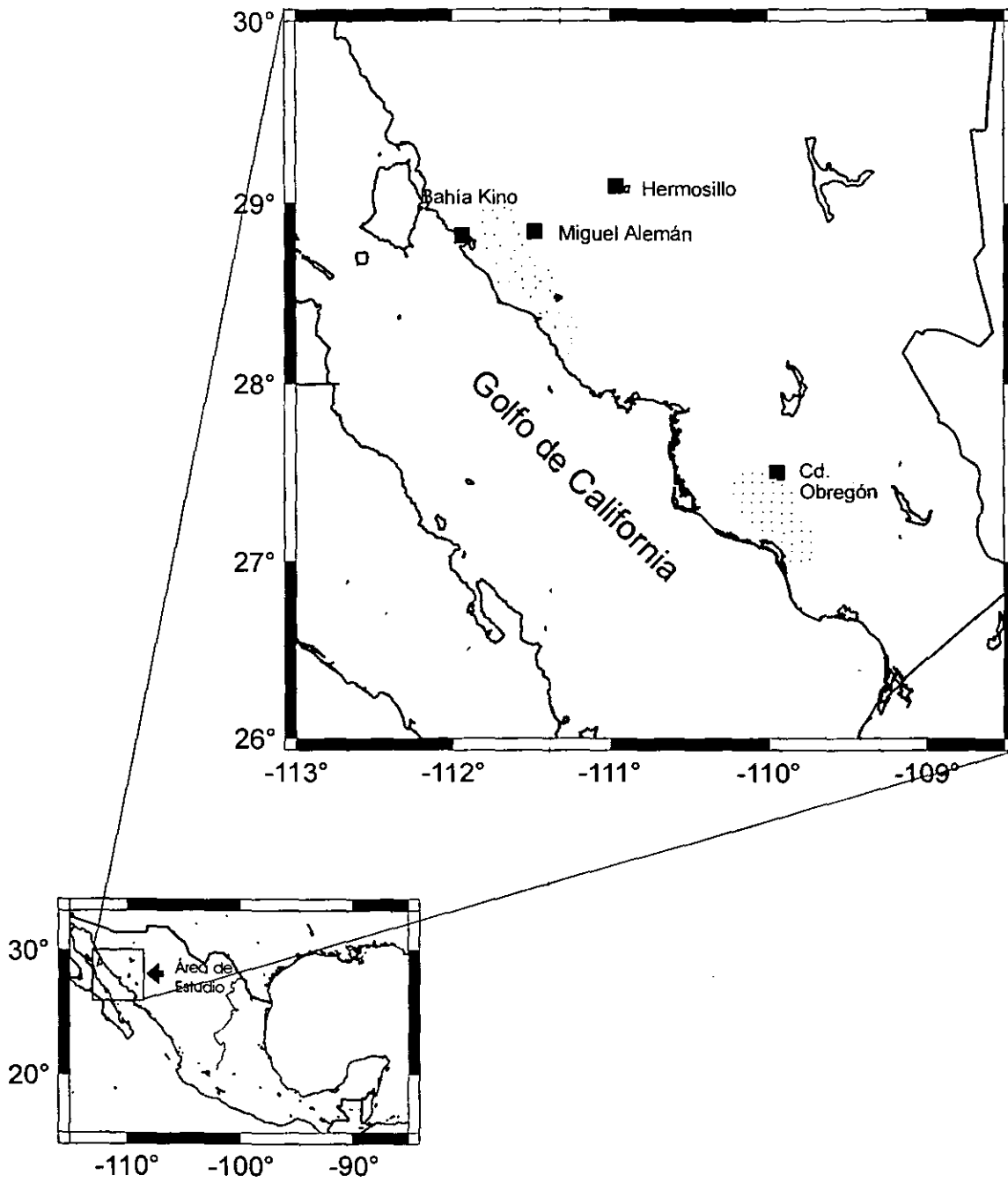


Figura II.1 Ubicación de las áreas de estudio.

## a) Orden esquemático para la obtención de los resultados

### 1. Modelación e Interpretación

a) Se generaron los modelos para los datos de campo de cada uno de los 101 sondeos eléctricos verticales usando la teoría de un medio estratificado, de capas planas horizontales e isotrópicas usando los filtros de Ghosh y Oneill.

b) Se realizaron secciones geoelectricas para determinar los límites entre la zona vadosa y la zona saturada de los acuíferos Hermosillo y el Yaqui.

### 2. Análisis de sensibilidad sobre las curvas de resistividad aparente en el caso de la saturación.

a) Se utilizó la Ley de Archie ( $F = a\phi^m$ ) en sus variantes propuestas por Simandoux (1963) y Poupon et al (1970) para calcular la porosidad en el caso de la zona saturada usando además la zonificación geológica en la cual se determinó la presencia de arcillas, arenas u otros materiales a partir de estimaciones.

b) Para la utilización de la Ley de Archie y sus variantes se utilizaron los valores de volumen de arcilla, conductividad de formaciones arcillosas y factor de formación para arenas limpias, así como conductividad de agua de pozos, todo esto dado por otros autores (Keller y Frischknecht, 1966; González et al, 1996; INEGI, 1993) en zonas de características similares a las zonas de estudio.

c) Con los resultados anteriores de porosidad y el factor de formación se realizó una estimación de la saturación de agua en estas zonas utilizando la ley empírica dada por Keller (1987) para zonas saturadas y no saturadas.

d) Hasta el paso anterior se usaron solamente ecuaciones para generar una serie de datos como espesor de capas, resistividad verdadera para cada capa, saturación y porosidad aproximadas, que sirvieron para generar modelos teóricos de capas planas e isotrópicas en los cuales todos los valores anteriormente calculados se consideraron como la primer aproximación de la saturación en zonas vadosa, intermedia y saturada.

e) A partir de los valores de porosidad inicial ( $\Phi_i$ ), y saturación de agua del modelo inicial ( $S_{a_i}$ ) se crearon curvas sintéticas de resistividad aparente y se compararon con las curvas reales de campo. El proceso anterior se repitió iterativamente para calibrar la curva de campo con la curva sintética generada por la variación de saturación, hasta encontrar valores críticos con un error entre curvas no mayor al 10% de desviación estándar. Este análisis de sensibilidad fue realizado usando dos tipos de variaciones sobre la saturación de agua (gruesa y fina) las cuales usaban rangos, en el caso de la variación gruesa, del 20% y para el caso de la variación de saturación de agua a nivel más local, se buscó que esta tuviera un rango de 5%, lo que le da mayor precisión.

Una vez obtenido el rango de saturación para las distintas zonas en la sección hidrogeológica (saturada, intermedia y vadosa), este se fijó para realizar el siguiente análisis.

3. Con valores bien establecidos de espesores que conforman las capas del acuífero, saturación para zona vadosa y resistividades verdaderas de las formaciones se incluyeron los datos de calidad de agua de las zonas de estudio (Marín et al, 1996; González, 1993).

a) Los datos de calidad de agua incluían los valores de conductividad de agua de pozos y la cantidad de sólidos totales disueltos (STD). Estos dos tipos de valores se relacionaron por medio de la expresión dada por Hem (1970).

b) Con los datos "químicos" se generaron mapas de isoconductividad y de isolíneas de STD con la finalidad de zonificar el comportamiento regional y observar tendencias de salinización del subsuelo.

c) Se generaron, como en el caso de la saturación, modelos que incluían los valores de porosidad, saturación, factor de formación y espesor de las capas, previamente establecidos y una aproximación del factor de la calidad de agua (conductividad del agua), para volver a generar sintéticos de las curvas de resistividad aparente usando nuevamente la Ley de Archie.

d) Se volvió a realizar un análisis de sensibilidad de las curvas sintéticas y de campo en donde para este caso se usó una variación de rangos de cantidad de STD de +, - 50 ppm. El proceso nuevamente se hizo iterativo hasta conseguir observar el grado de afectación de este parámetro sobre la curva de resistividad aparente, procurando que la desviación estándar entre la curva de resistividad aparente de campo y la sintética no fuera mayor al 10%.

### **III.- Bases teóricas**

El SEV (sondeo eléctrico vertical) es una técnica ampliamente usada en la hidrogeología para determinar distintos parámetros como son la profundidad al nivel del agua y determinación de zonas de alta o baja permeabilidad, por mencionar solo algunos (Van Dam, 1976; Orellana, 1980; Keller y Frischknecht, 1966).

Existen diversos factores que afectan la conductividad eléctrica en un medio, algunos de estos factores están relacionados con el tipo de lecturas que se realicen sobre el medio y otros son inherentes al medio. La conductividad eléctrica o su inversa la resistividad eléctrica es una característica física del medio y su comportamiento es descrito por las leyes de Maxwell. La teoría que se desarrolló para la interpretación de datos de resistividad en corriente continua obedece a una serie de suposiciones que van desde la idea de un medio estratificado y homogéneo, hasta considerar isotropía en el medio.

#### **a) Factores que afectan la resistividad del subsuelo**

La mayoría de las rocas en el subsuelo son, por si solas, de muy alta resistividad eléctrica que llega hasta los  $10^6 \Omega\text{-m}$  (Yungul, 1996), sin embargo cuando ciertos minerales, como los metálicos, ocurren en suficientes cantidades, la resistividad eléctrica baja considerablemente, llegando a ser de hasta  $10^{-6} \Omega\text{-m}$  (Yungul, 1996). En general la conductividad eléctrica en la mayoría de las rocas es electrolítica y se presenta a través de los poros de las rocas rellenos por los fluidos.

La resistividad del medio es función de:

1. la porosidad, así como también de la forma y el tamaño de los poros y su interconexión,
  2. la saturación de agua o el contenido de humedad en los poros,
  3. la calidad de agua, dada por la concentración de electrolitos o sales disueltas en la fase líquida,
- así como de otros parámetros como:  
temperatura y fase del agua de poro y la cantidad y composición de las sustancias en suspensión en el agua (Keller, 1987; Biella et al, 1983).

De estas características en este trabajo se evaluarán tres, la porosidad, la saturación y la calidad de agua para determinar cuál es la forma en que afectan sobre las medidas de resistividad.

### 1) *Porosidad*

A la relación entre el volumen vacío y el volumen total de una muestra de roca se le conoce como porosidad, un parámetro que es relevante para la conductividad eléctrica de las rocas. En la Tabla 1 se muestra la porosidad de algunos materiales.

La ecuación (2) dada por Archie en 1942, relaciona la porosidad y la resistividad. Esta relación fue obtenida empíricamente por estudios de petrofísica sobre muestras de laboratorio. En ella se incluye el factor de formación de la roca el cual está dado por (p. ej. Jackson et al., 1978):

$$F = \frac{\rho_{rw}}{\rho_w} \quad (1)$$

Donde

$\rho_{rw}$  es la resistividad de la roca saturada

$\rho_w$  es la resistividad del agua de poro

Tabla 1. Rangos de porosidad representativos para rocas sedimentarias. (Todd, 1964)

Material	Porosidad (%)
Suelos	50-60
Arcillas	45-55
Limos	40-50
arenas gruesas	30-40
arenas uniformes	30-40
arenas finas y medias	30-35
Grava	30-40
gravas y arenas	20-35
Arenisca	10-20
rocas de arcilla	1-10
Caliza	1-10

De acuerdo con Archie (1942), el factor  $F$  está relacionado con la porosidad  $\phi$  de la siguiente manera:

$$F = a\phi^{-m} \quad (2)$$

Donde

$a$  y  $m$  son constantes relacionadas al tipo de roca, y

$F$  es el factor de formación.

Los valores reportados en la literatura para  $a$  y  $m$ , varían de 0.47 a 2.30 para  $a$  y de 1.64 a 2.23 para  $m$  (Keller y Frischknecht, 1966).

La Ley de Archie fue obtenida en laboratorio de manera empírica sobre



muestras de arenas limpias sin tomar en cuenta mezclas de otro materiales. Otros autores realizaron pruebas de laboratorio sobre materiales distintos como arenas mas arcillas, rocas fracturadas, etc.; de tal manera que en la actualidad existen varias versiones de la Ley de Archie (Perez-Rosales, 1983).

Para el caso de arenas y arcillas como material predominante donde estos constituyen más del 60% del total; Simandoux (1963) propone la siguiente ecuación:

$$C_t = \left( \frac{C_w}{F} \right) S_w^2 + \varepsilon V_{SH} C_{SH} \quad (3)$$

Donde:

F es el factor de formación

$C_t$  es la conductividad del terreno

$C_w$  es la conductividad del agua

$S_w$  la saturación del medio

$V_{SH}$  es el volumen de arcillas

$C_{SH}$  es la conductividad de las arcillas

$\varepsilon$  es una constante empírica la cual tiene dos opciones

$\varepsilon=1$  para valores de  $S_w$  mayores al 45 %

$\varepsilon<1$  para valores de  $S_w$  entre 0% y 45%

Para el caso de un modelo estratificado donde las arcillas se encuentren intercaladas en forma de láminas con las arenas, se tiene la ecuación de Poupon et al (1970):

$$C_t = \frac{[(1 - V_{SH})C_w S_w^2]}{F} + V_{SH} C_{SH} \quad (4)$$

Donde

F es el factor de formación de arenas limpias (es decir sin contenido de arcillas)

$S_w$  es la saturación para arenas limpias es decir suponiendo que se extrae el contenido de arcillas de la muestra.

Los otros parámetros se definen con anterioridad.

Las relaciones de Simandoux y Poupon son casos específicos de la ley de Archie el cual es el caso de las arenas limpias ( $V_{SH}=0$ ). La diferencia entre las ecuaciones de Poupon y Simandoux, es que mientras la primera fue obtenida a partir de muestras con laminas de arcilla, en la segunda la arcilla puede o no tener una distribución laminar. Para los fines de este estudio se usaron ambas relaciones.

## 2) Saturación (Contenido de humedad)

Uno de los parámetros en las relaciones anteriores es la saturación de agua  $S_w$ . La saturación de agua se define como la cantidad de agua contenida dentro de la estructura porosa de una muestra de roca. La saturación de agua define el límite entre la zona vadosa y la saturada.

Keller y Frischknecht (1966) y Keller (1987) proponen las siguientes relaciones empíricas para la parte no saturada de un medio:

$$\frac{\rho}{\rho_{100}} = S_w^{-n_1}; S_w \geq 25\% \quad (5)$$

$$\frac{\rho}{\rho_{100}} = aS_w^{-n_2}; S_w < 25\% \quad (6)$$

Donde

- $\rho$  es la resistividad de la roca parcialmente saturada
- $\rho_{100}$  es la resistividad de la misma roca cuando está completamente saturada con agua del mismo electrolito.
- $S_w$  es la fracción de volumen de poros llenos de agua electrolítica
- $n_1$  es un parámetro determinado experimentalmente el cual tiene aproximadamente un valor de 2 (Keller, 1987).
- $a$  y  $n_2$  son valores determinados experimentalmente para el caso de un medio poroso. El parámetro  $a$  varía desde 0.05 para arenas y 0.5 para rocas ígneas. Mientras que el exponente  $n_2$  varía entre 4 y 5, (Keller, 1987).

En teoría, el porcentaje de saturación de un medio puede variar de 0% a 100%. Estas condiciones extremas se pueden dar entre el límite superior (suelo) y el acuífero respectivamente (McNeill, 1980; Custodio y Llamas, 1983). Las condiciones extremas no son los casos más representativos en situaciones reales, de tal forma que si un suelo se encuentra recién humedecido por alguna fuente externa de recarga, el porcentaje de saturación incrementa substancialmente. Cuando el agua de lluvia cae en el suelo, una parte corre en forma horizontal en la superficie del suelo y otra parte se percola en el suelo. Una fracción es retenida por el suelo y contribuye al incremento de la humedad, la fracción restante se mueve verticalmente hacia el nivel freático obedeciendo la fuerza de la gravedad. En un perfil del suelo se pueden distinguir cuatro estados de humedad, tres para la zona no saturada y el último para la zona saturada (Figura III.1). La parte superior en este perfil corresponde a la zona pendular, donde el agua y el vapor de agua se encuentran ocupando los poros en forma de anillos alrededor de las partículas sólidas y no existe en una forma continua. Subyaciendo esta zona se encuentra la zona folicular, en la cual los anillos de

líquido se unen y forman una capa continua en el suelo, el vapor de agua entre estos anillos está encapsulada. La tercera capa se denomina zona capilar. En esta parte el líquido llena completamente los poros, pero la presión del líquido se encuentra sujeta a las fuerzas de capilaridad de manera que el nivel asciende dependiendo del diámetro de los poros, esta zona puede llegar a medir varios metros (Custodio y Llamas, 1983). Finalmente se llega al nivel freático, donde la presión atmosférica está en equilibrio con la presión hidrostática. Abajo de este nivel se encuentra la zona saturada. A las tres primeras capas se les denomina en conjunto zona no saturada o zona vadosa (McNeill, 1980).

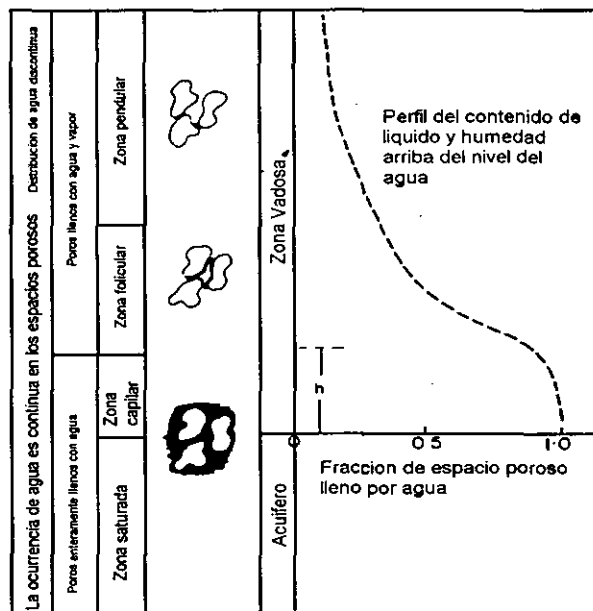


Figura III.1. Ocurrencia de líquidos en los suelos y zona saturada (Según McNeill, 1980)

### 3) Calidad del agua

El agua por si sola es un dieléctrico el cual empezará a manifestarse como un conductor eléctrico, conforme se le agreguen electrolitos, los cuales se separan en iones positivos y negativos para llevar a cabo la conducción electrolítica. El agua de lluvia que recién se interna en el suelo tiene un contenido

de sales de 0.3 y 0.2 ppm (partes por millón). Sin embargo en las cercanías con zonas urbanas, industriales o costeras, el agua de lluvia alcanza valores de 2 y 1 ppm (Appelo y Postma, 1996).

*Tabla 2. Conductividad eléctrica para distintos tipos de agua (Tomada y modificada de Heiland, 1968)*

Tipo de Agua	Conductividad eléctrica en milimhos/m
Agua Meteórica	1 a 30
Aguas superficiales (lagos y ríos)	0.3 a 10000
Zona de rocas ígneas	2 a 30
Área con rocas sedimentarias	10 a 100
Agua en suelos (promedio)	10
Tan grande como	10000
Agua subterránea	
Rocas ígneas	6 a 30
Rocas sedimentarias	hasta 1000
Agua en zonas mineralizadas (Cobre, zinc o cualquier sulfato)	mayor a 3000

El agua en el suelo inicia interacciones químicas con el medio adyacente. Por procesos de disolución aumenta el contenido de sales. La cantidad y el tipo de sales disueltas en el agua es función de los distintos medios de su viaje y los distintos ambientes en que se encontró (Drever, 1988). La conductividad de un electrolito es proporcional al número total de iones transportados en la solución (McNeill, 1980).

Heiland (1968) presenta algunos valores típicos para la conductividad del agua en diferentes condiciones (Tabla 2).

La conductividad eléctrica es un parámetro indicativo de la salinidad del agua, del tipo de iones presentes y de su concentración. En el campo, la conductividad eléctrica se mide al momento de muestreo y a la temperatura ambiente del agua tomando en cuenta el aumento del 2% de la conductividad por grado centígrado que se incrementa en la temperatura (Freeze y Cherry, 1979). Para la conversión de los valores de conductividad a STD (sólidos totales disueltos) se usa la siguiente relación lineal para el caso de las aguas subterráneas (Hem, 1970):

$$\text{STD} = A \cdot C \quad (7)$$

Donde:

C es la conductividad en microsiemens o micromhos

STD (sólidos totales disueltos) expresados en g/m<sup>3</sup> o mg/l

A es un factor de conversión. Para la mayoría de las aguas subterráneas A varía entre 0.55 y 0.75 dependiendo de la composición iónica de la solución (Freeze y Cherry, 1979).

A partir de los valores de sólidos totales disueltos se puede hacer una clasificación del tipo de agua conforme se observa en la siguiente tabla:

*Tabla 3. Clasificación de las aguas de acuerdo al contenido de STD. (Freeze y Cherry, 1979)*

<b>Categoría</b>	<b>STD (mg/l)</b>
Agua dulce	0 -1 000
Agua salobre	1 000 -10 000
Agua salada	10 000 - 100 000
Salmuera	Más de 100 000

## b) Sondeo Eléctrico Vertical

### 1) Resistividad aparente

La resistividad aparente para un medio estratificado es calculada a partir de la medida del potencial y corriente para un espacio teóricamente homogéneo e isotrópico en cada capa; además de un factor geométrico K. La resistividad aparente es función de la distribución de la resistividad en el medio y de la orientación, localización (posición del centro del arreglo) y el espaciamiento (tamaño del arreglo) de los electrodos de potencial y de corriente: La resistividad aparente  $\rho_a$  entre dos electrodos (C y D) está dada por:

$$\rho_a = K \frac{V_C - V_D}{I} \quad (8)$$

Donde

K es el factor geométrico que varía dependiendo del tipo de arreglo utilizado (Schlumberger, Wenner u otro) y de las dimensiones de éste (Keller, 1966).

$V_C$  es el potencial en el electrodo C (volts)

$V_D$  es el potencial en el electrodo D (volts)

I es la corriente (amperes)

### 2) Potencial eléctrico

Para el cálculo del potencial eléctrico en la superficie del medio estratificado se consideró en este trabajo que (Stefanescu et al, 1930):

1. El medio está constituido por un número finito de capas separadas una de otra por una frontera horizontal plana. La capa más profunda se extiende hasta una profundidad infinita y las demás capas tienen un espesor finito.
2. Cada una de las capas es eléctricamente homogénea e isotrópica.
3. El campo es generado por una fuente puntual.
4. La corriente emitida por la fuente es continua (DC).

En el caso de un campo potencial generado por una fuente de corriente sobre la superficie de un medio como el anteriormente descrito, se satisfacen las siguientes condiciones de frontera:

1. En cualquier punto de la frontera plana el potencial eléctrico es continuo.
2. En cualquier punto de la frontera plana, la componente vertical del vector densidad de corriente es continua.
3. La componente vertical del vector de densidad de corriente y por tanto el de la intensidad del campo eléctrico son cero para cualquier punto de la superficie, excepto en una vecindad infinitesimal alrededor de la fuente de corriente. La razón de esto es que la densidad de corriente en el aire es cero y en vista de la condición 2, la componente vertical de la densidad de corriente debe ser entonces también cero en el terreno a la profundidad cero.
4. En la zona cercana a la fuente de corriente, el potencial se aproxima al valor dado por la siguiente expresión:

$$V = \frac{\rho_1 I}{2\pi\sqrt{(r^2 + z^2)}} \quad (9)$$

Donde:

$\rho_1$  es la resistividad en la primera capa

$I$  es la intensidad de corriente



r y z son las distancias de la fuente al punto de medición en coordenadas cilíndricas.

5. A una profundidad infinita el potencial tenderá a cero.

Bajo las condiciones anteriores la relación que se obtiene del potencial en la superficie del terreno es (Koefoed, 1979):

$$V = \left( \frac{\rho_1 I}{2\pi} \right) \int_0^{\infty} [1 + 2\Theta_1(\lambda)] J_0(\lambda r) d\lambda \quad (10)$$

Donde:

- V es el potencial en la superficie
- I es la intensidad de corriente emitida por la fuente
- $\rho_1$  es la resistividad de la primera capa
- $\lambda$  una variable de integración
- r la distancia desde la fuente hasta el punto de medición
- $J_0$  es la función Bessel de orden cero
- $\Theta_1(\lambda)$  es una función referida como función kernel y está controlada por la resistividad de las capas y la profundidad de sus fronteras (Stefanescu et al, 1930).

Igualando las ecuaciones 8 y 9 y tomando en cuenta que el factor geométrico K para el caso del dispositivo Schlumberger tiene la siguiente forma:

$$K_{Sch} = 2\pi \frac{s^2 - b^2}{4sb} \quad (11)$$

se tiene que de acuerdo a la Figura III.2, la resistividad aparente para el dispositivo Schlumberger es:

$$\rho_{\text{app.Sch}} = \rho_1 + 2\rho_1 s^2 \int_0^{\infty} \Theta_1(\lambda) J_1(\lambda s) \lambda d\lambda \quad (12)$$

Donde  $J_1$  es la función de Bessel de orden 1 y que resulta de aplicar el teorema de las funciones Bessel:  $\frac{\partial}{\partial x} J_0(x) = -J_1(x)$ .

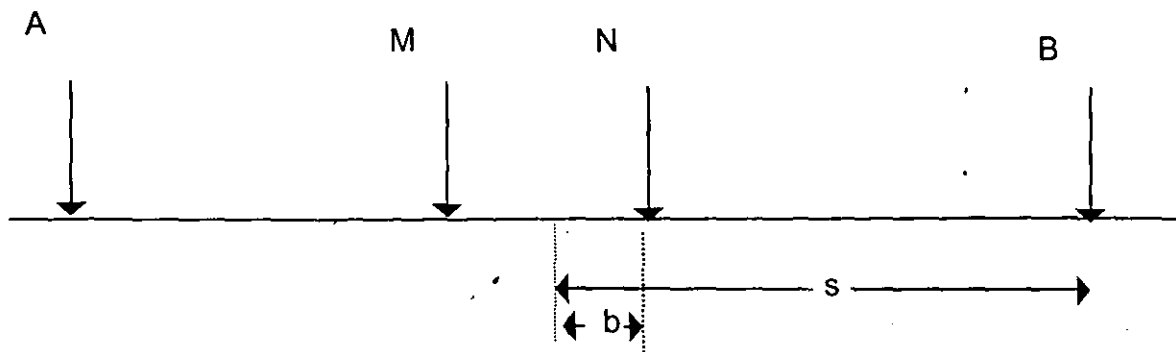


Figura III.2. Dispositivo Schlumberger. Donde A y B son los electrodos de corriente y M y N son los electrodos de potencial.

### 3) Filtrado digital

Para la aplicación de la teoría del filtrado digital se define la transformación de resistividades  $T_i$  (O'Neill, 1975):

$$T_i = \frac{T_{i+1} + \rho_i \tanh(\lambda t_i)}{1 + \frac{T_{i+1} \tanh(\lambda t_i)}{\rho_i}} \quad (13)$$

Donde

$i$  es el número de la capa

$t_i$  es el espesor de la capa  $i$ -ésima.

Esta ecuación de transformación de resistividades y la función de resistividad aparente (ecuación 12) tienen una relación lineal (Koefoed, 1979). Este autor propone para el caso del arreglo Schlumberger la siguiente relación para la resistividad aparente:

$$\rho_{app.Schl} = \rho_1 + \int_{-\infty}^{+\infty} [T(y) - \rho_1] J_1(e^{x-y}) e^{2(x-y)} dy \quad (14)$$

Se introdujeron las variables x y y que están definidas como:

$$x = \log_e(s) \quad (15a)$$

$$y = \log_e\left(\frac{1}{\lambda}\right) = -\log_e(\lambda) \quad (15b)$$

La ecuación 14, es una integral de convolución que puede escribirse como:

$$\rho_a(x) = T(x) * I(x) \quad (16)$$

El término T(x) en esta ecuación corresponde al filtro digital (Ghosh, 1971).

En el método del filtrado digital, los valores de una de las funciones (p. ej. función de transformación de resistividades) son obtenidos como una expresión lineal en los valores de muestreo de la otra función (p. ej. función de resistividades), las muestras son tomadas a un intervalo constante a lo largo del eje de las abscisas. Los coeficientes en esta expresión lineal son llamados los coeficientes del filtro (Koefoed, 1979). Para el dispositivo Schlumberger que se usó en este trabajo, se utilizó para su interpretación un filtro de seis puntos por ciclo logarítmico como intervalo de muestreo (O'Neill, 1975).

Para el cálculo de los coeficientes del filtro se usó el siguiente esquema:

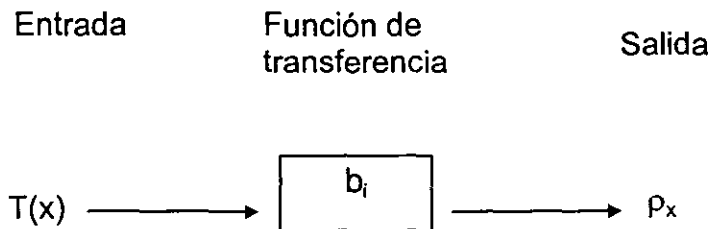
$$\Delta\rho_a(x) = \frac{e^{3x}}{(1+e^{2x})^{1/2}} \leftrightarrow G(f)$$

$$\Delta T(y) = \frac{e^{-y} + e^{-2y}}{1s e^{e^{-y}}} \leftrightarrow F(f)$$

$$H(f) = \frac{F(f)}{G(f)} \leftrightarrow b_i$$

Donde  $\Delta\rho_a(x)$  son los valores de resistividad aparente para  $x=AB/2$   
 $\Delta T(y)$  son los valores de la función transformación de resistividad  
 $G(f)$  y  $F(f)$  sus equivalencias en el espacio de Fourier  
 $H(f)$  es el resultado de la convolución  
 $b_i$  es la serie de coeficientes del filtro.

De manera teórica la convolución se resuelve de la siguiente manera:



La solución numérica de la convolución, tal como se resuelve en este trabajo es la que esta dada por Ghosh (1971):

$$\rho_a = \sum_i b_i T_{m-1} \quad (17)$$

para  $m=0, 1, 2, 3, \dots$

Donde:

$b_i$  son los coeficientes del filtro y

$T_{m-i}$  son las muestras de la función de transformación de resistividad

La ecuación (17) se usa para calcular las curvas sintéticas a partir de los datos de las curvas de resistividad aparente.

## IV. Marco hidrogeológico de las zonas de estudio

### a) Valle de Hermosillo

#### 1) Área de estudio

El Valle de Hermosillo se encuentra ubicado entre las latitudes  $28^{\circ}00'$  y  $29^{\circ}15'$  y los  $112^{\circ}15'$  y  $111^{\circ}00'$  de longitud oeste (Figura IV.1). Por sus coordenadas geográficas se encuentra en la franja considerada de desiertos. El clima predominante es el muy seco y muy cálido con temperatura media anual de 22 grados centígrados y una precipitación media anual menor de 300 mm. (INEGI, 1993).

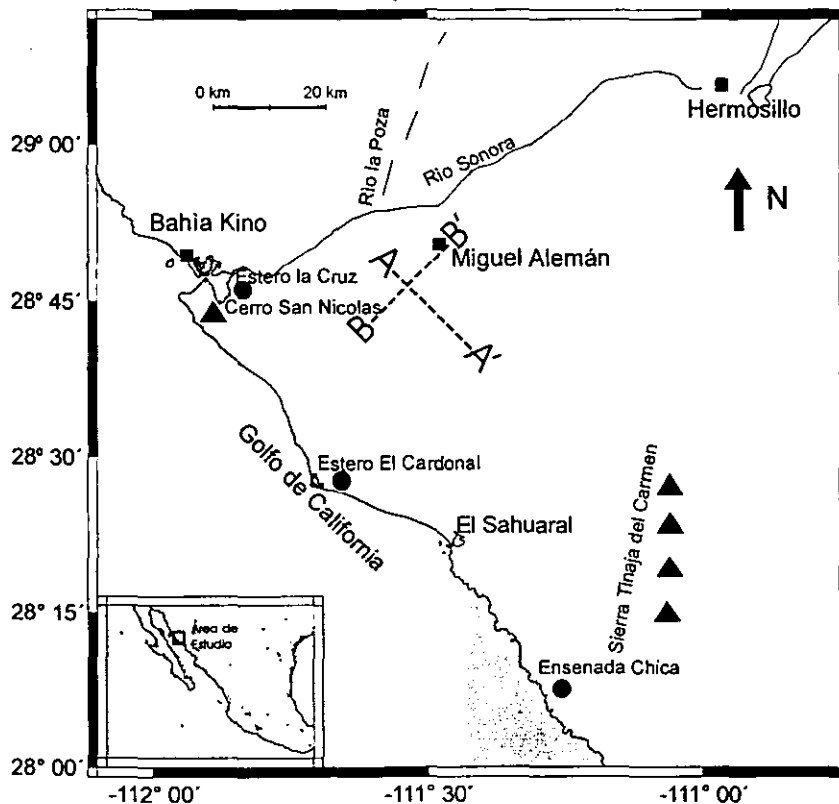


Figura IV.1. Ubicación del área de estudio (Valle de Hermosillo, Sonora)

## 2) Geología

La geología de esta zona ha sido descrita por Moran-Zenteno (1994), Ortlieb (1978) y CRM (1982) como un valle del tipo aluvial, que se encuentra limitado al sureste por la zona denominada El Sahuaral que a su vez tiene como límite sur la Sierra Tinaja del Carmen (Figura IV.1).

Las rocas que afloran dentro del área de estudio son principalmente ígneas y sedimentarias y en menor proporción metamórficas (Figura IV.2). La edad de estas rocas va del Precámbrico al Cenozoico (Moran-Zenteno, 1994). En la región el *Precámbrico* está dividido en dos grandes grupos, el basamento metamórfico de edad Proterozoico Temprano y un paquete sedimentario del Proterozoico Tardío que lo sobreyace. El basamento metamórfico está compuesto por esquistos y gneises, mientras que el paquete sedimentario está representado por cuarcitas y dolomitas. Del *Paleozoico* se observa la presencia de rocas marinas. Las rocas paleozoicas comprenden los períodos Cámbrico-Pérmico. Estas rocas han sido clasificadas como calizas con lentes de pedernal, areniscas y en menor proporción, dolomitas depositadas en ambiente de plataforma. El *Mesozoico* está dividido en tres unidades litológicas. La primera es el Triásico-Jurásico, que se presenta como sedimentos de depósitos fluvio-deltáico, areniscas cuarcíferas y arkósicas, conglomerados y limos; en algunas zonas se encuentran intercalaciones de carbón, a esta formación se le conoce como Grupo Barranca. La segunda unidad está representada por rocas volcánicas andesíticas de edad Jurásica (Moran-Zenteno, 1994). Del Cretácico se reportan derrames andesíticos y piroclásticos de la misma composición al sur de la zona de estudio, a esta formación se le denomina Formación Lista Blanca. Las andesitas se encuentran cubiertas por conglomerados y por derrames riolíticos y andesíticos de Cretácico superior. El *Cenozoico*, en esta región se caracteriza por un vulcanismo ácido como riolitas e ignimbritas, con lentes de

FALTA PAGINA

No. 27



pedernal y calizas con bandas y nódulos de pedernal. El Terciario se reporta como una secuencia clástica de origen marino de aproximadamente 180 a 200 m de espesor, la cual es un estrato de arcilla fosilífera de color azul con alternancias de arenas y limos. El espesor de esta arcilla va de los 22 m en las partes cercanas al poblado Miguel Alemán, hasta los 400m hacia la costa (INEGI, 1993). El conglomerado Baucarit, es una secuencia de areniscas y conglomerados poco consolidados que incluye una secuencia de tobas y riolitas que en algunos lugares alcanza los 75 m (INEGI, 1993). Finalmente del Cuaternario se presenta una secuencia de sedimentos no consolidados que consiste en gravas, arenas, limos y arcillas, producto de la intemperización de las sierras circundantes, distribuidos en el valle y en los causes de los ríos (Ariel, 1968). También existen depósitos eólicos compuestos por arenas de cuarzo y de feldespatos.

En la Figura IV.2 se observan las rocas que afloran en el área de estudio, esta Figura fue tomada de la carta geológica-minera del Consejo de Recursos Minerales (CRM, 1982).

### 3) *Hidrogeología*

Según la información obtenida de perforaciones, el subsuelo se encuentra constituido por limos, arenas de grano fino a grueso y gravas, tal como se puede ver en las secciones geológicas que fueron creadas a partir de 12 pozos de exploración (Ariel, 1968) de acuerdo a la Figura IV.3:

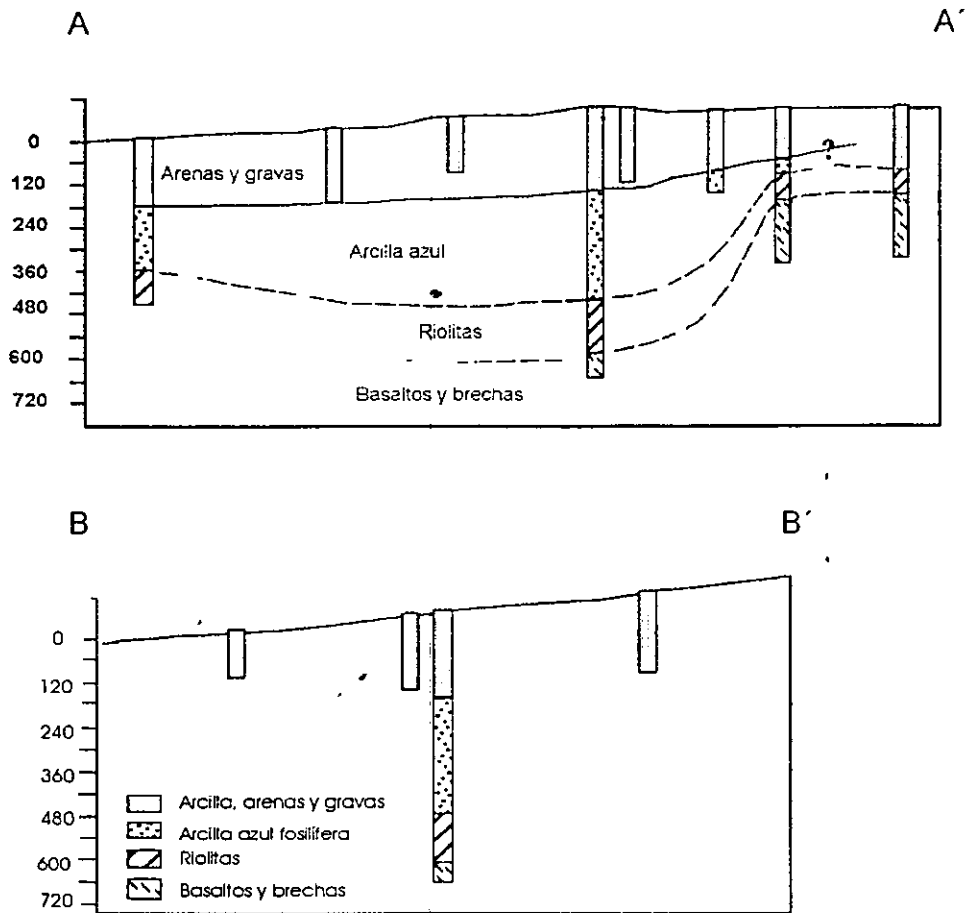


Figura IV.3. Secciones geológicas a partir de pozos de exploración (Ariel, 1968), para ubicación véase la Figura IV.1.

En el sistema de acuíferos se distinguen dos unidades: el acuífero inferior en los sedimentos del Triásico-Jurásico, y el acuífero superior en los sedimentos del Cuaternario (Figura IV.4). En una franja paralela a la Costa de aproximadamente 30 km de ancho estos dos acuíferos están separados por la capa de Arcilla Azul del Terciario (Ariel, 1968; Steinich et al, 1997). En el área donde se presenta esta capa, el acuífero inferior está semiconfinado. El acuífero superior se considera libre (Ariel, 1968). La recarga del acuífero superior es a

través del flujo lateral proveniente de la zona al noreste de Hermosillo, un flujo vertical desde el acuífero inferior (Ariel, 1968; INEGI, 1993) y en menor proporción de infiltraciones debidas al riego. El acuífero que se explota para fines agrícolas es el Superior. Este acuífero por la diversidad de los materiales depositados manifiesta condiciones variables de permeabilidad y de contenido de arcillas (Jiménez, 1965).

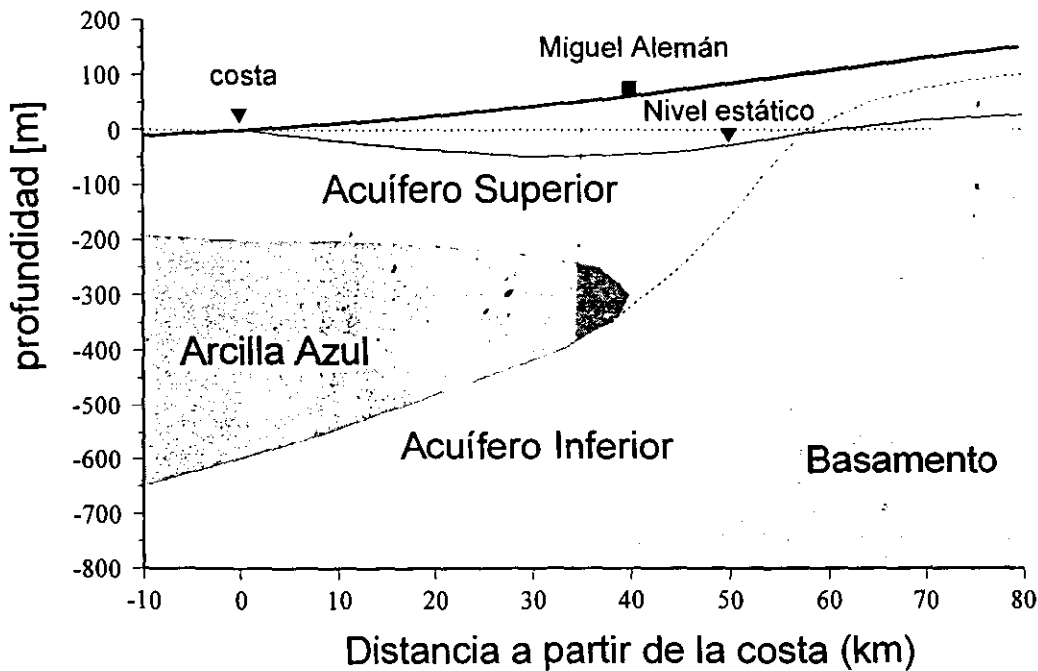


Figura IV.4. Esquema hidrogeológico sobre un perfil perpendicular a la costa (INEGI, 1993; Steinich et al, 1997).

Debido a la sobre-explotación del acuífero por el constante aumento en las actividades agrícolas, se ha observado en los últimos 40 años un continuo descenso en los niveles estáticos del acuífero superior creando un extenso cono de abatimiento (INEGI, 1993). El centro de este cono de abatimiento está ubicado al sur de Miguel Alemán (Figura IV.4.), lugar donde el nivel estático se encuentra 40 metros bajo el nivel medio del mar. El espesor de la zona vadosa alcanza valores hasta 100 m (INEGI, 1993).

## **b) El Valle del Yaqui**

### *1) Área de estudio*

El área de estudio se encuentra localizada entre las coordenadas 108° 53' y 110° 37' de longitud oeste y 26° 53' y 28° 37' de latitud norte (Figura IV.5). Su altura sobre el nivel del mar fluctúa entre los 4 y 70 metros (Mundo y Martínez, 1994). La precipitación media anual es de 272.3 mm (INEGI, 1993). El clima de la región es semiárido, con una temperatura media anual de 23 °C (Mundo y Martínez, 1994).

### *2) Geología*

El Valle del Yaqui es una extensa planicie costera con orientación noroeste-sureste, que tiene como límites fisiográficos la Sierra El Bacatete, en el norte, las Sierras Bachomobampo y Bayoreca, en el este, el valle del Mayo, y el Golfo de California en el sur y oeste (INEGI, 1993). Por su localización comprende tres provincias fisiográficas que son, la Provincia de Sierras y Valles Paralelos, Provincia Desértica de Sonora y Provincia de la Llanura Costera (King, 1939; ICATEC y SRH, 1969) (Figura IV.5). La provincia de Sierras y Valles Paralelos, está localizada en la porción oriental del área de estudio y está constituida por una franja de sierras longitudinales, de dirección SE-NW, que están separadas entre si por valles poco profundos. La roca predominante es la riolita, pero también se encuentran calizas, rocas intrusivas y conglomerados que rellenan los valles (ICATEC y SRH, 1969). La Provincia Desértica, está localizada en la parte norte del Valle del Yaqui y le pertenece la Sierra de Bacatete, donde predominan rocas efusivas y conglomerados (ICATEC y SRH, 1969). La Provincia de la Llanura Costera sustituye las sierras y las llanuras desérticas al

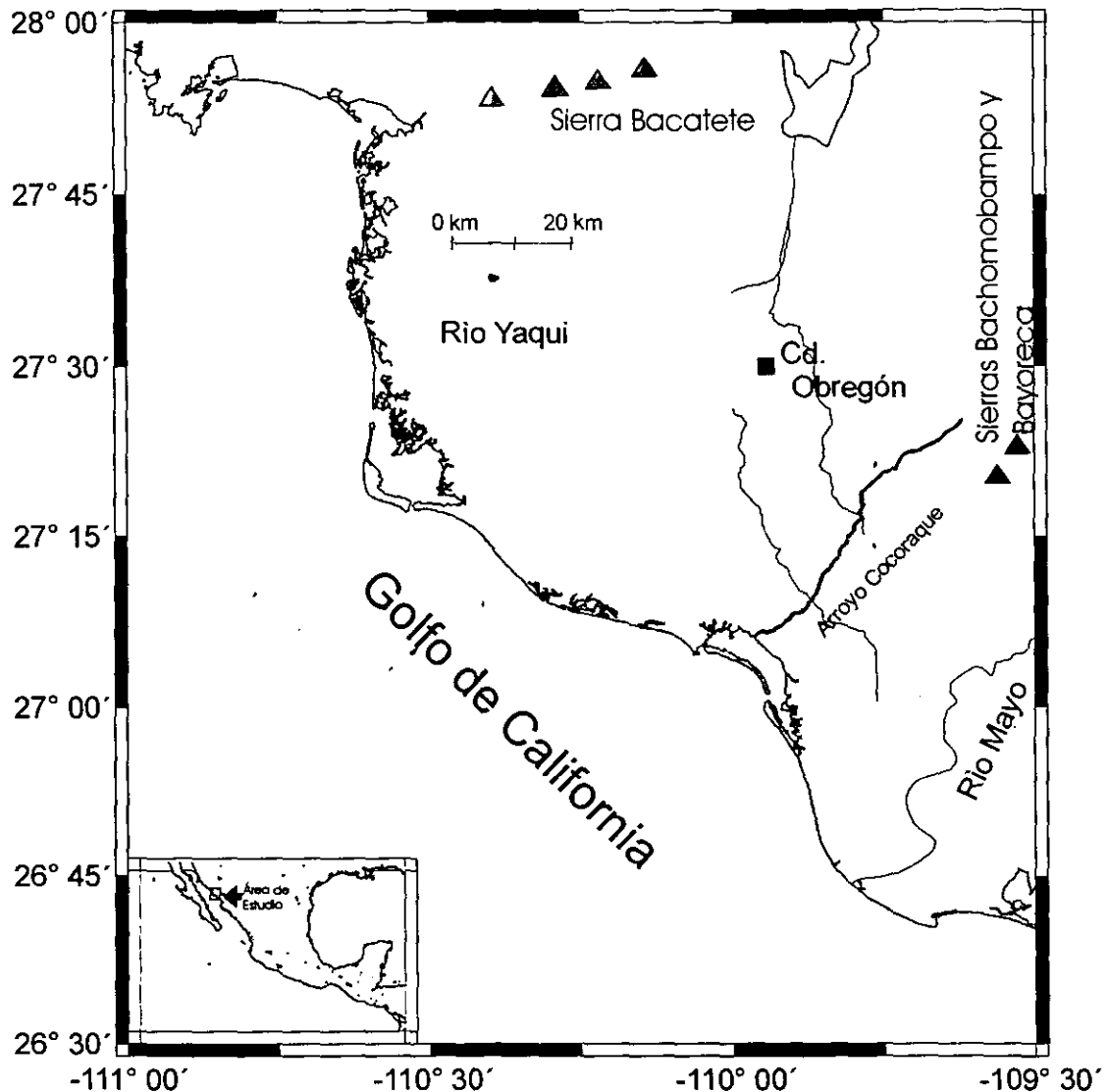


Figura IV.5. Ubicación del Valle del Yaqui, Sonora.

sur, constituyendo una llanura aluvial que está limitada al este por las montañas de la Provincia de Sierras y Valles Paralelos y al oeste por el Golfo de California. Esta provincia fue fundada por la unión de los deltas de los ríos Yaqui y Mayo. La provincia se hace más estrecha debido a que la sierra Bacatete, en las cercanías de Guaymas, llega hasta el mar (ICATEC y SRH, 1969). La cuenca del Valle del Yaqui se encuentra cubierta casi en su totalidad por rocas ígneas Cretácicas y

Terciarias, por conglomerados de fines del Terciario y por depósitos aluviales residuales del Cuaternario. Afloran también rocas Paleozoicas de composición calcárea únicamente en una pequeña porción al norte de Navojoa (Figura IV.6).

### 3) Hidrogeología

El acuífero está constituido por material aluvial del Reciente, cuya granulometría varía de gravas y arenas hasta limos y arcillas, con intercalaciones de lentes de evaporitas, principalmente en su parte superior, desconociéndose aún el espesor total de los sedimentos (INEGI, 1993). La recarga del acuífero proviene esencialmente del río Yaqui y de las filtraciones del agua de riego, así como de los canales; alcanzando en conjunto un volumen medio de 416.5 millones de m<sup>3</sup>. Según González et al (1996); dicho sistema tiene un comportamiento irregular en la zona: al norte lo catalogan como acuífero libre, al sur y sureste como confinado y en el centro y oeste, como semiconfinado. La unidad norte, constituida por gravas y conglomerados con un bajo contenido de arcillas, tiene su nivel freático entre 5 y 20 metros abajo de la superficie. La unidad sur, está constituida de una mezcla de arcillas y gravas con arenas, gravas y arcillas conglomeradas. El nivel freático se encuentra entre los 1.5 y 3.0 m por debajo de la superficie del terreno. La unidad Este consiste de gravas y arenas conglomeradas asociadas con lentes de arcilla a través del río Cocoraque cercano al lado derecho del Canal Alto. La litología la constituyen arcillas y arenas, el nivel freático se encuentra entre los 10 y 30 m de forma general y en forma particular de 1.5 a 3 m por debajo de la superficie en la zona cercana al río

FALTA PAGINA

No. 34

conglomerado de arcillas y gravas que alcanzan una profundidad de 150 m. El nivel del agua en esta unidad está entre los 1.5 y 3 m de profundidad (González et al, 1996).

La calidad del agua varía de dulce a salada con predominancia de agua tolerable para el cultivo, dándose los valores más altos de sólidos totales disueltos (STD) en el sureste del valle, donde se llega a exceder los 10,000 mg/l debido a la intrusión salina (INEGI, 1993). Aunque esta es una de las causas para la salinización del agua, no es la única, existe además la contaminación por fertilizantes o pesticidas (Canales, 1986).

El acuífero del Valle del Yaqui se compone de una sola unidad hidroestratigráfica, como si se tratará de un solo paquete de sedimentos que aún cuando tienen sus variantes de permeabilidad, de comportamiento como semiconfinado, libre o confinado y de calidad de agua, no permite establecer una separación de acuíferos en superior o inferior como en la Costa de Hermosillo (Canales, 1987).



## V. Resultados y discusión

### a) Modelación e interpretación

La localización de los sondeos eléctricos verticales (SEV's) que corresponden a las zonas del valle de Hermosillo y el Sahuaral y la zona del valle del Yaqui, tienen una distribución en una malla de forma más o menos regular. La distribución se puede observar en las Figuras V.1 y V.2.

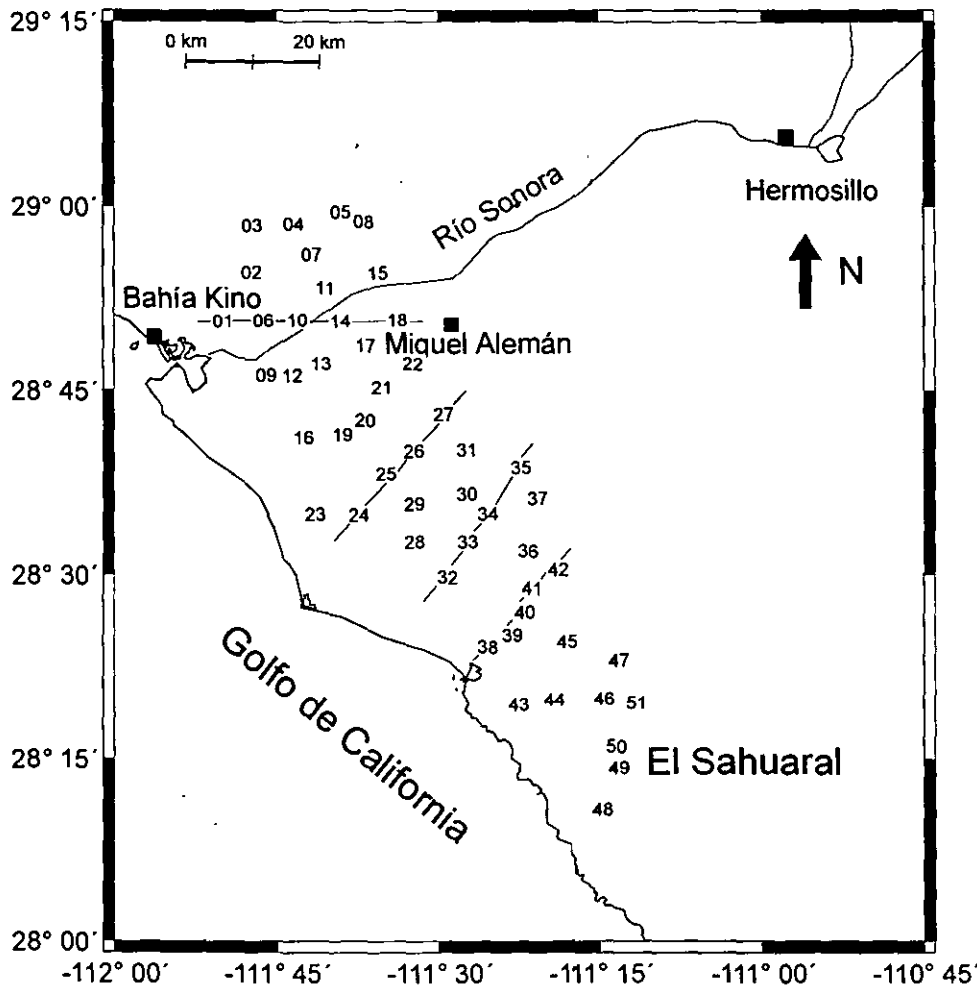


Figura V.1. Ubicación de los 51 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) en el valle de Hermosillo y el Sahuaral en el Estado de Sonora, México.

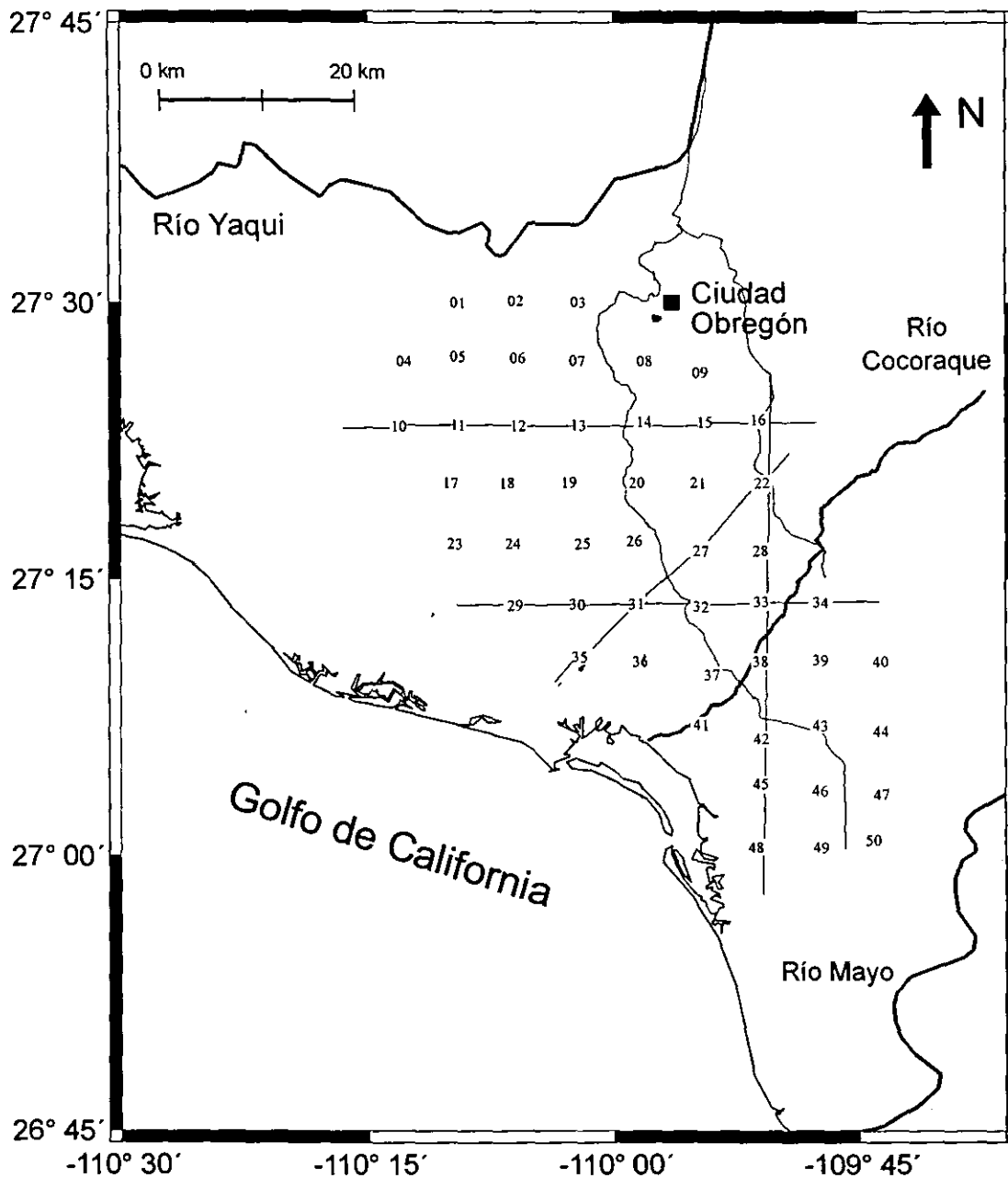


Figura V.2. Ubicación de los 50 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) en el valle del Yaqui.

Con los modelos calculados a partir de la teoría de un medio estratificado de capas planas, horizontales e isotrópicas a partir de las ecuaciones que van de la 7 a la 16 se

ajustaron las curvas de resistividad aparente con respecto a la sintética generada con un error promedio del 7% donde el límite de aceptación general fue del orden del 10% para cada uno de los sondeos. Como ejemplos de estos ajustes se tienen la siguientes Figuras:

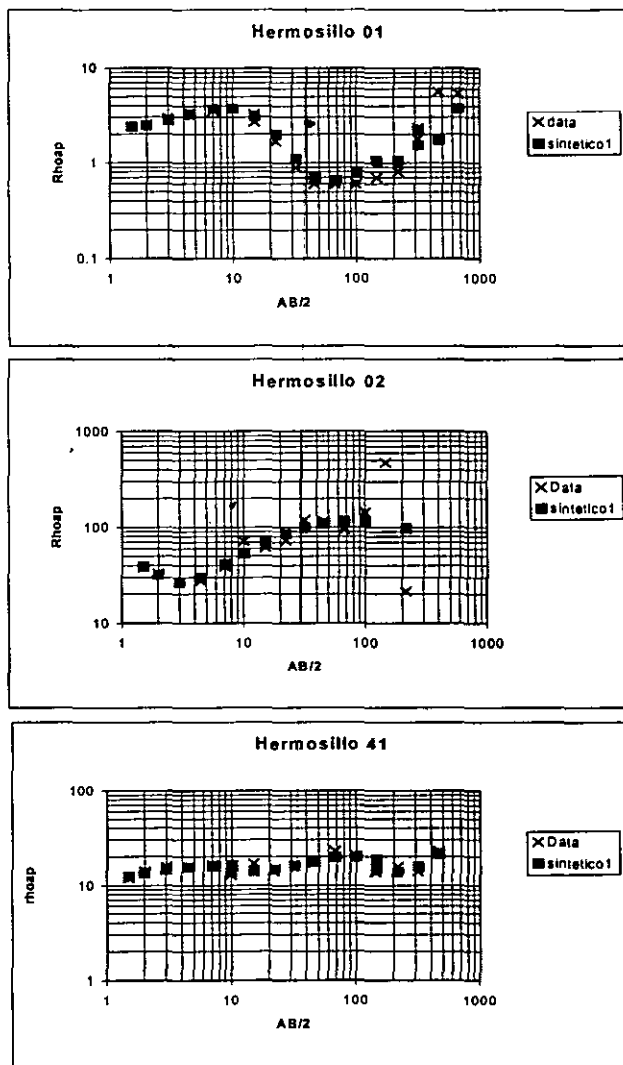


Figura (V.3a...V.3c). Curvas de resistividad aparente para los sondeos 01, 02 y 41 para el caso del valle de Hermosillo (datos de campo y curva sintética).

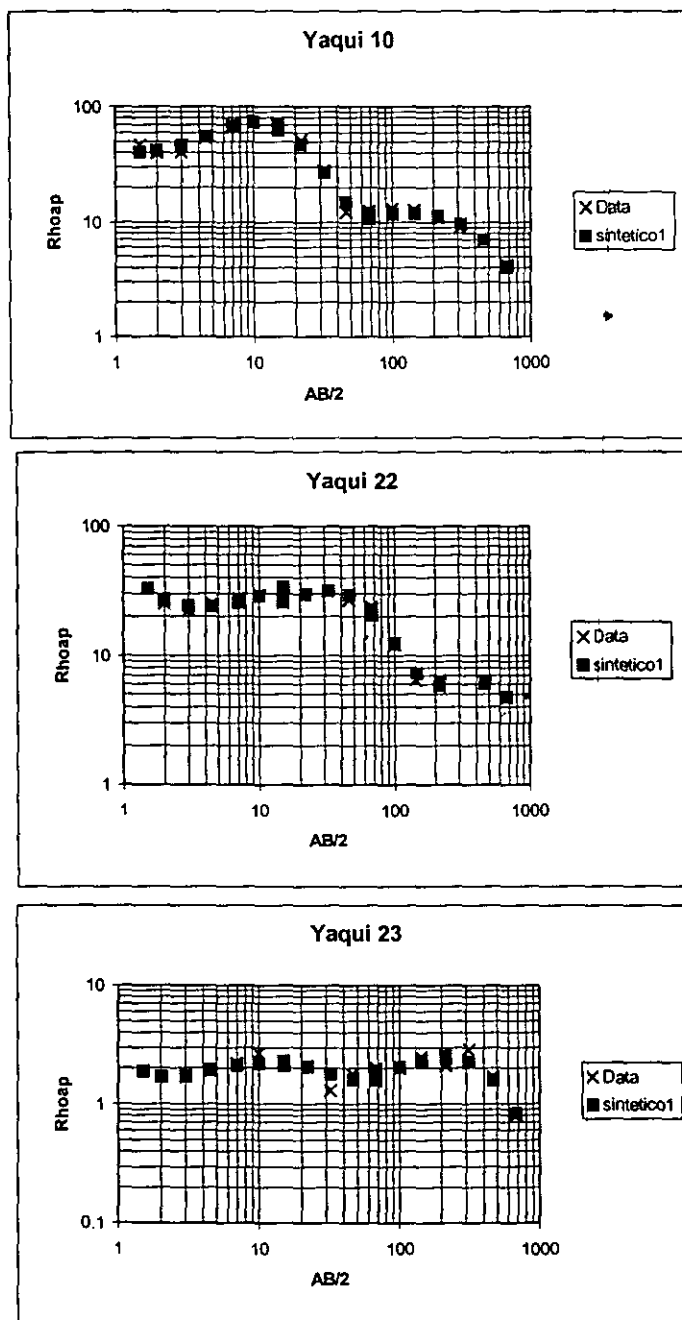


Figura (V.3d..V.3f). Curvas de resistividad aparente de los sondeos 10, 22 y 23 para el valle del Yaqui (curva de campo y sintética).

En 5 sondeos en la zona de estudio de Hermosillo (ej. sondeo Hermosillo 02); existieron valores no reproducibles a partir de la lectura de AB/2 de 100 o 145 m. Al no concluirse estos

sondeos hasta la apertura propuesta de 675 m, no se incluyeron en la interpretación. Los modelos que se usaron en ambos casos (Hermosillo y el Yaqui) fueron generalmente de 5 capas para casi todos los casos y se cuidó que correspondieran con los conocimientos geológicos que se tenían previos a este trabajo (perforación de pozos, rasgos geológicos superficiales, etc.).

Se hicieron secciones geoelectricas para determinar la zona vadosa y la zona saturada (Figura V.4a...IV.4d). Se consideró un valor límite para diferenciar la zona saturada de la zona vadosa. El valor para el caso de Hermosillo fue de 25 ohm-m. Este valor fue elegido debido a que en las secciones geoelectricas se observa que las curvas se vuelven más cerradas arriba de los 25 ohm-m y la variación se suaviza para el caso de valores menores, además los valores de resistividades reales de la capa superior (zona vadosa) van de los 25 ohm-m hasta los 180 ohm-m.

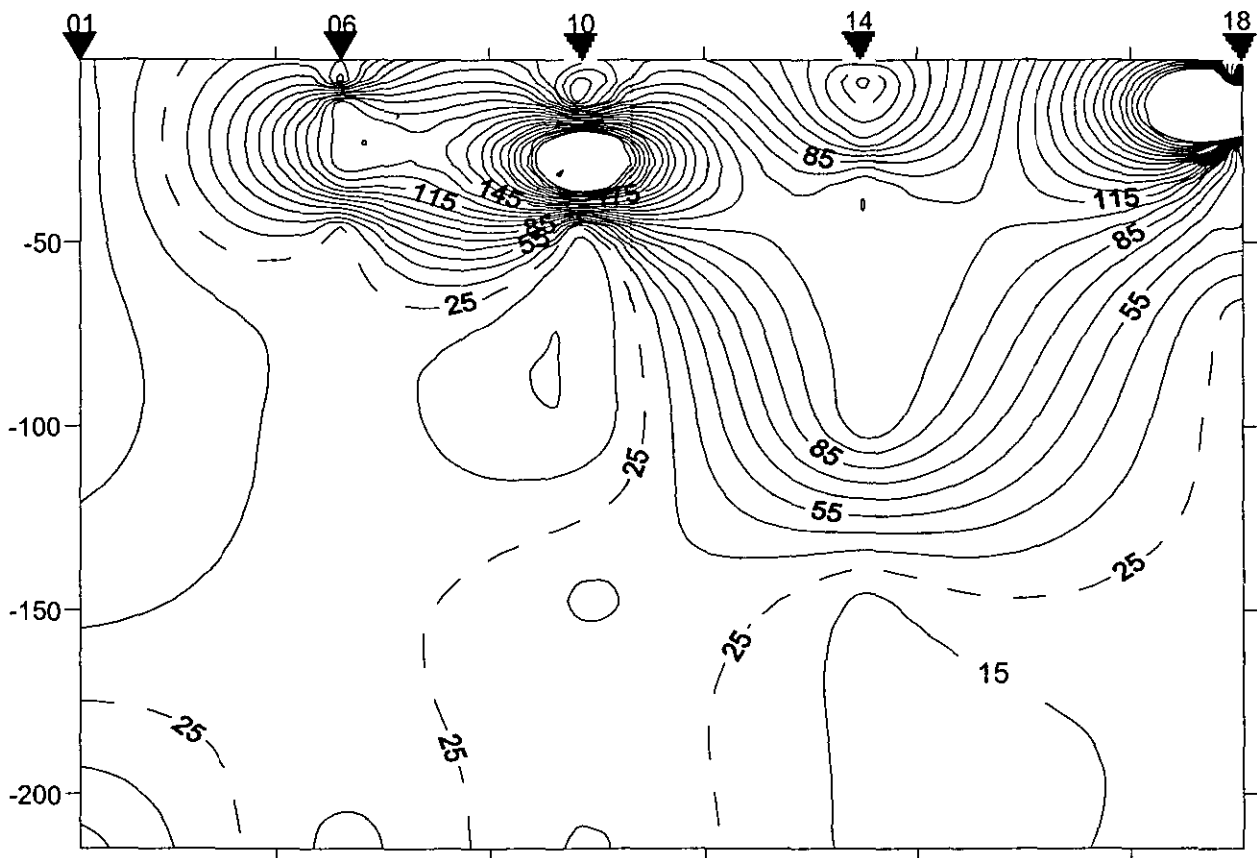


Figura V.4a. Sección geoelectrica presentada de oeste a este que pasa por los sondeos Hermosillo 01, 06, 10, 14 y 18, (ver Figura V.1 para ubicación).

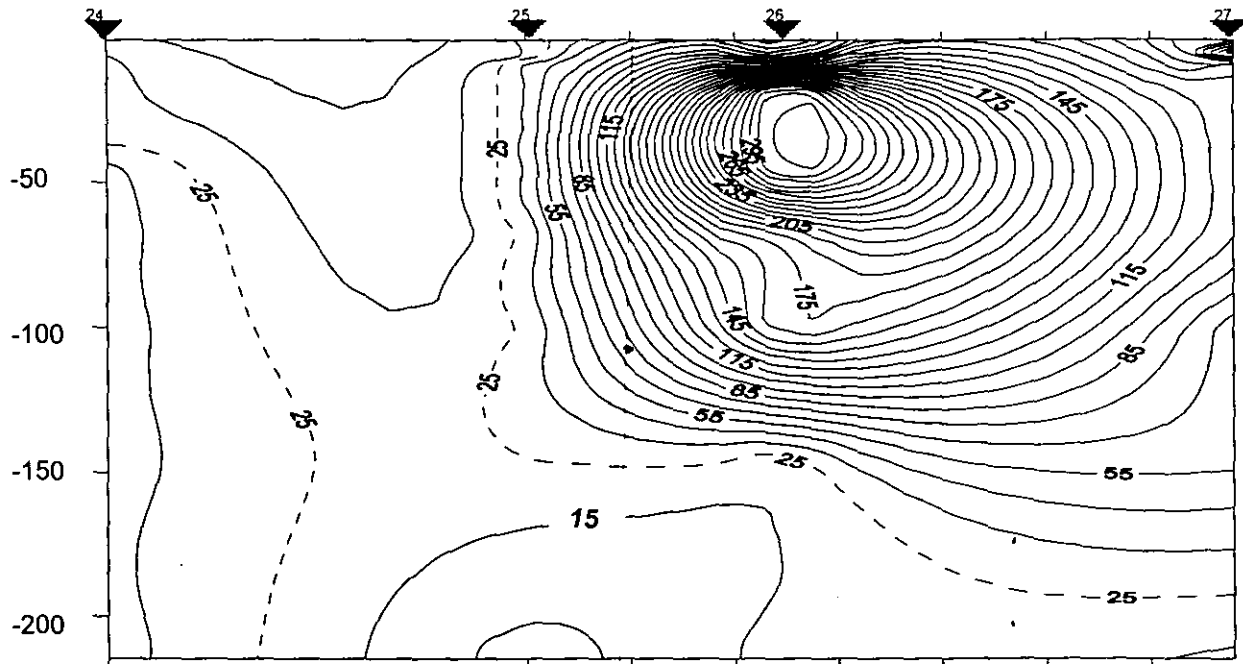


Figura V.4b. Sección geoelectrica presentada de la línea de costa hacia tierra adentro, pasando por los SEV's Hermosillo 24, 25, 26, 27, (ver Figura V.1 para ubicación).

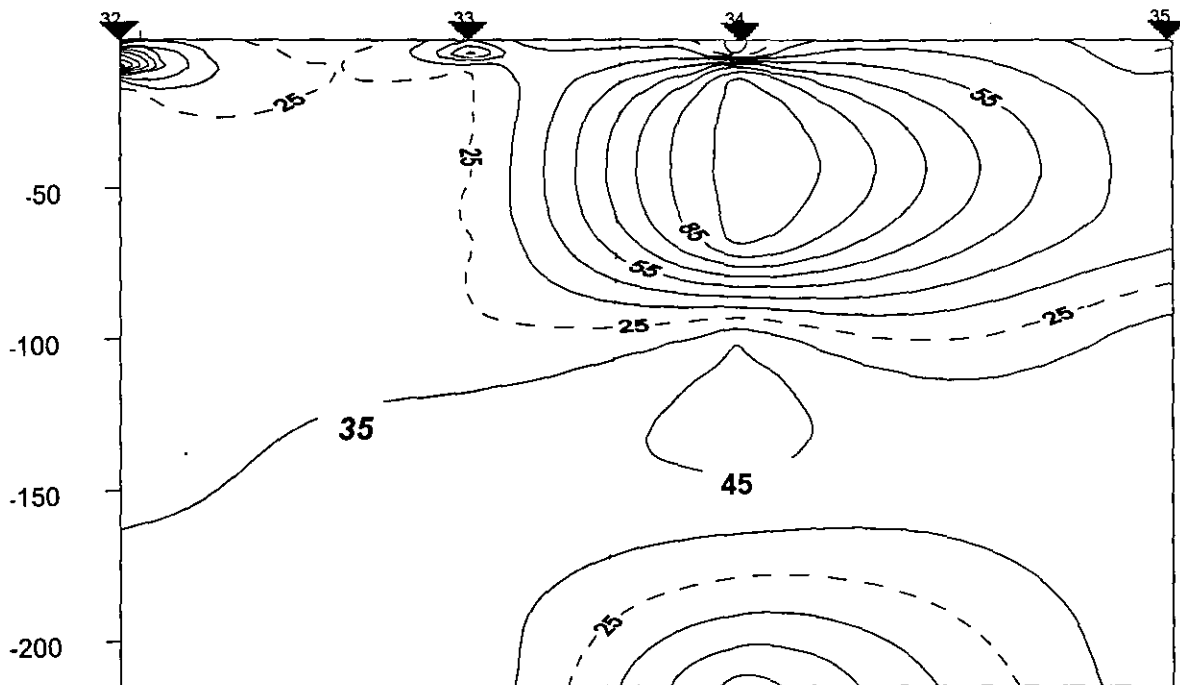


Figura V.4c. Sección geoelectrica paralela a la 24-27 y que abarca los SEV's 32, 33, 34, y 35, (ver Figura V.1 para ubicación).

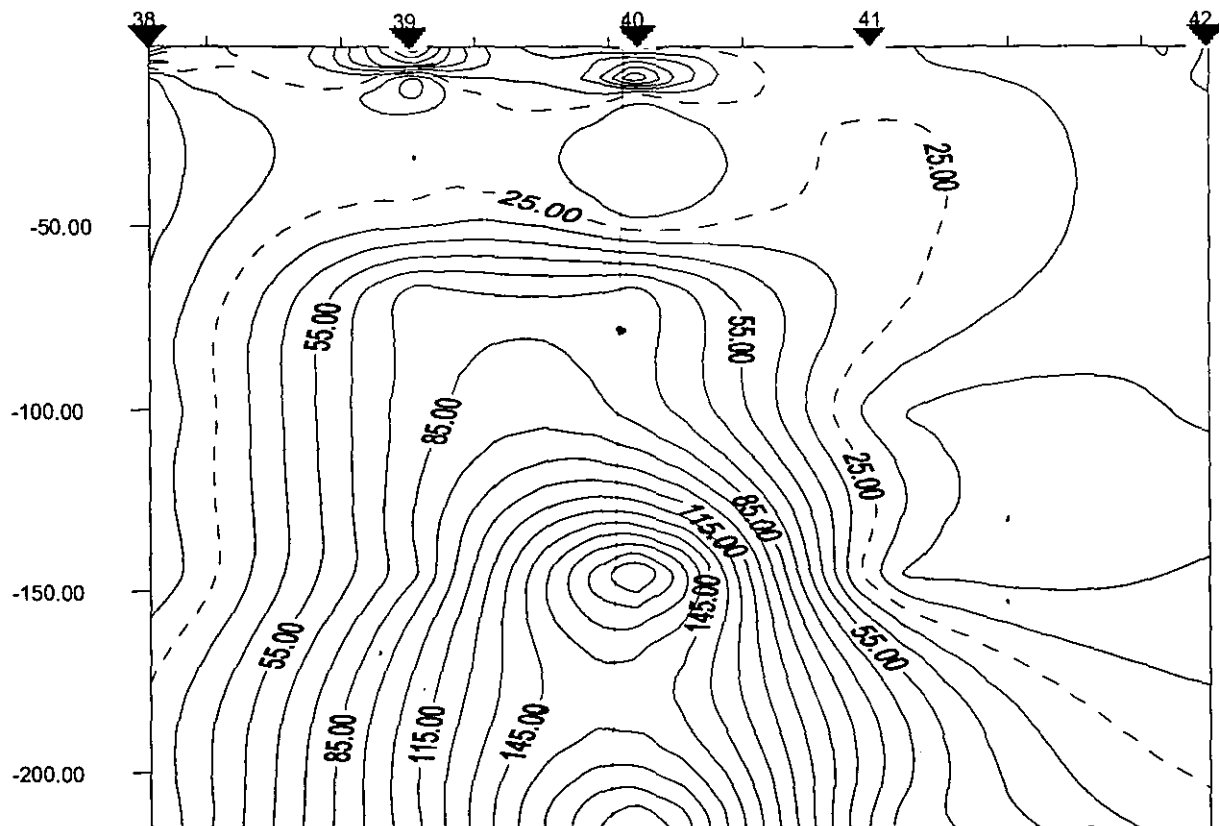


Figura V.4d. Sección Hermosillo 38-42 que pasa por los SEV's Hermosillo 38, 39, 40, 41 y 42, (ver Figura V.1 para ubicación)

El valor que se escogió como valor límite corresponde a la separación de zona vadosa y saturada, en algunos casos se observa que tierra adentro la capa superior crece hasta llegar a ser de 150 m. La resistividad de la zona superior es muy alta como en el caso de las secciones 01-18 y 24-27, en donde es superior a los 200 ohm-m. Acorde a la geología (Capítulo IV.), esta zona superior puede representar el material resistivo de rocas como lo son algunos intrusivos que existen en la zona. Para el caso del Yaqui el valor propuesto fue tres veces menor (8 ohm-m) ya que las secciones geoelectricas muestran diferencias notables (Figura V.5a..V.5d).



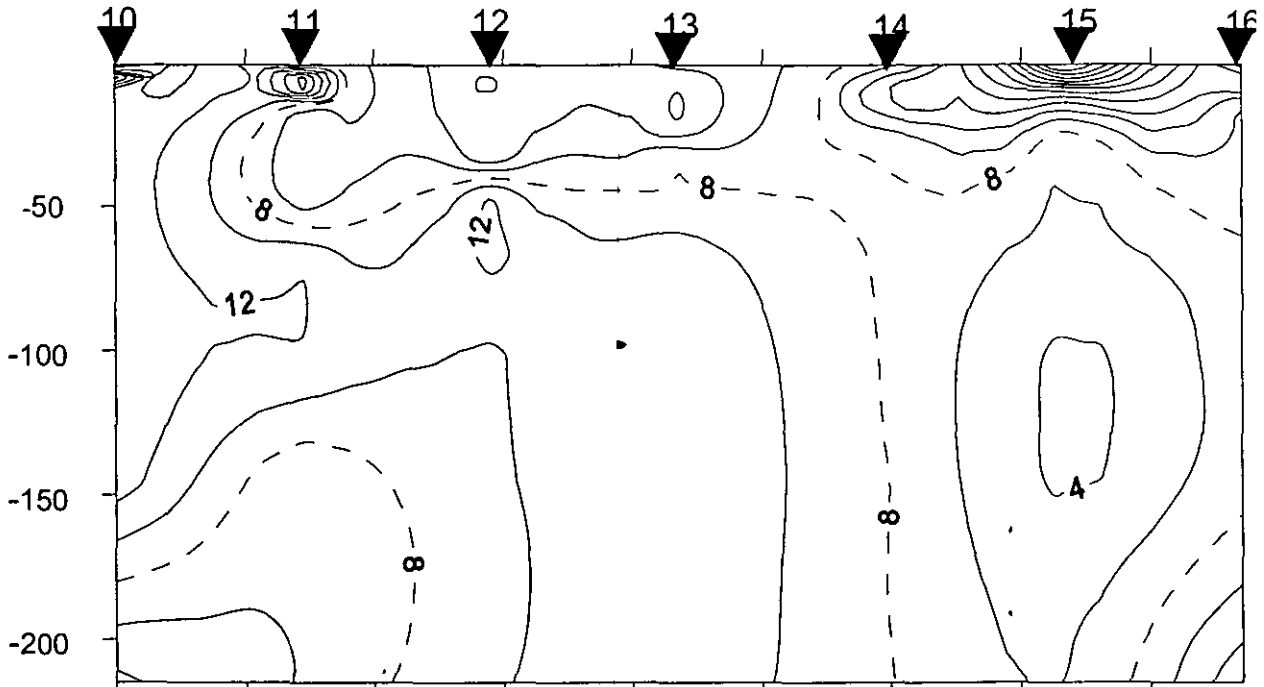


Figura V.5a Yaqui 10-16 que va de oeste a este y pasa por los sondeos 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16, (ver Figura V.2 para ubicación).

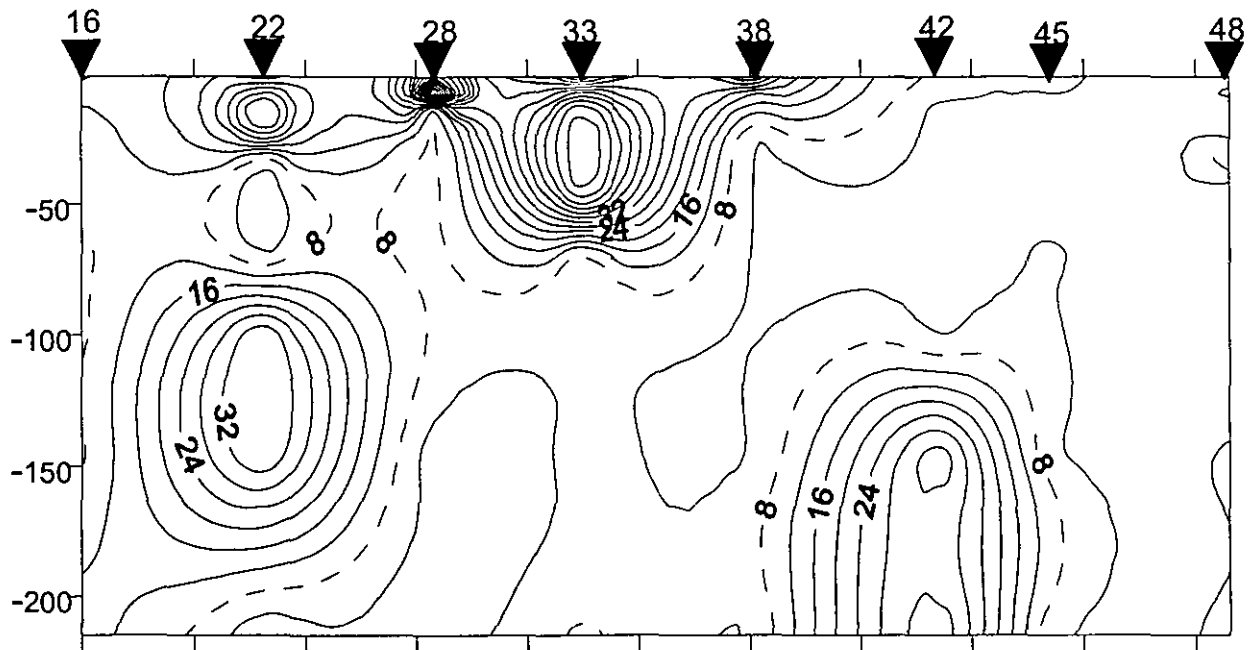


Figura V.5b. Sección geoelectrica Yaqui 16-48. Presentada de norte a sur e incluye los SEV's Yaqui 16, 22, 28, 33, 38, 42, 45 y 48, (ver Figura V.2 para ubicación).

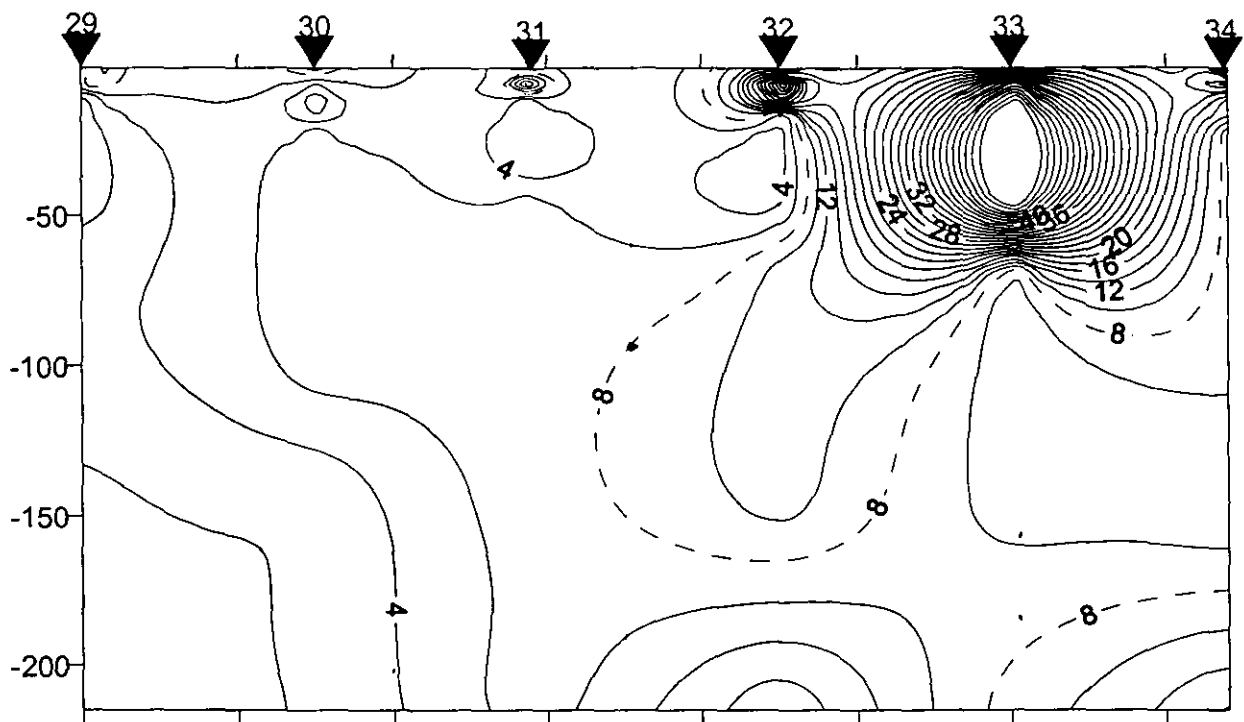


Figura V.5c. Sección Yaqui 29-34. De oeste a este, pasando por los SEV's Yaqui 29, 30, 31, 32, 33 y 34, (ver Figura V.2 para ubicación)..

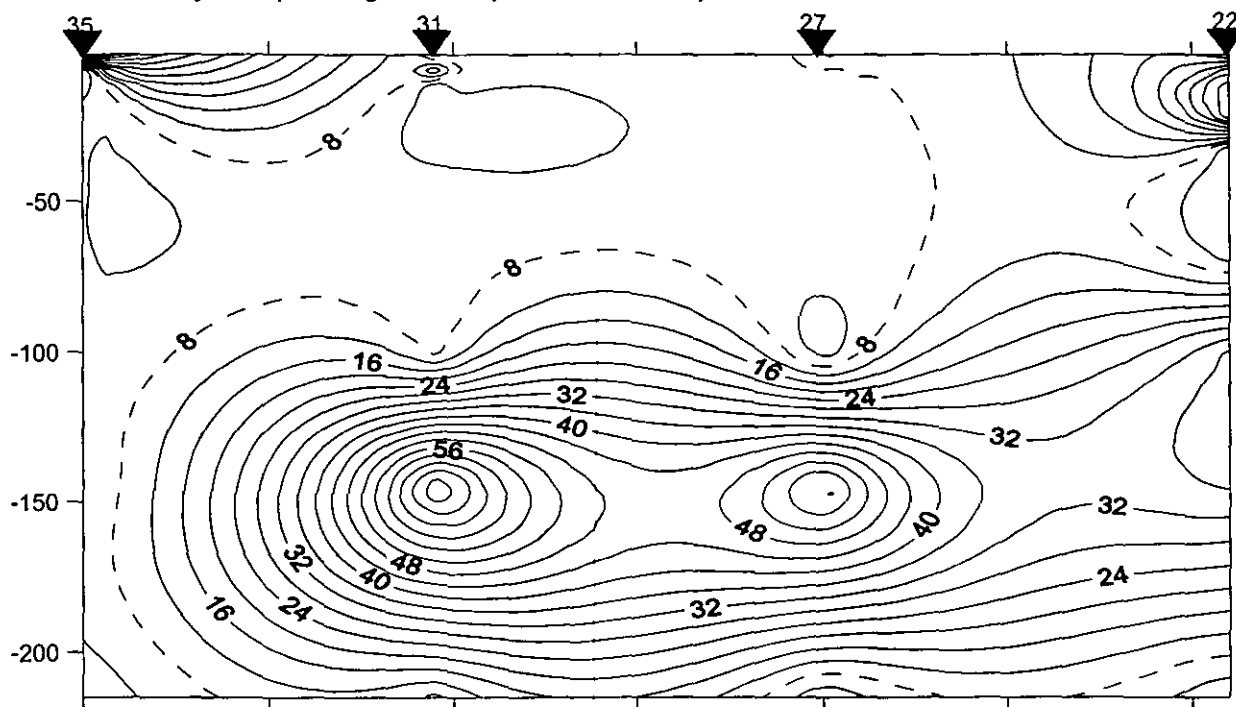


Figura V.5d. Sección Yaqui 35-22, perpendicular a la costa y pasa por los SEV's 35, 31, 27 y 22, (ver Figura V.2 para ubicación).

La diferencia más notable que se observa en estas secciones, es que las resistividades verdaderas del Valle de Hermosillo y el Sahuaral son en general mucho más altas (ej. 150 ohm-m en la zona vadosa de la Figura V.4a. contra 38 ohm-m también de zona vadosa de la Figura V.5d.) tanto en la zona vadosa como en la zona saturada, por lo que la línea límite de 15 ohm-m del valle del Yaqui se consideró como un valor que puede oscilar dependiendo del área. Con los resultados se procedió a realizar un análisis de sensibilidad utilizando las distintas expresiones para saturación y calidad de agua. Antes de determinar que tipo de ecuación se utilizaría para cada zona se hizo un análisis geológico con el fin de zonificar de acuerdo a lo que se sabe de geología superficial (Figura IV.2 y IV.6) de ambas zonas. Además se realizó un análisis gráfico con respecto a los sondeos realizados para observar tendencias regionales. Se observaron los tipos de curvas para cada zona y se realizó un mapa con estos tipos de curvas (Figura V.6 y Figura V.7).

En la clasificación de curvas (de acuerdo a Orellana, 1980) para el caso de Hermosillo estas son del tipo HK a excepción de unas cuantas del tipo Q en la zona del Yaqui. Para el caso del Yaqui la mayoría de las curvas son del tipo HK, la clasificación de curvas indica que las curvas tipo HK, corresponden a un modelo de cuatro capas donde la primera capa tiene alta resistividad, la segunda es de menor resistividad que la primera, a su vez la tercera es de mayor resistividad que la segunda y la última es de menor resistividad que la tercera. Así se tiene también, que una curva tipo Q es una curva descendente, esto es, que la resistividad de la segunda capa es menor que la primera y así sucesivamente. En las Figuras V.6 y V.7 se indica el tipo de modelos que se tienen para las capas de la sección geoelectrica y también muestra que al menos en cuanto al comportamiento de las curvas, los modelos que se obtuvieron para el Valle de Hermosillo son similares a las del Valle del Yaqui, excepción hecha para la zona del Sahuaral.

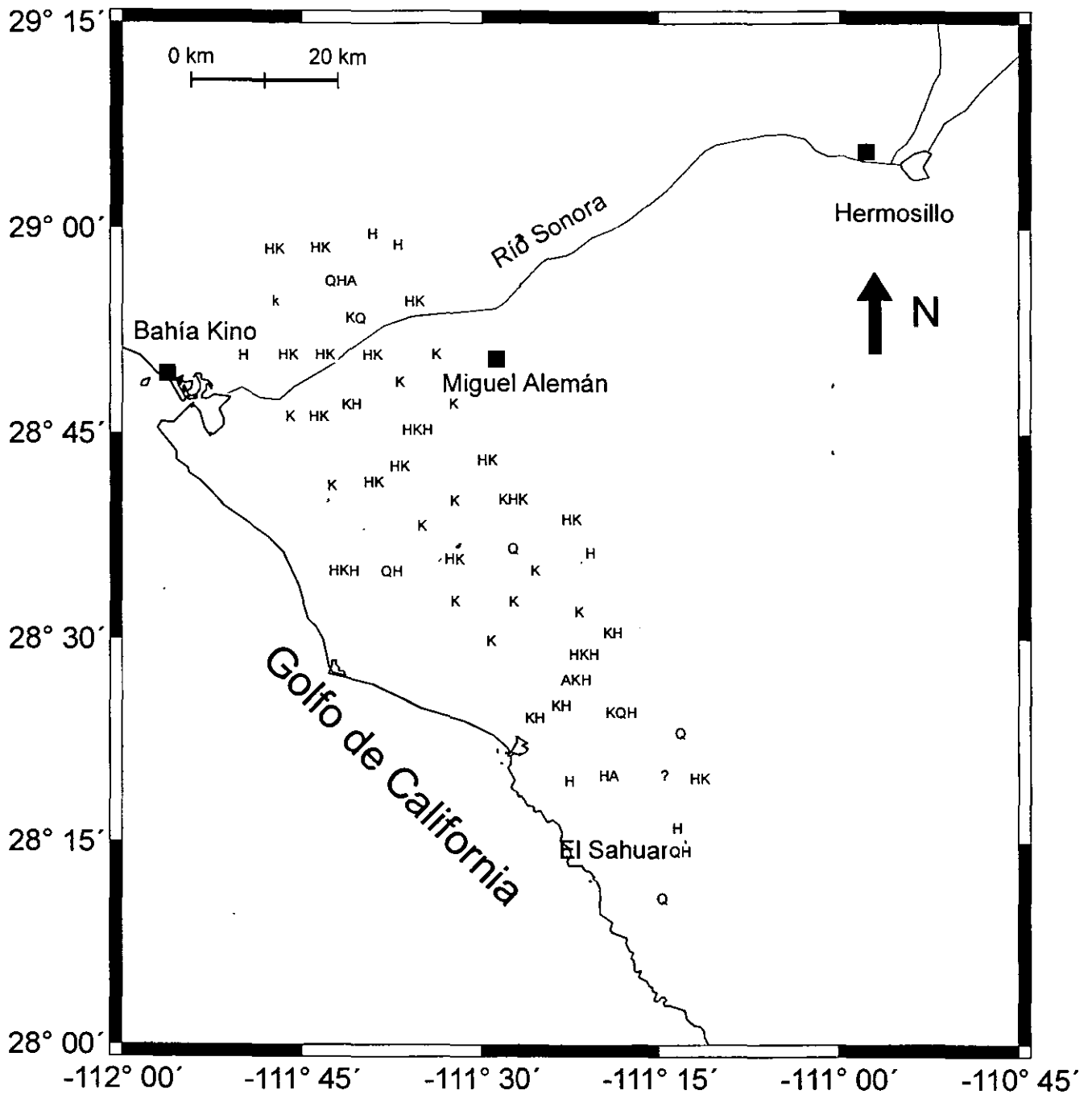


Figura V.6. Clasificación del Tipo de Curvas en el Valle de Hermosillo y el Sahuaral, de acuerdo a Orellana, 1982.

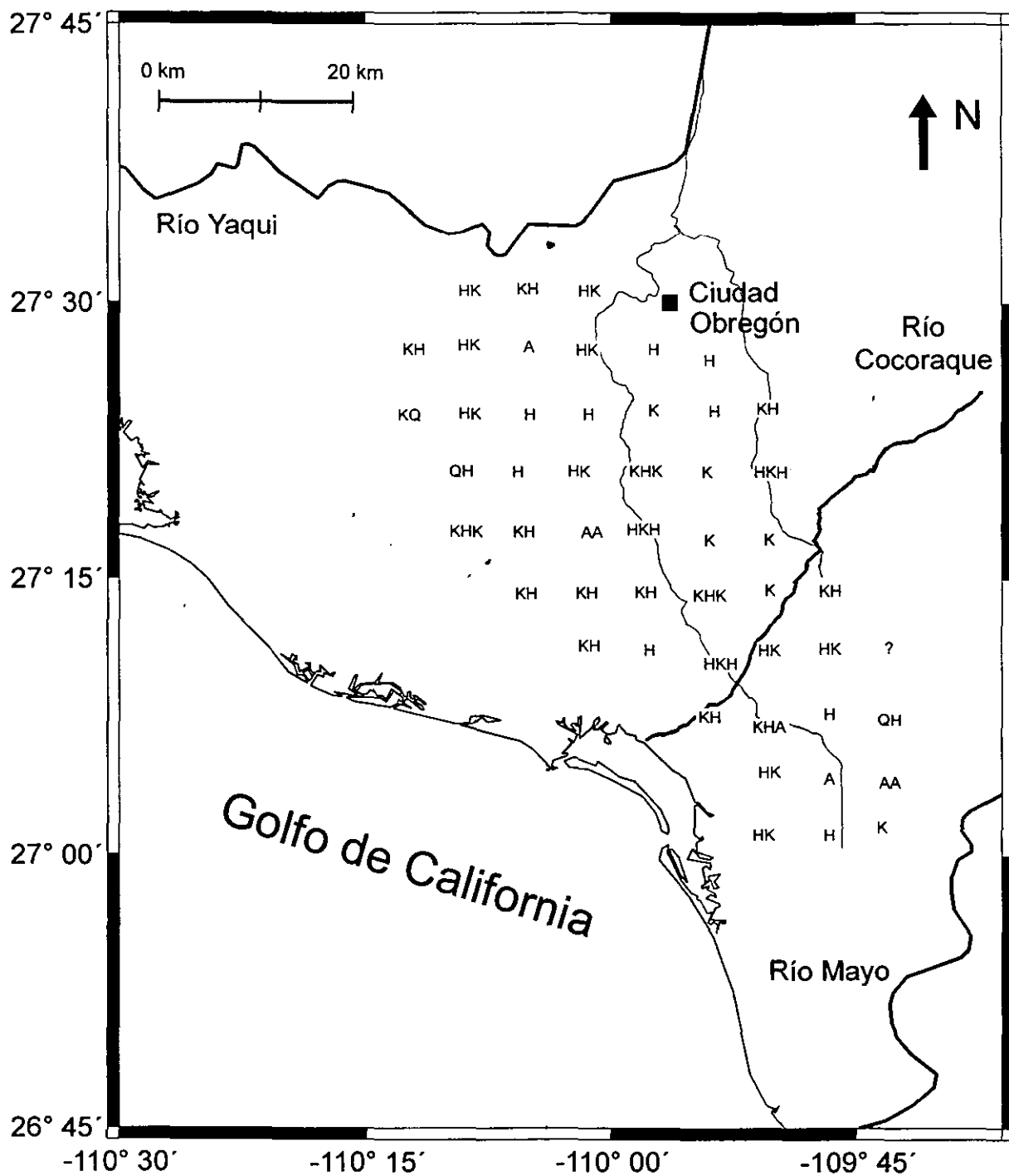


Figura V.7. Clasificación del Tipo de Curvas en el Valle del Yaqui, de acuerdo a Orellana, 1982.

## **b) Análisis de sensibilidad de las curvas de resistividad aparente en el caso de la saturación**

A partir de la zonificación propuesta, las ecuaciones que se usaron fueron: la ecuación (1) para obtener el factor de formación, luego a partir de la Ley de Archie (Ecuación 2) en el caso de Hermosillo en la zona norte y para la zona del Sahuaral (al sur) se usó la ecuación de Simandoux (Ecuación 3). Para el valle del Yaqui, se usaron las ecuaciones de Simandoux (Ecuación 3) y la de Poupon et al (Ecuación 4). Para propósito de este estudio algunos valores que alimentan las ecuaciones fueron tomados de publicaciones o trabajos anteriores (Gorman y Kelly, 1990; Steinich et al, 1997, Keller y Frischknecht, 1966 y McNeill, 1980). Se consideró:

Ecuación 2:

$$a=2.15$$

$$m= 2.20$$

Ecuación 3:

$$V_{SH} = (\text{Dependía de la zona, pero fue del 10\% al 30\%})$$

$$C_{SH} = 2.3 \text{ ohm-m}$$

$$\epsilon = 1 \text{ para zona saturada y } \epsilon = 0.7 \text{ para zona vadosa}$$

Ecuación 4:

$$F=20$$

Con estos datos y la aplicación de las ecuaciones anteriores se obtienen la porosidad para cada zona (vadosa o saturada) y el factor de formación (Tabla V.1):

Una vez obtenidos los valores de porosidad se aplicó la ecuación de Keller (Ecuación 4 ó 5) para obtener un valor inicial de saturación de agua para zona vadosa en las dos áreas. Esta saturación inicial fue calculada para cada uno de los sondeos y los valores van de 10% a 20% en el Valle de Hermosillo, 05% y 15% en el Sahuaral y para el Yaqui de 15% al 30%.

Tabla V.1. Relación del factor de formación y la porosidad estimada para Hermosillo y el Sahuaral (los dos primeros renglones) y el Valle del Yaqui (los dos últimos renglones)

Rango de porosidad	Zona de aplicación		Factor de formación
	Saturada	Vadosa	
0.15-0.37		xxx	$F=2.15\phi^{-2.21}$
0.07-0.31	xxx	xxx	$F=1.70\phi^{-1.80}$
0.09-0.22	xxx		$F=1.80\phi^{-1.64}$
0.07-0.19	xxx	xxx	$F=2.30\phi^{-2.15}$

La utilización de distintas ecuaciones en los dos casos obedece a las condiciones geológicas para cada uno, así se tiene que en el Valle de Hermosillo, se consideró un medio con predominancia de areniscas sobre arcillas en la zona vadosa con una saturación crítica menor al 25%. El caso del Valle del Yaqui es diferente ya que debido a ser una zona activa de cultivo por riego, la saturación crítica para la zona vadosa es mayor al 25%, además por información geológica se sabe que existe una mayor cantidad de arcilla que en el caso de Hermosillo.

De las secciones geoelectricas también se infiere la existencia en ambos casos (Yaqui y Hermosillo) de zonas intermedias entre la zona vadosa y la zona saturada, además de que se pueden determinar zonas de alta o baja permeabilidad (Steinich y Chavarría, en prensa). Con los valores iniciales (Tabla V.1) se procedió a realizar el análisis de sensibilidad que consistió en fijar los valores anteriores (Sección V.a) en cada curva de resistividad aparente, generar modelos teóricos, calcular la curva de resistividad aparente para estos modelos y

comparar los dos tipos de curvas con un error por diferencia para los puntos de la curva (Figura V.8a..8c; Tabla V.2).

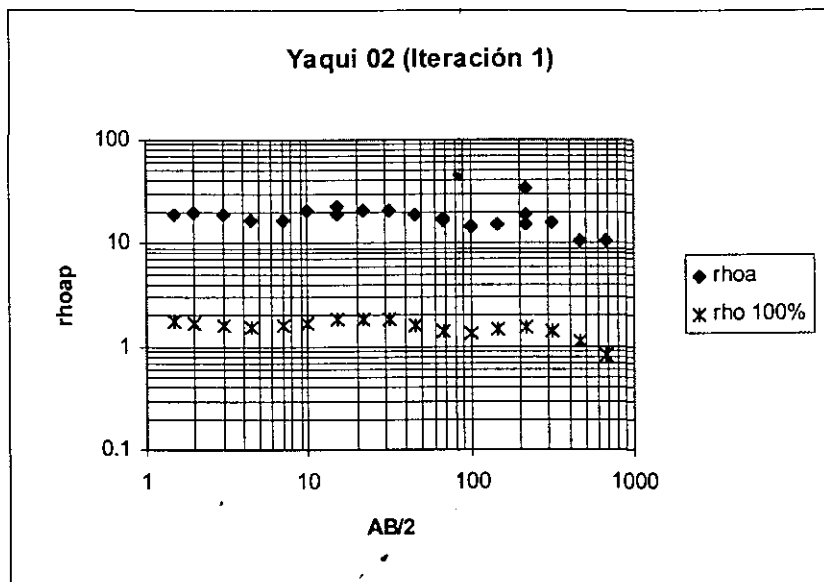


Figura V.8a. Proceso iterativo para cada una de las curvas de los sondeos (ejemplo sobre la curva Yaqui 02)

Tabla V.2. Datos que alimentaron la primer iteración para el sondeo Yaqui 02.

capa	espesor	resistividad	saturación	$\rho_1$
1	1.92	19.9	0.3	1.791
2	1.07	9.5	0.3	0.855
3	26.09	23.5	0.3	2.115
4	0.95	0.27	0.3	0.0243
5	27.96	40.6	0.3	3.654
6	0.28	14.6	0.3	1.314
7	62.36	31.5	0.3	2.835
8		5.9	0.3	0.531



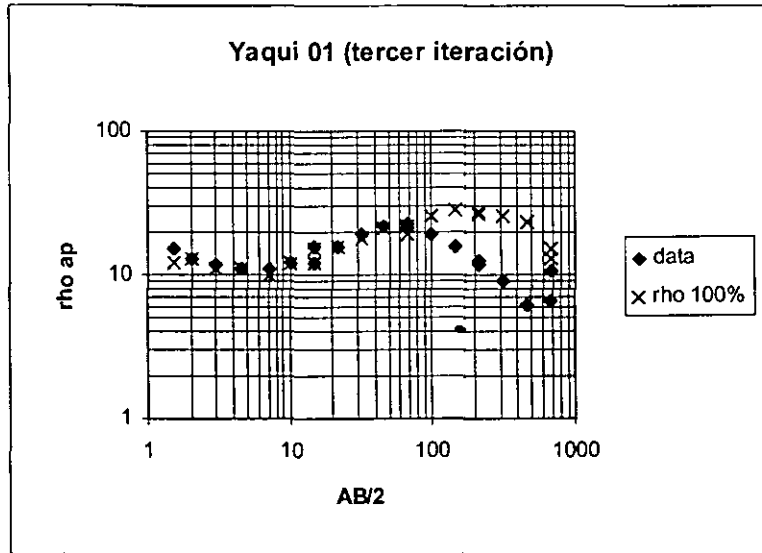


Figura V.8b. Tercer iteración sobre la curva de resistividad aparente del sondeo Yaqui 01.

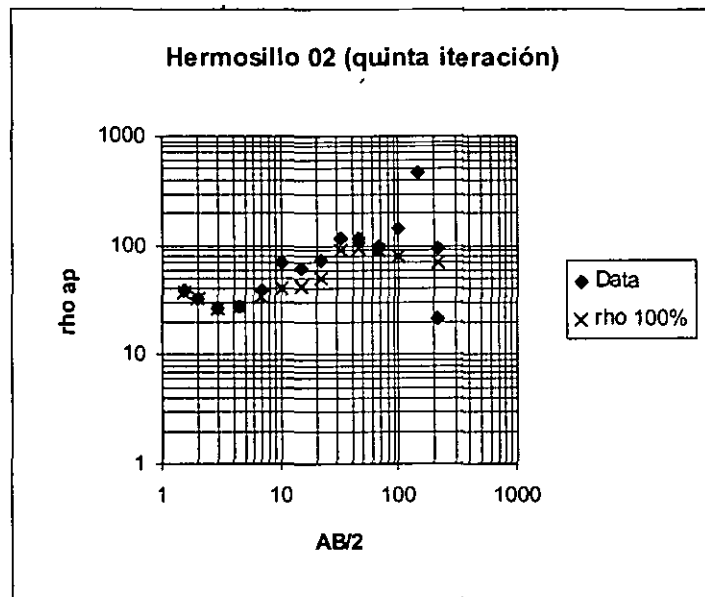


Figura V.8c. Quinta iteración sobre la curva de resistividad aparente variando la saturación de agua en el ejemplo Hermosillo 02.

Como se puede observar en las figuras anteriores (Figuras V.8 a, b y c), conforme se iba incrementando el proceso iterativo las curvas se iban acercando más a la curva de campo, en general para todas las curvas se encontró una aproximación hasta después de la 6ª iteración, para el caso de Hermosillo y el Sahuaral la influencia que se observó fue muy grande, demostrando así que en

esta zona la curva se muestra muy sensible a los cambios de saturación (Figura V.9 a, b y c)

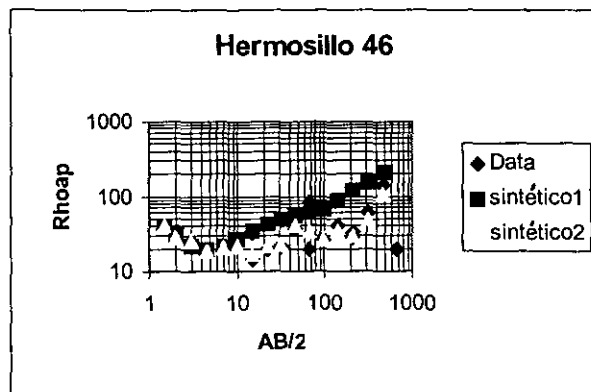
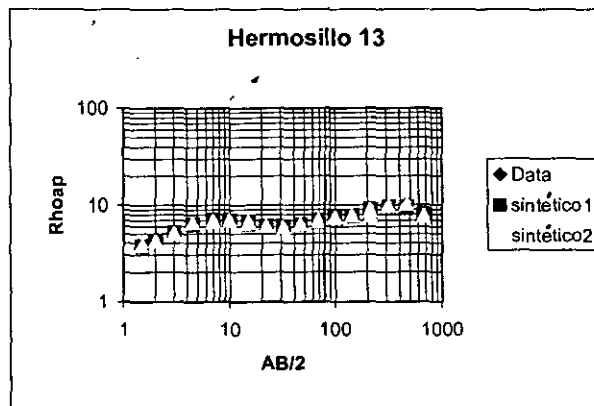
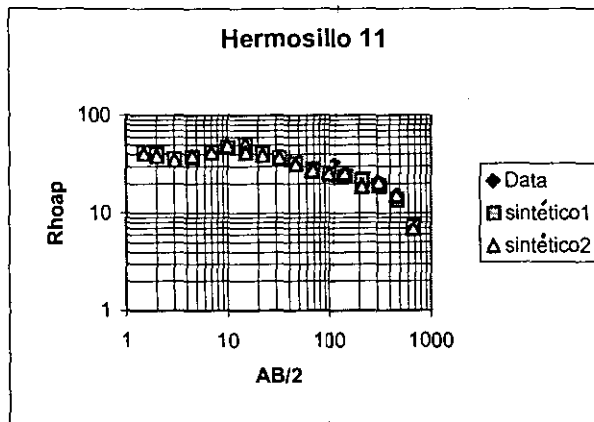


Figura V.9a...9.c. Curvas de resistividad aparente después del análisis de sensibilidad de la saturación, donde el sintético 1 es la curva del modelo inicial y el 2 es el resultado del análisis

El ajuste de curvas por medio de los sintéticos en el valle de Hermosillo es más sensible a los cambios en saturación de agua, la diferencia entre el ajuste del sintético 1 al del ajuste del 2 es mayor. En el valle del Yaqui no resultó tan sensible y la diferencia entre sintéticos es muy poca (Figura V.10a..V.10c). Los cambios entre los sintéticos 1 y 2 del valle del Yaqui no son distinguibles a pesar de que las variaciones en la saturación sean fuertes? Por lo anterior, propongo que las curvas de resistividad aparente en el valle de Hermosillo son sensibles en cuanto a la saturación y no resulta así en el valle del Yaqui.

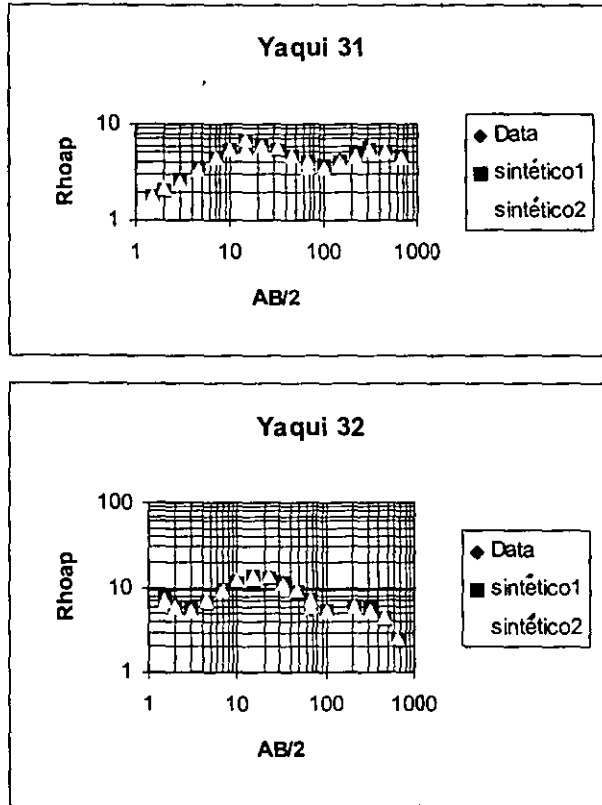


Figura V.10a y V.10b. curvas de resistividad aparente para los ejemplos Yaqui 31 y 32. El sintético 1 es el resultado del primer modelo, el sintético 2 es el resultado del análisis de sensibilidad.

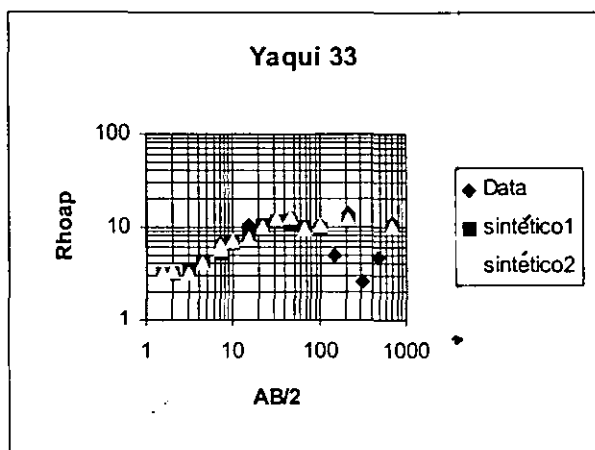


Figura V.10c. Curva de resistividad aparente para el sondeo Yaqui 33.

Finalmente los resultados del análisis se muestran a manera de resumen en las siguientes tablas.

Tabla V.3. Desviación Estándar (Valle del Yaqui)

Vadosa		Interfase		Acuífero	
Sw (%)	% de desviación	Sw (%)	% de desviación	Sw(%)	% de desviación
100-80	60	100-80	55	100-80	40
80-60	35	80-60	46	80-60	20
60-40	30	60-40	15	60-40	35
40-20	18	40-20	27	40-20	54
20-0	13	20-0	35	20-0	69

Tabla V.4. Desviación Estándar (Valle de Hermosillo)

Vadosa		Interfase		Acuífero	
Sw (%)	% de desviación	Sw (%)	% de desviación	Sw(%)	% de desviación
100-80	75	100-80	65	100-80	55
80-60	40	80-60	45	80-60	35
60-40	31	60-40	35	60-40	17
40-20	22	40-20	16	40-20	33
20-0	12	20-0	18	20-0	63

Tabla V.3a. Valores apropiados para la saturación del agua. Caso del Valle de el Yaqui

Zona (Unidad hidroestratigráfica)	Saturación de agua ( $S_w$ )
Vadosa	20%
Interfase	35%
Acuífero	65%

Tabla V.4a. Valores apropiados para la saturación del agua. Caso del Valle de Hermosillo

Zona (Unidad hidroestratigráfica)	Saturación de agua ( $S_w$ )
Vadosa	10%
Interfase	22%
Acuífero	50%

### **c) Análisis de sensibilidad de la curva de resistividad aparente con los datos de la calidad del agua**

De las secciones geoelectricas V.5a a 5d, valle del Yaqui se puede ver todavía una característica más; con respecto a la curva de 15 ohm-m que se usó en el valle del Yaqui se observa que hacia la parte superior (zona vadosa) se tienen valores de resistividades en algunos casos más bajos de lo esperado, esto probablemente se deba a la salinización de suelos por fertilizantes que han reportado algunos autores (González, 1993) y que afecta de manera más notoria a esta área debido al uso de un sistema de canales que colecta agua de pozos, aguas superficiales y las aguas que sobran del sistema de riego, mezclándolas y volviendo a ser utilizadas hasta su destino final, el Golfo de California. Este resultado lleva a pensar en el otro factor que es la calidad de agua.

En base a los datos que se tienen de conductividad del agua y de STD en el agua de pozos (Figura V.11 y V.12) (Marín et al, 1996; González, 1993), se realizó un mapa de isoconductividad para el caso de Hermosillo y otro para el Yaqui (Figura V.13a y V.14a) así como un mapa de isolíneas para la cantidad de sólidos totales disueltos (Figura V.13b y V.14b) para cada una de estas zonas.

En los mapas de isolíneas se observa una concentración de STD de hasta 1000 mg/l en la zona sur del valle de Hermosillo así como concentraciones en otras dos zonas alineadas con la costa. En el caso del valle del Yaqui la concentración se observa en las zonas habitadas, especialmente en lo que se denomina el acuífero norte y sur aunque esto se deba posiblemente a que también ahí está la mayor concentración de pozos. Los mapas de isoconductividad también presentan este mismo comportamiento, la diferencia entre un caso y el otro, son

las cantidades de STD, siendo más alta la concentración de STD en el valle del Yaqui.

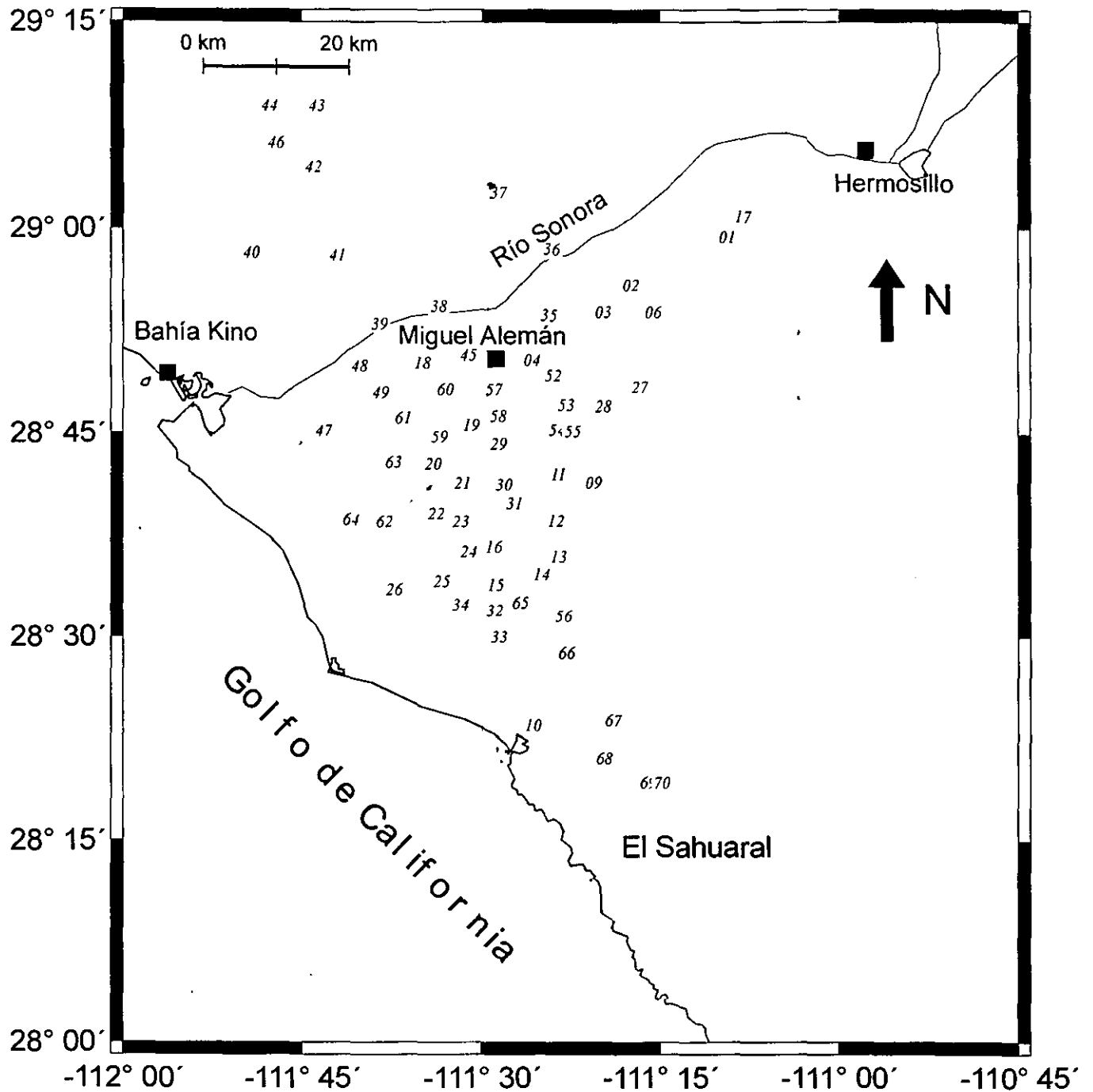


Figura V.11 Ubicación de los pozos de agua en el valle de Hermosillo y el Sahuaral.

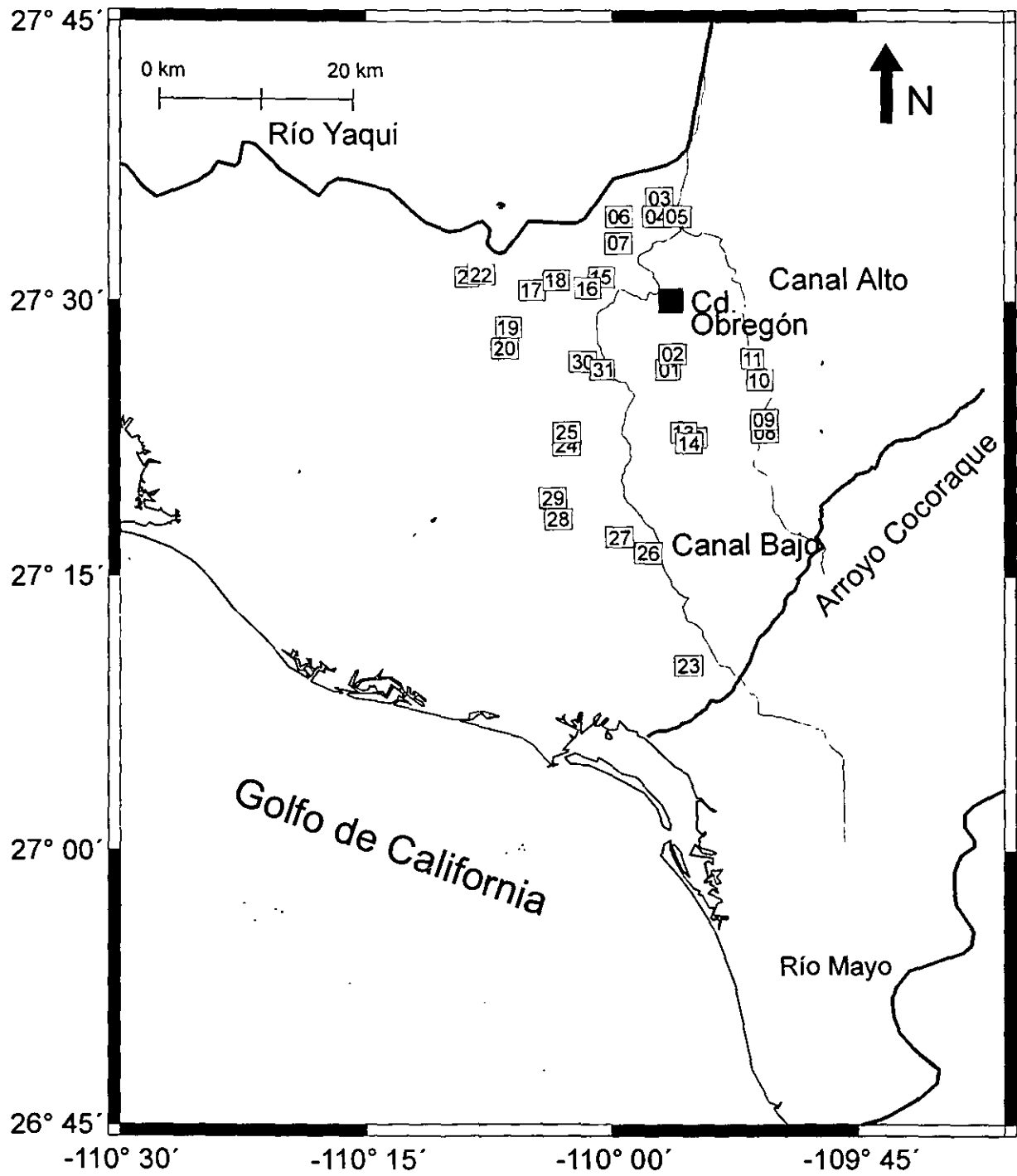


Figura V.12 Ubicación de los pozos de agua en el valle del Yaqui, Sonora.



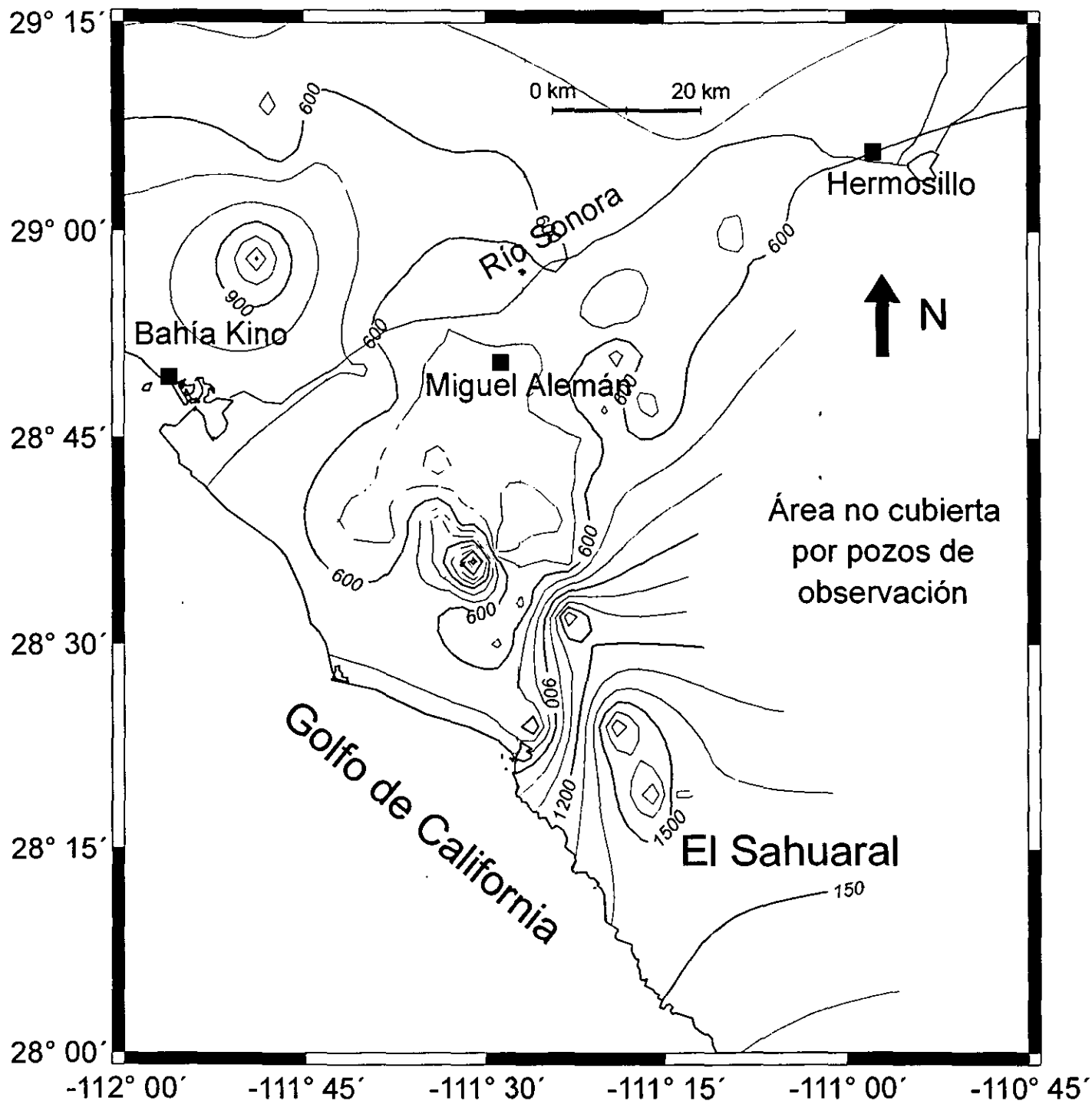


Figura V.13 a. Mapa de Isoconductividad eléctrica en el agua de pozos del Valle de Hermosillo y el Sahuaral.

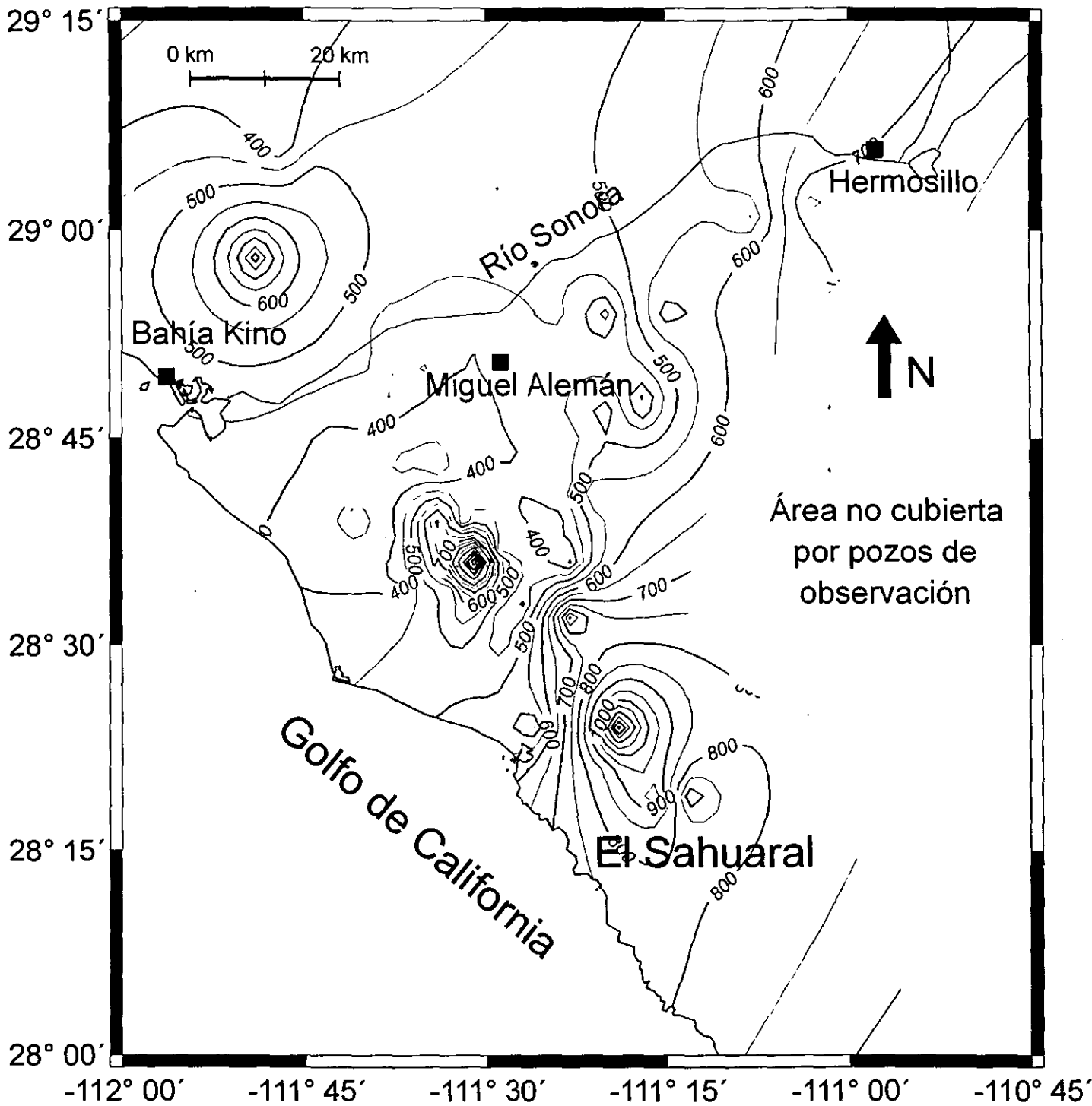


Figura V.13 b. Mapa de Isolíneas de STD en mg/l. en el agua de pozos del Valle de Hermosillo y el Sahuaral.

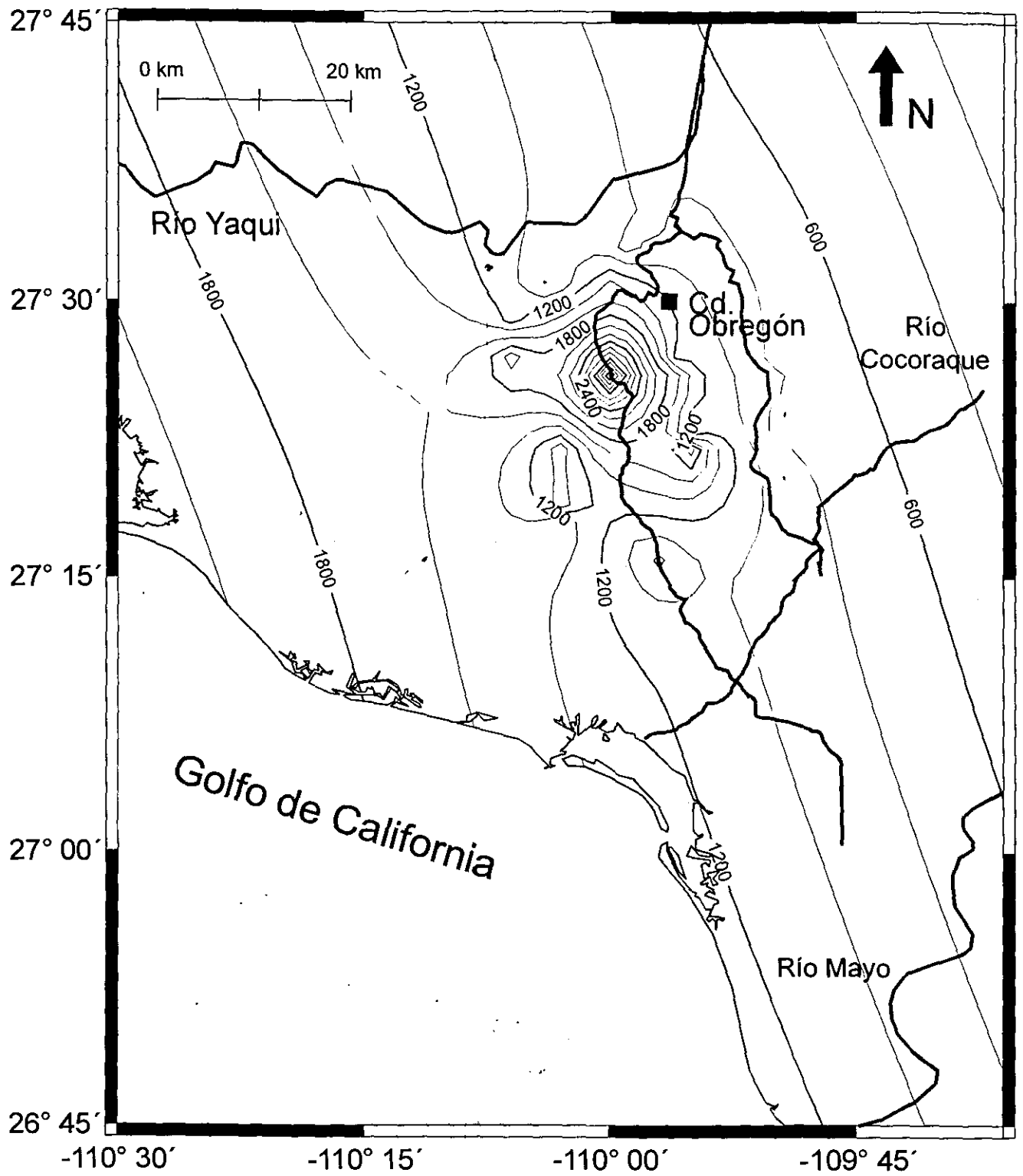


Figura V.14 a. Mapa de Isoconductividad eléctrica en el agua de pozos del Valle del Yaqui, Sonora.

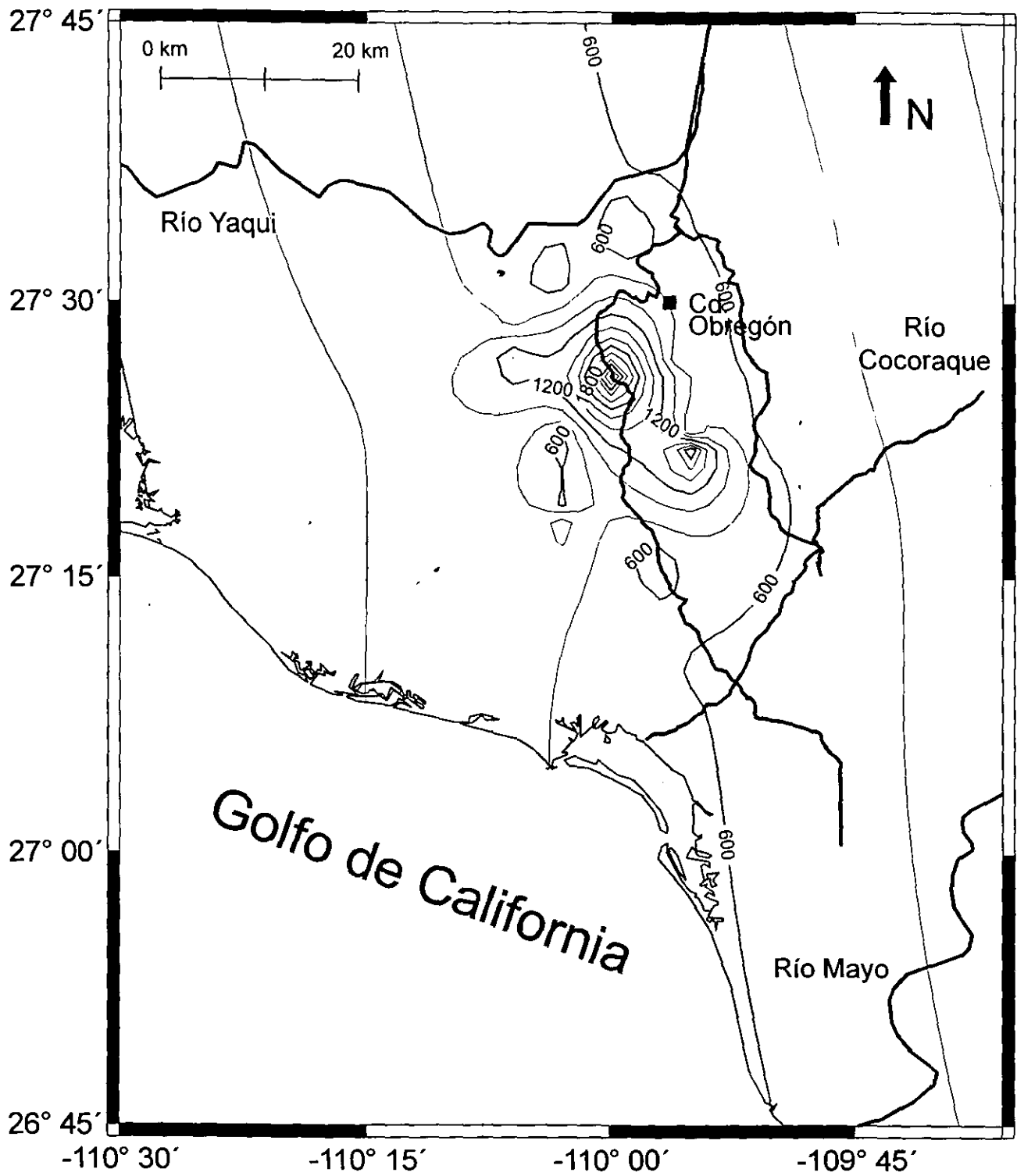


Figura V.14 b. Mapa de Isolineas de STD en mg/l. en el agua de pozos del Valle del Yaquí, Sonora.

Con los resultados obtenidos en los análisis de saturación y porosidad se aplicó nuevamente la Ley de Archie manteniendo fijos estos parámetros.

Al generar los sintéticos de las curvas de resistividad aparente se observa que la curva tiende a ser más estable para aberturas de  $AB/2$  mayores a los 215 m en el caso del valle de Hermosillo y el Sahuaral y difiere notablemente para el caso del valle del Yaqui donde el ajuste es mejor en los primeros 200 metros. Por otro lado la variación a la que se sometieron los valores de STD en cada sitio, tuvo una dependencia muy estrecha con los valores que se tenían de las muestras de campo cercanas o interpoladas al punto del SEV, usándose los valores de STD de campo como los iniciales en el proceso iterativo que ajustó las curvas hasta que los errores debido a la diferencia entre el valor sintético y el valor de resistividad aparente fuera menor al 15%. En las figuras IV.15a a 15d se presentan los resultados del proceso iterativo para cuatro ejemplos.

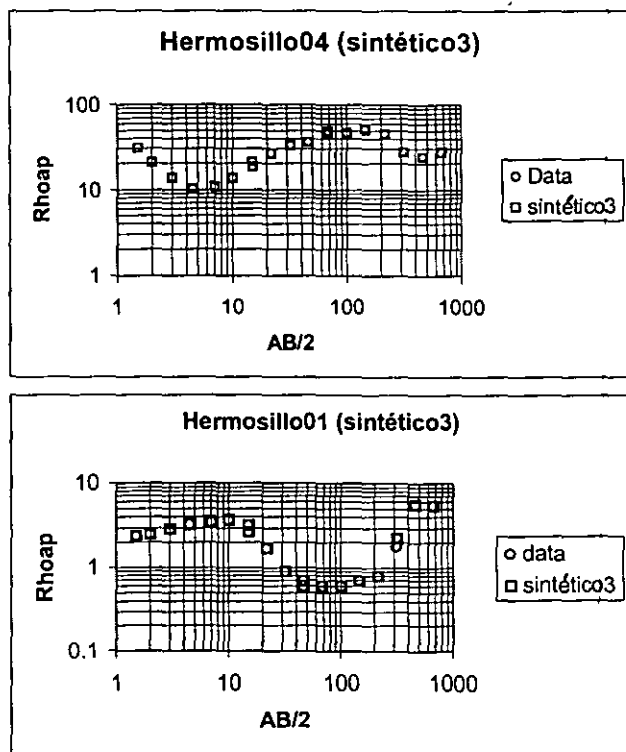


Figura V.15 a y V.15b. Ajuste final de curva resistividad aparente y sintética para el valle de Hermosillo. En este caso el parámetro variado fue la cantidad de STD para cada muestra.

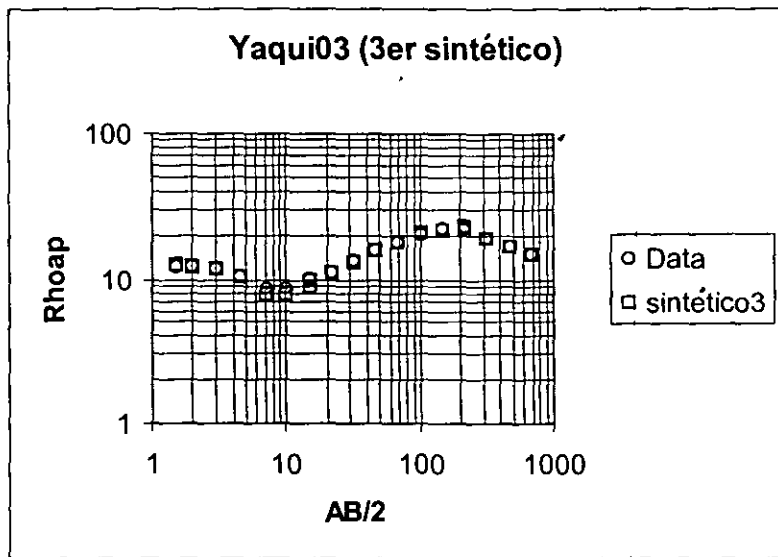
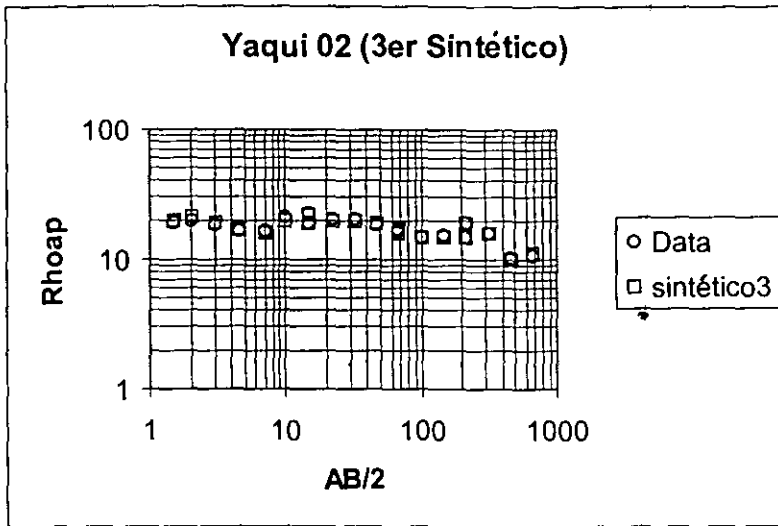


Figura V.15c y V.15d. Comparación de datos sintéticos y la curva de resistividad aparente en el valle del Yaqui, Sonora.

El número de iteraciones variaba dependiendo de la zona en que se tomaron los datos, por lo que se tiene que para el Sahuaral el número de iteraciones que fueron necesarias para que el proceso convergiera fue de 7 a 10 iteraciones, mientras que para el resto del valle de Hermosillo fue de hasta 6 iteraciones. El caso del Yaqui fue especial en este sentido, ya que la convergencia no se podía ajustar al total de la curva sino solamente a la parte de los primeros 200 metros de

AB/2 y la parte final de la curva requirió que se le cambiara el valor inicial de conductividad del agua. Este resultado implica que la conductividad del agua en el acuífero del valle del Yaqui es función de la profundidad. (Figura V.16a a 16d)

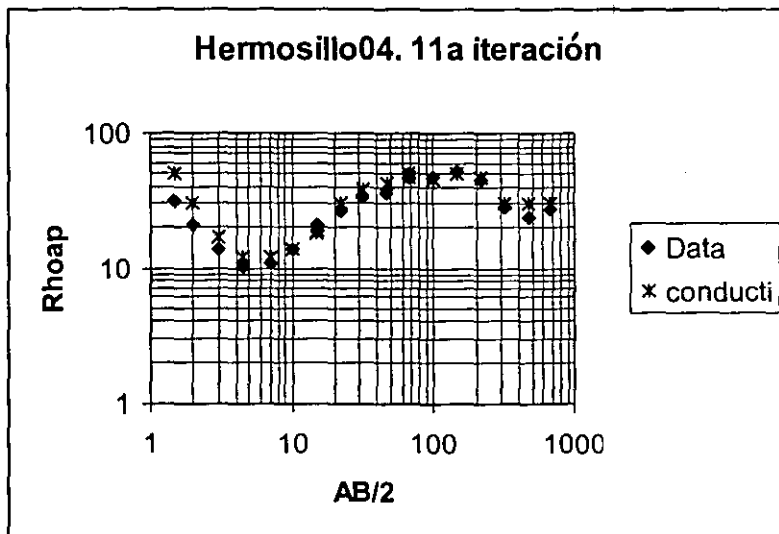
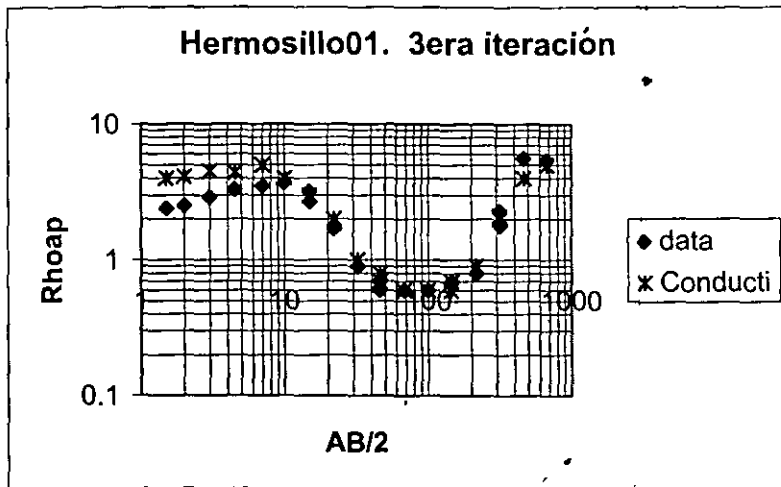


Figura V.16 a y V.16 b. Proceso iterativo para los datos de conductividad del agua y su relación con los datos de resistividad aparente.

Tomando en cuenta esta característica los datos muestran una rápida convergencia, en el caso de Hermosillo no fue necesario presentar un valor inicial de conductividad del agua distinto para cada parte de la curva, aunque los valores

finales de conductividad del agua si varían para los primeros 215 m de AB/2 y la parte restante de la curva.

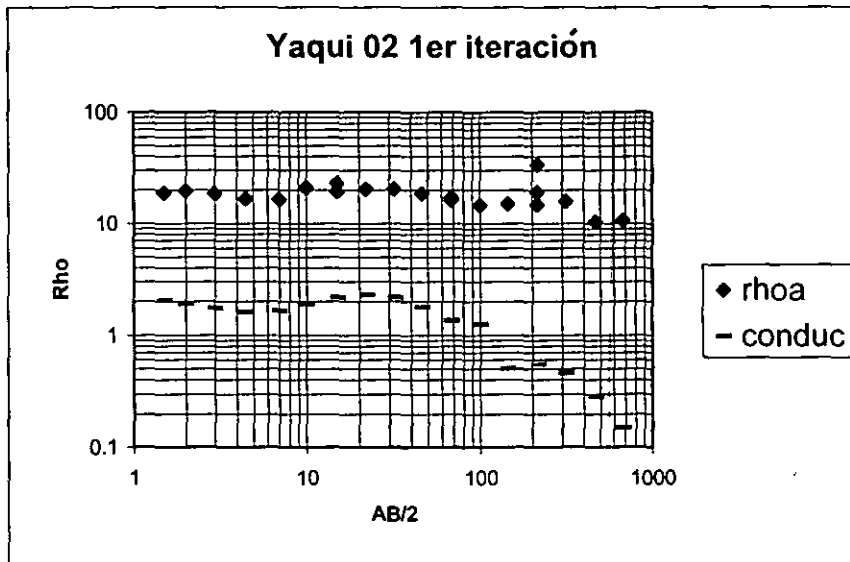
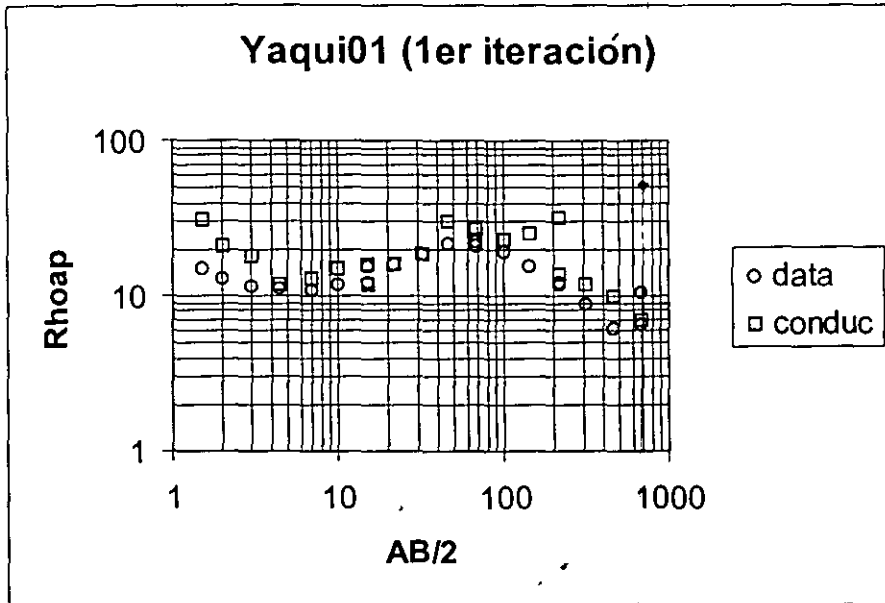


Figura V.16c y V.16d. Ejemplos del proceso de iteración para el caso del valle del Yaqui

La Tabla V.5 muestra un resumen de los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad en cuanto a calidad de agua para las dos zonas de estudio.



Tabla V.5. Resultados del análisis de sensibilidad que consiste en variar las concentraciones de STD y observar el efecto que produce este factor en la curva de resistividad aparente

Lugar	Valores promedio reales de concentración de STD (mg/l)	Valores promedio calculados en base a la Ley de Archie (mg/l)
Valle de Hermosillo	500 - 1200 (Centro)	750 - 1000 (Centro)
	500 - 700 (Norte de Bahía Kino)	400 - 650 Norte de Bahía Kino
	800 - 1200 (Sahuaral)	1100 (Sahuaral)
Valle del Yaqui	1350 - 2450 (Sudoeste de Ciudad Obregón)	2300 (Sudoeste de Ciudad Obregón)
	900 - 1850 (Sur de Ciudad Obregón)	1500 (Sur de Ciudad Obregón)

Como se puede ver en la tabla V.5 la relación existente entre los valores calculados y el valor real puede considerarse aceptable, dado el hecho de que en algunos casos la diferencia puntual no sobrepasaba las 50 mg/l es decir, la diferencia no fue mayor al 10% en ningún caso.

## VI. Conclusiones

De la serie de datos que se tienen de ambas zonas, estos presentan diferencias en cuanto al orden de magnitud de la resistividad aparente y también al tipo de curvas que se obtienen. Se remarcan estas diferencias debido al hecho de que ambas zonas tienen características geológicamente similares, es decir, los acuíferos se encuentran contenidos en material aluvial, producto del acarreo de las sierras al noreste de las zonas de estudio y ambos acuíferos recibían el aporte de importantes ríos.

A partir de los resultados de este estudio se llega a las siguientes conclusiones:

De la modelación hecha para cada sondeo eléctrico vertical, para el caso del valle de Hermosillo y el Sahuaral, los modelos que mejor se ajustan son aquellos que presentan un medio estratificado de hasta cinco capas con un primer espesor que va de 0 hasta 2 metros y que se considera como parte del suelo, un espesor más potente para la segunda capa de hasta 100 metros y cuya resistividad hace suponer en la zona no saturada, una zona que varía entre 0 y hasta 20 metros, que se le considero una zona intermedia entre la zona vadosa y la zona saturada y finalmente la capa de la zona saturada. En algunos casos se llega a observar en la sección geoelectrica una capa de alta resistividad que podemos suponer es el límite de este acuífero superior. En el caso del valle del Yaqui, la parte final de la curva de la mayoría de los sondeos muestra pendiente positiva. Estas curvas se modelaron con 4 ó 5 capas. Sin embargo, para los casos con curvas de tendencia decreciente en su parte final se consideraron hasta 7 capas. Las resistividades fueron considerablemente menores que en el Valle de Hermosillo (hasta del orden de un ciclo logarítmico).

Con respecto a los factores que se estudiaron para los análisis de

## **ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA**

sensibilidad, se observa que en cuanto a la porosidad, el rango para el valle de Hermosillo es de 0 a 30% y de 7 a 22% en el valle del Yaqui.

El factor de saturación de agua afecta de manera más sensible a las curvas de resistividad aparente del valle de Hermosillo. Esto posiblemente se deba a que la zona vadosa presenta espesores importantes de hasta más de 100 m con saturaciones muy bajas. De acuerdo a los datos obtenidos de porosidad, esta zona es más porosa en la zona vadosa que en la zona saturada, lo cual no le permite retener gran cantidad de fluidos (cuando estos llegan a existir por precipitación o riego) y le cede todo su aporte a la zona saturada actuando solo como un filtro para el agua. En el caso del Valle del Yaqui la saturación no es un factor determinante debido posiblemente a que la zona recibe de manera constante durante casi todo el año la infiltración de agua. Los resultados indican que aun en la zona vadosa existe una saturación de agua de hasta el 20%.

Para el análisis de calidad de agua se usó el parámetro conductividad eléctrica del agua que a su vez fue dado por la cantidad de STD en el agua de más de 100 pozos muestreados en ambas zonas. En el caso del Yaqui la calidad del agua es la que más afecta, sobre todo en la zona vadosa, ya que como se vio en el trabajo las curvas cambian sustancialmente en cuanto a forma y magnitud al variar este parámetro. Adicionalmente los resultados indican una dependencia de conductividad eléctrica del agua con la profundidad. En algunos casos se detectó una muy baja resistividad verdadera en la zona vadosa y la zona intermedia que podría ser resultado de la salinización de estas zonas. En el caso del Valle de Hermosillo y el Sahuaral, la calidad del agua no es un parámetro al cual hayan resultado sensibles las curvas de resistividad aparente. Sin embargo, en zonas cercanas a la costa donde el nivel freático es más somero y debido al fenómeno de intrusión salina, este factor posiblemente afecte de manera notable en la zona saturada.

## Referencias

- APPELO C.A. y D. Postma, 1996. "Geochemistry, Groundwater and Pollution"  
AA. Balkema, Rotterdam, Netherlands. 533pp.
- ARCHIE, G. E., 1942. "The Electrical Resistivity Logs as an Aid in Determining  
Some Reservoir Characteristics". Amer. Inst. Min. Met. Eng. Tech. Pub.  
422, Petroleum technology, 8 pp.
- ARIEL, Construcciones, S. A., 1968. "Estudio Hidrogeológico Completo de los  
Acuíferos de la Costa de Hermosillo, Sonora". Secretaría de Recursos  
Hidráulicos: E1-68-65, clave AS-12.
- BIELLA, G., A. Lozej y I. Tabacco, 1983. "Experimental Study of Some  
Hydrogeophysical Properties of Unconsolidated Porous Media". Ground  
Water, vol. 21, No. 6. pp 741-751.
- CANALES, A.G., 1986. "Planeación del Uso Conjunto de Aguas Superficiales y  
Subterráneas en el valle del Yaqui, Sonora, 1era. parte". Instituto  
Tecnológico de Sonora y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,  
México, 43 pp.
- CANALES, A.G., 1987. "Planeación del Uso Conjunto de Aguas Superficiales y  
Subterráneas en el valle del Yaqui, Sonora, 2a. parte". Instituto  
Tecnológico de Sonora y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,  
México, 87 pp.
- CUSTODIO, E. y M. R. Llamas, 1983. "Hidrología Subterránea". Editorial  
Omega, vol 1. 2a. edición, Barcelona, España, 1157 pp.

CRM, 1982. "Monografía Geológico Minera del Estado de Sonora". Consejo de Recursos Minerales (CRM). Serie de Monografías Geológico-Mineras. 220 pp.

DREVER, J. I., 1988. "The Geochemistry of Natural Water". Second Edition, Prentice-Hall, Inc. 437 pp.

FREEZE, R. A. y J. A. Cherry, 1979. "Groundwater". Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J., Estados Unidos, 674 pp.

GHOSH, D.P., 1971. "The Application of Linear Filter Theory to the Direct Interpretation of Geoelectrical Resistivity Sounding Measurements". Geophys. Prosp., vol. 19, pp. 192-217.

GONZÁLEZ Enríquez, R. 1993. "Caracterización Hidrogeológica del Acuífero del Valle del Yaqui, Sonora". Informe técnico, ITSON, IMTA y CNA. Ciudad Obregón, Sonora, 120pp.

GONZÁLEZ Enríquez, R., L.E. Marín y G. Córdova, 1996. "Hydrogeology and Groundwater Pollution of Yaqui Valley, Sonora, México". Geofísica Internacional, vol. 36, No. 1, pp. 49-54.

GORMAN, T. y W. E. Kelly, 1990. "Electrical-Hydraulic Properties of Unsaturated Oattawa Sands". J. Hydrology, 118, pp. 1-18.

HEILAND, C. A., 1968. "Geophysical Exploration". Ch. 10. Hafner Publishing Co. N.Y.

- HEM, J.D., 1970. "Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water". U.S. Geol. Surv. Water-supply paper 1473, 363 pp.
- INEGI, 1993. "Estudio Hidrológico del Estado de Sonora". Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, 185 pp.
- ICATEC y S.R.H., 1969. "Estudio Geohidrológico del Valle del Yaqui, Sonora (distrito de riego no. 41)". ICATEC Consultores y Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), vol. 1, 175 pp.
- JACKSON, P. D., D. Taylor-Smith, y P. N. Stanford, 1978. "Resistivity-Porosity-Particle Shape Relationship for Marine Sands". Geophysics, Vol. 43. No. 6. pp 1250-1268
- JIMÉNEZ, V.A., 1965. "Condiciones de las Aguas Subterráneas en el Distrito de Riego número 51. Costa de Hermosillo, Son." Ingeniería Hidráulica en México, Vol XIX, No. 3. pp 65-80.
- KELLER, G.V. y F. L., Frischknecht, 1966. "Electrical Methods in Geophysical Prospecting". Pergamon press, New York, N.Y., 517 pp.
- KELLER, G.V., 1987. "Rock and Mineral Properties". Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Vol 1, Theory. SEG. Capitulo 2. pp 13-51.
- KING, E.R., 1939. "Geological Reconnaissance of Central Sonora: An. Jour. Sci., 5a Ser., vol. 28.

- KOEFOED, Otto, 1979. "Geosounding Principles, 1. Resistivity Sounding Measurements", Serie Methods in Geochemistry and Geophysics, vol 14A, Elsevier, Amsterdam, 276 pp.
- MARÍN, L., B. Steinich, G. Velázquez, e I. Simón., 1996. "Caracterización geoquímica del valle de Hermosillo". Informe técnico Comisión Nacional del Agua-Instituto de Geofísica, 74 pp.
- MCNEILL, J.D., 1980. "Electrical Conductivity of Soils and Rocks". Geonics Limited, Technical Note TN-5. Ontario, Canada, 22 pp.
- MORAN-ZENTENO, D., 1994. "Geology of the Mexican Republic". American Association of Petroleum Geologists, AAPG. Studies in Geology #39. Estados Unidos, 160 pp.
- MUNDO-MOLINA, M.D y P. Martínez Austria, 1994. "El Cambio Climático y sus Efectos Potenciales en los Recursos Hídricos y la Agricultura del Valle del Yaqui, Sonora (estudio preliminar indicativo)". Ingeniería hidráulica en México, IX(1). pp. 13-33.
- NEGI, J. G. y P. D. Saraf, 1989. "Anisotropy in Geoelectromagnetism" Serie: Methods in Geochemistry and Geophysics, vol, 28, Elsevier, Holanda, 238 pp
- O'NEILL, D.J., 1975. "Improved Linear Filter Coefficients for Application in Apparent Resistivity Computations". Bull. Aust. Soc. Explor. Geophys., Vol. 6. pp. 104-109.

- ORELLANA, E., 1980. "Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua". Segunda edición. Paraninfo, Madrid, España. 578 pp.
- PEREZ-ROSALES, C., 1983. "Teoría Sobre la Relación Entre Factor de Resistividad y Porosidad". Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, 15, 4, pp. 26-33.
- POUPON, A., C. Clavier, J. Dumannoir, R. Gaymard y A. Misk., 1970. "Log Analysis of Sand-Shale Sequences - A systematic Approach". J. Petr. Tech., vol 22, p. 995.
- SIMANDOUX, P., 1963. "Mesures Diélectrique en Milleoux Poreux, Application a Mesure des Saturations en Eáux, Étude du Comportement de Massifs Argileux". Rev de l'institut Francais du Petrole, Supplementary issue.
- STEFANESCU, S.S., C. Schlumberger y M. Schlumberger, 1930. "Sur la Distribución Électrique Potentielle Autour d'une Prise de Terre Ponctuelle Dans un Terrain à Couches Horizontales, Homogènes et Isotropes". J. Phys. Radium, vol. 7. pp 132-141
- STEINICH B., I. Simón Velázquez, E. Sánchez Ramírez, A. Chavarría Villaseñor, y L. Marín Stillman, 1997. "Estudio de la Intrusión Salina en la Franja Costera en el Valle de Hermosillo y el Sahuaral, Sonora". Informe Final. Instituto de Geología, (UNAM) y Comisión Nacional del Agua. 208 pp.
- STEINICH B. y J. A. Chavarria, en prensa. "Determination of Hydrogeological Characteristics and Mapping of the Sea Water Intrusion of the Yaqui Valley Aquifer, Sonora, Mexico". Ecovision: World Monograph Series. Aquatic Ecosystems of Mexico.



TODD, D.K., 1964. "Groundwater: Handbook of Applied hydrology". Ch. 13.  
Chow, V. T. Ed. Mcgraw Hill, N. Y.

VAN DAM, J.C., 1976. "Possibilities and Limitations of the Resistivity Method of  
Goelectrical Prospecting in the Solution of Geohydrological Problems".  
Geoexploration, 14: 179-193.

WESSEL, P., y W. H. F. Smith, 1995. "New Version of the Generic Mapping  
Tools Released". EOS Trans. Amer. Geophys. U., vol. 76, 329 pp.

YUNGUL, C.H., 1996. "Electrical Methods in Geophysical Exploration on Deeps  
Sedimental Basins". Chapman & Hall, 1era Edición, U.K. 208pp.