



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

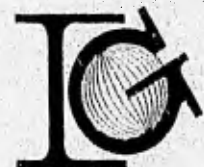
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**" CARACTERIZACIÓN DE DIRECCIONES PREFERENCIALES  
DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA UTILIZANDO  
SONDEOS AZIMUTALES GEOELÉCTRICOS "**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO GEOFÍSICO  
P R E S E N T A:  
MARÍA ISABEL SIMÓN VELÁZQUEZ**

MÉXICO, D.F., 1996

TESIS PROFESIONAL



ISABEL SIMON VELAZQUEZ

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.



VERDAD NACIONAL  
AUTORIDAD LEGÍTIMA

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-044

**SRITA. MARIA ISABEL SIMON VELAZQUEZ**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el Dr. Luis E. Marín Stillman y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:


**CARACTERIZACION DE DIRECCIONES PREFERENCIALES DE LA CONDUCTIVIDAD  
HIDRAULICA UTILIZANDO SONDEOS AZIMUTALES GEOELECTRICOS**

- RESUMEN**
- I INTRODUCCION**
- II BASES TEORICAS Y METODOLOGIA DEL SONDEO  
AZIMUTAL GEOELECTRICO**
- III INVESTIGACIONES DE CAMPO EN TRES MEDIOS  
HIDROGEOLOGICAMENTE DISTINTOS**
- IV CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**
- APENDICE I**
- APENDICE II**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Ciudad Universitaria, a 20 de junio de 1996  
EL DIRECTOR

  
ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS\*RLR\*gtg

Dedicatoria

**A las personas que más amo en la vida y quienes siempre vigilaron  
con amor cada uno de los pasos de esta primer meta**

A mis padres

**Señor Simón López**

**Señora Velázquez Aguilar**

A mis hermanos

**Jasso, Carlos, Rosa, Antonio, Rogelio y Gabriel**

Y a la familia que se integra a nosotros

**Mi tía, Mary, Erika, Katya, David y Eduardo**

**No quiero dejar pasar esta oportunidad para dedicar este trabajo a todos  
los amigos y compañeros que estuvieron conmigo en la escuela, los  
cuales vemos con ilusión el porvenir de esta carrera.**

**A Erika por soportar con valentía la compañía de alguien como yo  
durante cinco años.**

**A ti por tomarte la molestia de leer este trabajo.**

**Canek dijo:**

***"No te enorgullezcas del fruto de tu inteligencia. Recuerda que sólo eres el dueño del esfuerzo que pusiste en su cultivo; de lo que logras apenas si eres un espectador. La inteligencia es como una flecha: una vez que sale del arco ya no la gobierna nadie. Su vuelo depende de tu fuerza, pero también del viento y, ¿por qué no decirlo?, del destino que camina detrás de ella."***

**Ermilo Abreu Gómez**

## **Resumen**

El flujo del agua subterránea en tres dimensiones en medios porosos es descrito por la Ley de Darcy. Uno de los problemas a los cuales tradicionalmente se han enfrentado los hidrogeólogos, es la caracterización cuantitativa de la conductividad hidráulica, la cual es un tensor de segundo orden. A pesar de que existen buenas técnicas para obtener el valor de la conductividad hidráulica, por ejemplo, las pruebas de bombeo, hay muchos problemas para definir la dirección del tensor. En este trabajo se presenta una técnica geofísica que permite definir la dirección preferencial de la conductividad hidráulica.

Los Sondeos Azimutales Geoeléctricos (SAG) utilizan el dispositivo Wenner y se hace una roseta con espaciamentos que varían de los 15 a los 30 grados. Esto permite determinar si existe anisotropía en el medio hidrogeológico. Típicamente en medios saturados, esta anisotropía está relacionada con la dirección preferencial de la conductividad hidráulica.

Steinich y Marín (1995), utilizaron el método para determinar cuales eran las direcciones preferenciales de la permeabilidad en el acuífero cárstico de Yucatán. Aquí se presentarán resultados adicionales de dos sistemas hidrogeológicos diferentes: un acuífero colgado localizado sobre rocas fracturadas (El Ajusco, DF) y un acuífero granular (valle de Hermosillo, Sonora).

## **Abstract**

The geophysical technique of azimuthal resistivity surveys (SAG), is presented to map preferential directions of the hydraulic conductivity. Ten azimuthal resistivity surveys were conducted in three different aquifers (located in Sonora, northwest Mexico, the second in the Valley of Mexico and the third in Yucatan). In the first site the aquifer consists of two interconnected aquifers separated by a thick, wedge-shaped clay layer consists of an unfractured regolith overlain by less than one meter of sands and gravels. The second site consists of perched aquifer systems underlain by volcanic rocks, and the third site is a Karst. Azimuthal resistivity surveys identify the preferential bidirection of the hydraulic conductivity, which when coupled with the hydraulic gradient, allow one to identify the preferential direction of the hydraulic conductivity. This allows the development of a more efficient ground water monitoring system or pump-and-treat remediation system.

# ÍNDICE

Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Índice.....	v
<b>Capítulo I</b>	
<b>Introducción.....</b>	<b>2</b>
I.I Objetivos.....	2
I.II Geofísica aplicada a la hidrogeología.....	2
I.III Sondeo Azimutal Geoelectrico.....	5
<b>Capítulo II</b>	
<b>Metodología y fundamentación del sondeo azimutal geoelectrico.....</b>	<b>7</b>
II.I Hidrogeología.....	7
II.II Bases teóricas.....	13
II.II.I Modelo isotrópico.....	13
II.II.II Resistividad aparente.....	17
II.II.III Modelo anisotrópico.....	17
II.II.IV Profundidad de investigación.....	22



II.III Metodología.....	24
II.III.I Equipo.....	24
II.III.II Dispositivos.....	25
II.III.III Limitaciones.....	26
<b>Capítulo III</b>	
<b>Investigaciones de campo y resultados.....</b>	<b>29</b>
III.I Zona uno: Ajusco, D.F.....	29
III.I.I Hidrogeología.....	29
III.I.II Resultados.....	32
III.I.III Discusión y conclusiones.....	34
III.II Zona dos: Valle de Hermosillo, Sonora.....	36
III.II.I Hidrogeología.....	36
III.II.II Resultados.....	39
III.II.III Discusión y conclusiones.....	41
III.III Zona tres: Yucatán.....	43
III.III.I Hidrogeología.....	43
III.III.II Resultados.....	43
III.III.III Discusión y conclusiones.....	46
<b>Capítulo IV</b>	
<b>Conclusiones.....</b>	<b>50</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>52</b>

Apéndice I.....	56
Apéndice II.....	57
Reconocimientos.....	58

U N A M



FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERO GEOFISICO

I

u n o

" INTRODUCCIÓN "

c a p í t u l o

TESIS PROFESIONAL



ISABEL SIMON VELAZQUEZ

# **CAPÍTULO I**

## **Introducción**

Uno de los aspectos más importantes en los problemas hidrogeológicos es la determinación de la conductividad hidráulica. Tradicionalmente sólo se empleaban técnicas hidráulicas, como las pruebas de bombeo, para determinar el valor de este parámetro, pero su aplicación normalmente es costosa y únicamente nos ofrece el valor escalar de este tensor (*Freeze y Cherry, 1979*). La definición total de este parámetro resulta aún más complicada de obtener. Para validar el presente trabajo es necesario presentar los conceptos teóricos que existen acerca el tensor de conductividad hidráulica, así como aquellos que se relacionan con la anisotropía eléctrica, que servirá para definir la dirección preferencial de la conductividad hidráulica.

### **I.I Objetivos**

El objetivo de esta obra es verificar si el método de los SAG (Sondeos Azimutales Geoeléctricos) funciona en tres diferentes medios hidrogeológicos para determinar la dirección preferencial de la conductividad hidráulica: un sistema de acuíferos colgados sobre un medio fracturado (El Ajusco D.F.); un acuífero granular (El valle de Hermosillo, Sonora) y un acuífero cárstico (El noroeste de Yucatán).

### **I.II Geofísica aplicada a la hidrogeología**

Los estudios hidrogeológicos utilizan técnicas geofísicas para describir las propiedades del subsuelo sobre todo a nivel regional, como son la

determinación de la zona no saturada, avance de la intrusión salina, mapeo de estelas contaminantes, etcétera. La geofísica constituye además un método indirecto que permite extrapolar la información puntual obtenida a partir de perforaciones o pruebas de bombeo. La gravimetría es útil para determinar la distribución espacial de los paquetes sedimentarios y para la detección de cavidades, etcétera. Estudios de sismica de refracción han sido utilizados para determinar el espesor de la zona no saturada (Astier, 1975; Dobrin, 1976). Los métodos eléctricos son las técnicas geofísicas más populares utilizadas en México en estudios hidrogeológicos.

Al ser el agua el fluido del cual queremos determinar su movimiento por las rocas, nos encontramos con la ventaja de que sus características la hacen identificable para los métodos eléctricos. La resistividad se define como la dificultad que encuentra la corriente eléctrica para fluir a través de un material, (esto es lo que se considera inverso a la conductividad). Como la conductividad en las rocas es generalmente electrolítica y prácticamente todas las rocas son porosas y contienen líquido intersticial (con diferentes grados de contenido en sales minerales), la disminución de la resistividad con el aumento del líquido es fácil de medir con los métodos eléctricos.

La razón por la cual los métodos geofísicos más utilizados en la hidrogeología son los eléctricos, es porque son relativamente fáciles de correr, el equipo no es caro comparativamente hablando y su interpretación es fácil de realizar.

Los métodos eléctricos de corriente continua poseen distintas técnicas como son los sondeos eléctricos verticales (SEV) o el perfilaje eléctrico, estas dos técnicas se utilizan con dos finalidades distintas; en el SEV se pretende tener un control en la dirección vertical sobre una sola línea (eje Z en el sistema cartesiano); en cambio en el perfilaje o calicata eléctrica se estudian las variaciones laterales de la resistividad del subsuelo; se trata pues, de un

método de investigación horizontal (plano X-Y), a una profundidad más o menos constante (Orellana, 1982).

Las técnicas eléctricas son muy conocidas y difundidas a raíz de la facilidad en la aplicación, y con ello, se ha generado una gran variedad de dispositivos para su aplicación tanto en SEV como en las técnicas de perfilaje, siendo los más comúnmente usados el Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, etc. Su estudio así como la respuesta que tienen a distintos medios, también ha sido muy analizado y comparado, por lo que algunos autores han propuesto alguna técnica específica y algún dispositivo en especial para un determinado problema, lo que no necesariamente significa que sea la única opción, sino simplemente que el autor la considera más viable.

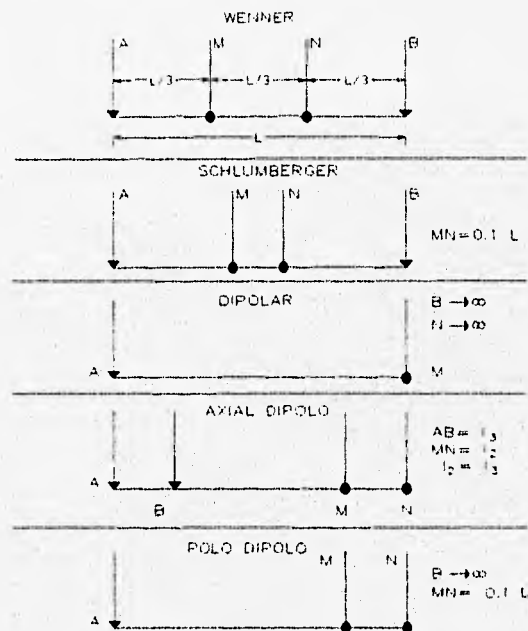


Figura 1.1. Principales dispositivos eléctricos

### I.III Sondeo Azimutal Geoeléctrico

La técnica del Sondeo Azimutal Geoeléctrico (SAG), permite determinar sobre un plano horizontal, si existe alguna dirección preferencial de la conductividad hidráulica. En 1972, Haberjjam demostró la utilización de estos sondeos en medios fracturados y saturados para determinar las direcciones de permeabilidad. *Carpenter et al (1990)* utilizaron el método para estudiar fracturas en un relleno sanitario en el estado de Illinois, Estados Unidos. *Steinich y Marín (1995)* emplearon la técnica de Sondeos Azimutales Geoeléctricos (SAG) para la identificación de zonas de alta permeabilidad en el acuífero cárstico de Yucatán.

La técnica utiliza las propiedades hidráulicas del tensor de conductividad hidráulica y genera a partir de un modelo bidimensional, la posibilidad de determinar la dirección preferencial de conductividad hidráulica, no así el sentido de esta dirección, ni tampoco el valor de la magnitud de este tensor, para ello se requiere la utilización de otros parámetros hidráulicos, tales como el gradiente hidráulico (*Freeze y Cherry, 1979*). Los valores escalares se obtienen a partir de las pruebas de bombeo, coeficientes de permeabilidad, transmisibilidad y almacenamiento, entre otros (*Ritzi y Andolsek, 1992*).

U N A M



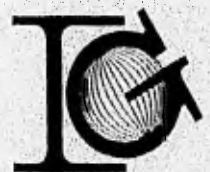
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERO GEOFISICO

**II**  
**dos**

**" METODOLOGÍA Y  
FUNDAMENTACIÓN DEL  
SONDEO AZIMUTAL  
GEOELÉCTRICO "**

**c a p í t u l o**

TESIS PROFESIONAL



ISABEL SIMON VELAZQUEZ



## CAPÍTULO II

### Metodología y fundamentación del Sondeo Azimutal Geoeléctrico

La técnica del Sondeo Azimutal Geoeléctrico (SAG), ha sido muy bien descrita por muchos autores (*Ritzi y Andolsek, 1992; Carpenter et al, 1992; Taylor y Flemming, 1988; Steinich y Marín, 1995*). Lo que se pretende en este trabajo es sólo fundamentar y mencionar las bases teóricas, tanto del SAG, como de la conductividad hidráulica, así como mencionar la metodología necesaria para su aplicación.

#### II.1 Hidrogeología

La discusión que a continuación se presenta es de *Freeze y Cherry, 1979*.

El flujo del agua subterránea para medios porosos es descrita por la Ley de Darcy

$$v = -k \left( \frac{\Delta h}{\Delta l} \right) \quad (1)$$

Donde  $v$  es la velocidad del fluido y  $k$  la conductividad hidráulica o en su forma diferencial:

$$v = -k \frac{dh}{dl} \quad (2)$$

donde  $dh=h_2-h_1$  es la carga hidráulica y

$\frac{dh}{dl}$  el gradiente hidráulico.

Si la velocidad del fluido ( $v$ ) se define como

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

donde  $Q$  es el caudal o gasto hidráulico y  $A$  el área transversal al paso del fluido.

Despejando de (3) y sustituyendo en (2), se tiene

$$Q = -k \left( \frac{dh}{dl} \right) A \quad (4)$$

Esto implica un flujo no sólo a nivel microscópico, sino también a nivel macroscópico, donde también es válida la ecuación (4) (Freeze y Cherry, 1979).

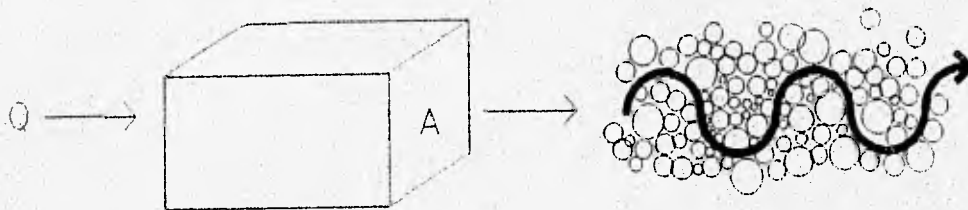


Figura 2.1. Flujo a nivel macroscópico y microscópico (Freeze y Cherry, 1979).

La conductividad hidráulica,  $k$ , se define como lo enuncian las ecuaciones de la Ley de Darcy para tres dimensiones, de donde puede generalizarse a la velocidad,  $v$ , simplemente como

$$v_x = -k_x \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (5a)$$

$$v_y = -k_y \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (5b)$$

$$v_z = -k_z \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (5c)$$

donde  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  son los valores de la conductividad hidráulica en las direcciones del sistema cartesiano ( $x$ ,  $y$  y  $z$ ). Ahora, si tomamos en cuenta que la carga hidráulica  $h$ , es función de  $x$ ,  $y$  y  $z$ , las derivadas son parciales, quedando de la manera

$$v_x = -k_{xx} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) - k_{xy} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) - k_{xz} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (6a)$$

$$v_y = -k_{yx} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) - k_{yy} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) - k_{yz} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (6b)$$

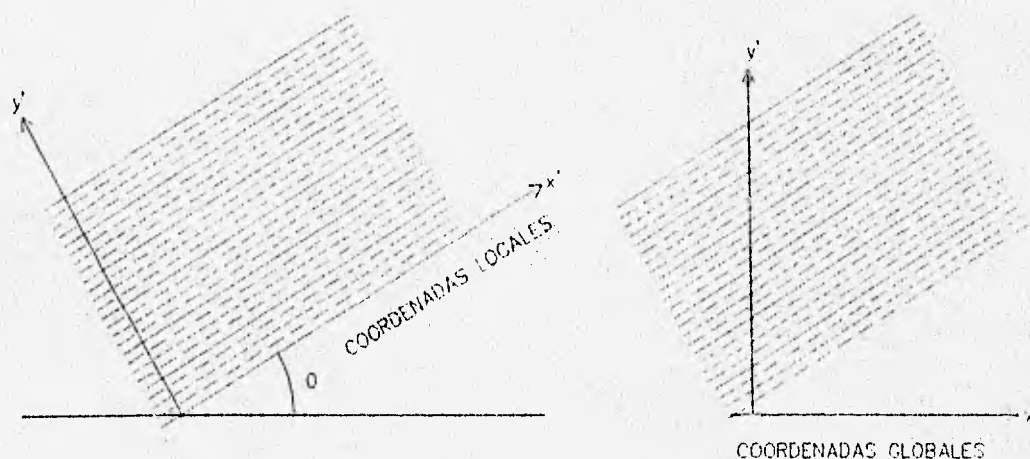
$$v_z = -k_{zx} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) - k_{zy} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) - k_{zz} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (6c)$$

Por tanto, la conductividad hidráulica que tiene nueve componentes en su caso más general, es un tensor simétrico de segundo orden y es necesario cuantificar tanto su valor escalar como la dirección de este vector para los estudios de simulación numérica de acuíferos, transporte de contaminantes, etc. Para este tensor se tiene una matriz cuadrada de tres elementos

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}$$

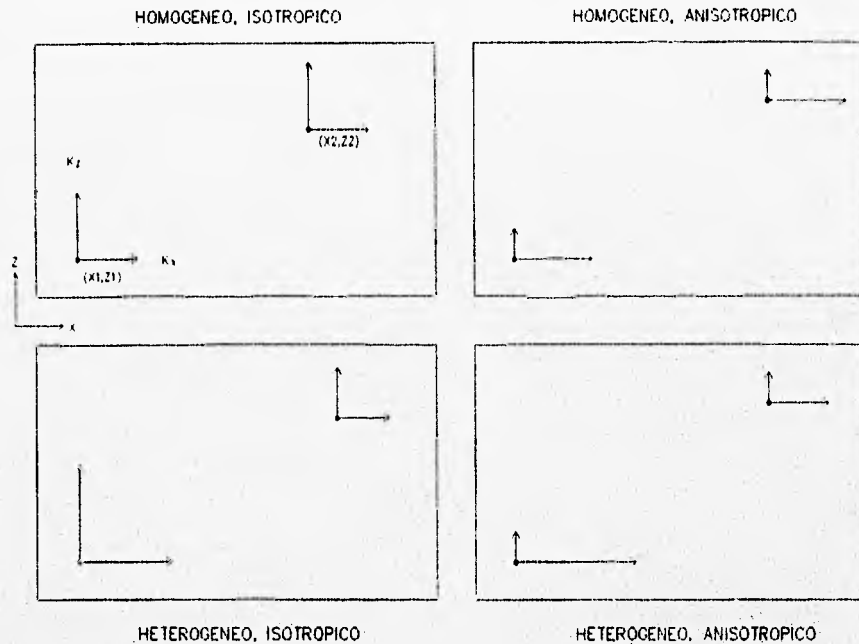
Para el caso en que las direcciones principales de anisotropía coinciden con  $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$ , solo se reduce a tres componentes, y queda como lo indican las ecuaciones de la 5a a la 5c. La cantidad escalar es un tensor de rango cero.

La permeabilidad es la capacidad que tienen los materiales de permitir el paso de un fluido (Freeze y Cherry, 1979). En un medio isotrópico, la permeabilidad tiene el mismo valor, independientemente de su dirección.



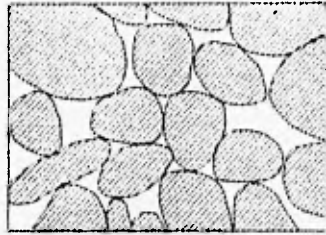
**Figura 2.2. Coordenadas globales y coordenadas locales para la permeabilidad (modificado de Wang y Anderson, 1982)**

La causa primaria de anisotropía a escala microscópica es la orientación de los minerales en rocas sedimentarias y sedimentos sin consolidar. Snow (1969), mostró que para rocas fracturadas, la anisotropía también procede de las variaciones en la dirección en la apertura y espaciamiento de la junta. En este caso es común que  $K_z > K_x$ .

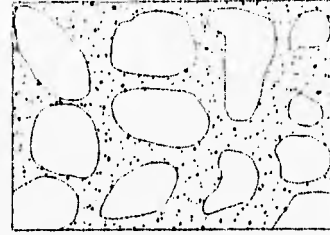


**Figura 2.3. Relaciones de heterogeneidad y anisotropía (Freeze y Cherry, 1979)**

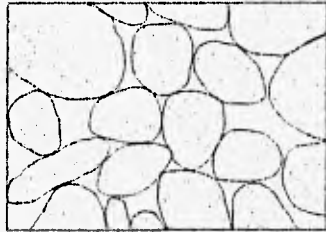
La conductividad hidráulica se ve afectada principalmente por las características geométricas del medio, además por la cantidad y calidad de agua, si es que el medio está saturado o no. En el caso del agua, es importante determinar su dirección preferencial, debido a que en esta misma dirección pueden viajar los contaminantes, además de que a partir de este dato es posible obtener la génesis del acuífero.



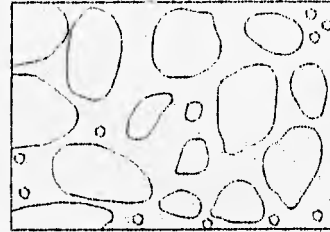
SEDIMENTARIA, ALTA POROSIDAD



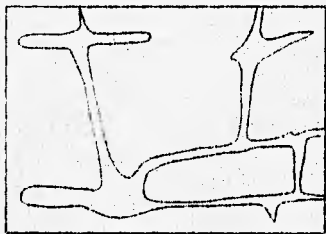
SEDIMENTARIA, BAJA POROSIDAD



GUIJARROS EN SI MISMOS POROSOS,  
TENIENDO ALTA POROSIDAD



POROSIDAD ALTAMENTE DISMINUIDA  
POR LA DEPOSITACIÓN DE MATERIAL  
MINERAL EN LOS INTERSTICIOS



POROSIDAD DEBIDO AL  
FRACTURAMIENTO POR DISOLUCION



POROSIDAD DEBIDO A  
FRACTURAMIENTO

**Figura 2.4. Relaciones entre textura y porosidad (modificado de Bear, 1972)**

## II.II Bases teóricas

### II.II.I Modelo isotrópico

A continuación se presenta el desarrollo teórico utilizado en la técnica del SAG, partiendo de la generalización de los métodos eléctricos.

Si se parte de la ley de Ohm

$$J = \sigma E \quad (7)$$

donde  $E$ , es el campo eléctrico,  $\sigma$  la conductividad eléctrica y  $J$  el vector densidad de corriente, para un medio homogéneo e isotrópico. Utilizando las ecuaciones de Maxwell, para estas condiciones  $J$  y  $E$  están en la misma dirección donde el potencial eléctrico y el campo eléctrico de intensidad se relacionan como

$$E = -\nabla V \quad (8)$$

donde  $V$  es el potencial eléctrico.

Combinando las ecs 7 y 8, se encuentra

$$J = -\frac{1}{\rho} \nabla V \quad (9)$$

donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica, la cual es inversa de la conductividad eléctrica.

Para corriente estacionaria, como la densidad de carga no cambia con el tiempo, la ecuación de continuidad está dada por

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (10)$$

Si se continúa considerando un medio homogéneo e isotrópico y se combinan las ecs 7, 9 y 10, queda

$$\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta z^2} = 0 \quad (11)$$

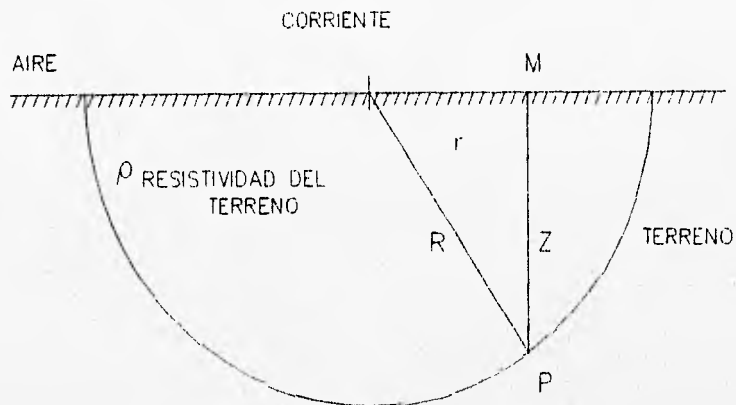
La ec 11 es la ecuación de Laplace. Si se supone un espacio seminfinito como en la fig 2.5, entonces el potencial  $V_p$  en el punto  $P$ , a una distancia,  $r$ , desde la fuente de corriente está dado por

$$V_p = \frac{I\rho}{2\pi R} = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} \quad (12)$$

Donde  $I$  es la corriente y  $R$  la distancia entre el punto  $P$  y la fuente. El potencial  $V_M$  a un punto  $M$  en la superficie del terreno ( $z = 0$ ) es

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi R} \quad (13)$$





**Figura 2.5. Corriente DC en un espacio homogéneo, isotrópico y seminfinito**

Si se supone que la corriente eléctrica  $I$  es introducida en el terreno a través de dos electrodos de corriente (A y B) y la diferencia de potencial es medida por un segundo par de electrodos (C y D) como lo muestra la fig 2.6, entonces, siguiendo de la ec 13, el potencial en los electrodos C y D está dado por

$$V_c = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right\} \quad (14a)$$

$$V_b = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right\} \quad (14b)$$

donde  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $R_1$  y  $R_2$  son las distancias desde los electrodos de corriente. El valor de la resistividad  $\rho$ , para una situación homogénea e isotrópica está dada por

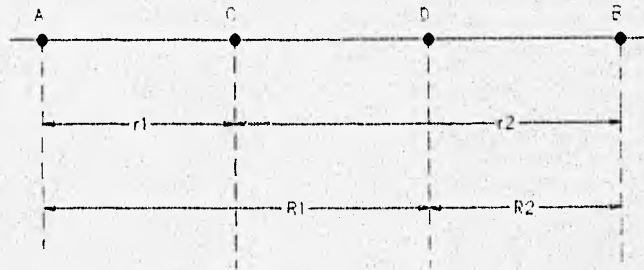
$$\rho = 2 \pi R K \quad (15)$$

donde  $R$  es la resistencia, y esta es gobernada por la ley de Ohm

$$R = \left( \frac{V_c - V_b}{I} \right) \quad (16)$$

y  $K$  es el factor geométrico, es decir, la relación existente entre las distancias de los electrodos:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (17)$$



**Figura 2.6 Distancias entre los electrodos de corriente y potencial. (Negi y Saraf, 1989).**

### II.II.II Resistividad aparente

La resistividad aparente de una formación geológica es calculada a partir de la medida del potencial y corriente además de un factor geométrico  $K$  para un espacio teóricamente homogéneo e isotrópico. 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 ( $\rho_a$ ) está dada por

$$\rho_a = K \frac{V_c - V_b}{I} \quad (18)$$

### II.II.III Modelo anisotrópico

Los efectos de la anisotropía en la resistividad aparente han sido estudiados por diversos autores en la literatura geofísica incluyendo a *Slichter* (1933); *Müller* (1931) y *Pirson* (1935).

La anisotropía eléctrica encuentra sus causas en:

(a) Alineamiento de poros y grietas

La distribución de grietas en las rocas de la corteza tiene una orientación preferencial que se puede deber a esfuerzos tectónicos, gradientes de temperatura, disolución y recristalización, dando como resultado, anisotropía en la conductividad eléctrica.

(b) Estratificación

(c) Orientación preferencial de los minerales

Existe gran número de minerales que toman una forma elongada y en el momento de su depositación estos conservan una orientación paralela a la dirección del eje principal de elongación. En el momento de la depositación quedan intersticios los cuales generalmente contienen agua mineralizada que fluye en esta misma dirección. La corriente eléctrica muestra preferencia a conducirse en un plano paralelo a esta dirección que perpendicular a ella (Keller y Frischknecht, 1966), esto crea anisotropía eléctrica.

En un medio con condiciones anisotrópicas se puede escribir la ley de Ohm de una manera modificada y en coordenadas rectangulares de la forma

$$J_x = \sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y + \sigma_{xz} E_z \quad (19a)$$

$$J_y = \sigma_{yx} E_x + \sigma_{yy} E_y + \sigma_{yz} E_z \quad (19b)$$

$$J_z = \sigma_{zx} E_x + \sigma_{zy} E_y + \sigma_{zz} E_z \quad (19c)$$

En las relaciones anteriores  $J$  tiene una propiedad directiva y esta generalmente no es la misma dirección de  $E$ . Matemáticamente

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx}; \sigma_{xz} = \sigma_{zx}; \sigma_{yz} = \sigma_{zy} \quad (20)$$

suponiendo que los ejes principales son rotados hasta obtener un sistema coordenado local y que por tanto

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad (21)$$

las relaciones 19a a la 19c, se reducen, quedando

$$J_x = \sigma_{xx} E_x = - \left( \frac{1}{\rho_x} \right) \frac{\delta V}{\delta x} \quad (22a)$$

$$J_y = \sigma_{yy} E_y = - \left( \frac{1}{\rho_y} \right) \frac{\delta V}{\delta y} \quad (22b)$$

$$J_z = \sigma_{zz} E_z = - \left( \frac{1}{\rho_z} \right) \frac{\delta V}{\delta z} \quad (22c)$$

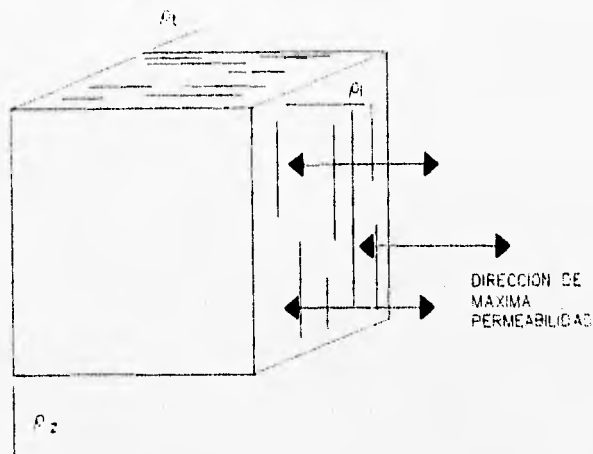
Tomando los valores de  $J_x$ ,  $J_y$  y  $J_z$ , y colocándolos en la ecuación de continuidad (ec 10), se tiene

$$\frac{1}{\rho_x} \frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{1}{\rho_y} \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} + \frac{1}{\rho_z} \frac{\delta^2 V}{\delta z^2} = 0 \quad (23)$$

Considerando que un medio fracturado es eléctricamente anisotrópico (*Ritzi y Andolsek, 1992*), y que la resistividad en una de las tres direcciones ortogonales puede ser diferente de las otras dos, se puede generalizar que  $\rho_t = \rho_x$ ;  $\rho_l = \rho_y$  y  $\rho_z = \rho_z$ , y si se tiene como modelo de anisotropía eléctrica el mostrado en la fig 2.7 se obtiene

$$\rho_l = \rho_y = \rho_z \quad (24a)$$

$$\rho_t = \rho_x \quad (24b)$$



**Figura 2.7. Modelo teórico de un medio eléctricamente anisotrópico. (Steinich y Marín, 1995).**

Con base en las ecs 24a y 24b se puede reducir la expresión 23, quedando

$$\frac{1}{\rho_t} \left\{ \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta z^2} \right\} + \frac{1}{\rho_t} \frac{\delta^2 V}{\delta x^2} = 0 \quad (25)$$

Esta última es la ecuación de Laplace para un medio anisotrópico.

Para resolver esta ecuación es necesario hacer un cambio de variables donde  $\xi=y$ ,  $\eta=z$  y  $\varepsilon=mx$ , para reducir de tal manera que quede una ecuación similar a la 11 y cuya solución en un sistema coordenado  $(\xi, \eta, \varepsilon)$ , está dada por

$$V_p(\xi, \eta, \varepsilon) = \frac{I\rho_m}{2\pi\sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \varepsilon^2}} \quad (26)$$

y

$$V_p(x, y, z) = \frac{I\rho_m}{2\pi\sqrt{r^2 + m^2x^2}} \quad (27)$$

donde  $\rho_m = \sqrt{\rho_l\rho_t} = m\rho_l = \rho_t / m$ ;  $r^2 = (x^2 + y^2) = (\xi^2 + \eta^2)$  y  $m = \rho_t / \rho_l$ ; de aquí se desprenden dos parámetros, el coeficiente de anisotropía ( $\lambda$ ) y la resistividad media ( $\rho_m$ ). El coeficiente de anisotropía para un medio isotrópico idealmente es igual a 1, pero en casos anisotrópicos, este adquiere un valor superior a 1.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} \quad (28)$$

La resistividad aparente en una de las direcciones es entonces determinada por la resistividad real en las otras dos direcciones (Carpenter et al, 1990). Esto se llama la "paradoja de la anisotropía" (Keller y Frischknecht, 1966). Como se consideró que la resistividad transversal es menor que la resistividad longitudinal y la resistividad en el eje z (ec 29), se obtiene

$$\rho_t < \rho_l, \rho_z \quad (29)$$

$$\rho_{at} = \sqrt{\rho_l\rho_z} > \rho_{al} = \sqrt{\rho_t\rho_z} \quad (30a)$$

$$\rho_{az} = \sqrt{\rho_t \rho_l} > \rho_{al} = \sqrt{\rho_t \rho_z} \quad (30b)$$

Donde  $\rho_{at}$ ,  $\rho_{al}$  y  $\rho_{az}$  son las resistividades aparentes en las direcciones transversal, longitudinal y vertical respectivamente. Las dos resistividades que se pueden medir en la superficie del terreno son la resistividad aparente transversal ( $\rho_{at}$ ) y la longitudinal ( $\rho_{al}$ ). A partir de la ec 30, se tiene que la dirección de máxima permeabilidad es señalada por la dirección de máxima resistividad aparente medida.

#### **II.II.IV Profundidad de investigación**

El concepto de profundidad de investigación fue introducido por *Evjen (1938)* quien definió esta como la profundidad a la que una capa delgada horizontal de terreno contribuye al máximo de la señal total medida en la superficie del terreno. Existe actualmente otro término denominado profundidad de investigación normalizada (NDIC, por sus siglas en inglés), que de acuerdo con *Edward (1977)*, es la profundidad a la cual se reduce a la mitad el total de la señal emitida en la superficie.

La NDIC, de arreglos colineales situados sobre un medio isotrópico es una función de:

- i) Longitud del arreglo (L).
- ii) Profundidad de la capa (z).

Tomando los resultados de *Bhattacharya y Sen (1981)*, donde calcularon la NDIC para varios arreglos de electrodos situados sobre un medio homogéneo anisotrópico y solo considerando el arreglo Wenner, se tiene



$$\text{NDIC} = \frac{8L^2}{3} dz \left\{ \frac{1}{\left[ \left( \frac{L^2}{9} \right) + 4z^2 \right]^{3/2}} - \frac{1}{\left[ \left( \frac{4L^2}{9} \right) + 4z^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad (31)$$

$$\text{NDIC} = \frac{8L\lambda^2 z}{3(\cos^2 \alpha + \lambda^2 \sin^2 \alpha)} dz \left\{ \frac{1}{\left[ \left( \frac{L^2}{9} \right) + \frac{4\lambda^2 z^2}{(\cos^2 \alpha + \lambda^2 \sin^2 \alpha)} \right]^{3/2}} - \frac{1}{\left[ \left( \frac{4L^2}{9} \right) + \frac{4\lambda^2 z^2}{(\cos^2 \alpha + \lambda^2 \sin^2 \alpha)} \right]^{3/2}} \right\} \quad (32)$$

Donde  $\lambda$  es el coeficiente de anisotropía y  $\alpha$  el ángulo con respecto a la horizontal. La ec 31 es para el caso isotrópico y la 32 para el caso con anisotropía.

Como en el modelo de anisotropía planteado (fig 2.7), se consideró un ángulo  $\alpha$  igual a  $\pi/2$ . Entonces la ec 32 se reduce a la ec 31, lo que nos indica que la profundidad de investigación para este caso es la misma que se obtendría en un medio isotrópico.

## II.III Metodología

### II.III.I Equipo

Para el levantamiento de campo con métodos eléctricos, se utilizó un equipo Syscal R1, el cual es un equipo portátil y de fácil manejo. Dicho equipo cuenta con batería interna recargable de 12.7V con un voltaje de salida de hasta 400V a la que adicionalmente, de ser necesario, se le puede sumar una batería externa de 12V. Además, el equipo posee una memoria interna, con capacidad para almacenar 1,022 datos, incluyendo estación y número de línea, tipo y dimensiones del arreglo, voltaje, intensidad, potencial espontáneo (SP), parámetro de tiempo, desviación estándar y cálculo de la resistividad aparente ( $\rho_a$ ). Con este sistema no es necesario llevar un registro escrito y sólo hasta que se realice el trabajo de gabinete se bajan los resultados a cualquier computadora personal, por medio de una conexión con un puerto RS232C.

La brigada de campo consistió en tres personas: el operador y dos ayudantes que se encargaron de colocar los electrodos. Es responsabilidad del operador cargar la batería del equipo, así como preparar el equipo de campo. En el apéndice I se sugiere el equipo mínimo necesario para realizar un levantamiento geoeléctrico.

La localización de los puntos se realizó auxiliándose de un posicionador personal de satélite (GPS) marca GARMIN 50, el cual, ofrece resultados de forma inmediata y con una buena precisión. (Su error en el plano X-Y, es del orden de 15 m).

Los elementos auxiliares para el levantamiento son : cinta métrica (longimetro), cuatro electrodos, cable, martillo, computadora portátil (laptop) o computadora personal (PC), radiotransmisores y brújula. En este trabajo se

realizaron levantamientos hidrogeológicos y estructurales, además, fue necesario el equipo pertinente para cada uno de los casos. Por ejemplo, en el levantamiento estructural se utilizaron nivel, brújula y cinta métrica además de carta geológica y fotografías aéreas. Para el levantamiento hidrogeológico se necesitó de sonda eléctrica y potenciómetro, entre otros.

### II.III.II Dispositivos

El dispositivo utilizado fue el Wenner con distintas aperturas, que variaron de acuerdo con las condiciones imperantes en los distintos medios. También se utilizaron diferentes espaciamientos azimutales que generalmente variaron entre los 10 y los 30°, aunque algunos autores proponen que las variaciones azimutales sean de cuando más 20°; en campo las condiciones no son las ideales. Además, se intenta que el muestreo sea bien distribuido, de tal manera, que se pueda extrapolar la información, por lo que se consideró en este trabajo que cuando menos existieran tres valores por cuadrante (fig 2.8).

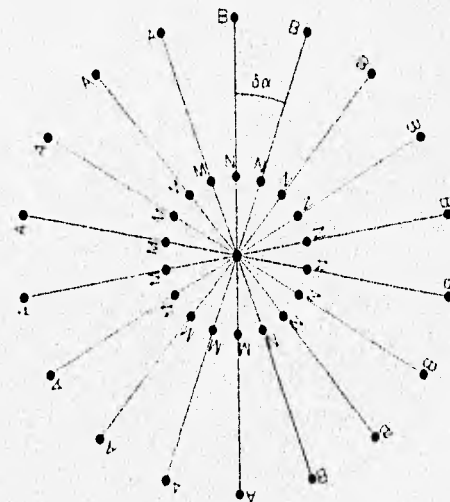


Figura 2.8. Forma de graficar los SAG.

Cabe recordar que la dirección que se presente como máximo en la roseta será aquella que nos defina la dirección de máxima conductividad hidráulica, contrario a lo que se pueda esperar, esto debido a la "paradoja de la anisotropía" (Orellana, 1982), que ya se trató con anterioridad en la sección II.II.III.

### **II.III.III Limitaciones**

El método tiene algunas limitaciones en campo. Una de las limitantes para los SAG es que la pendiente no exceda de un porcentaje similar al que se utiliza en los SEV (aproximadamente el 30%). (Orellana, 1982). La otra limitante es la penetración de la corriente eléctrica. Empíricamente se piensa que la penetración vertical es aproximadamente equivalente al espaciamiento  $a$ , cuando se utiliza el dispositivo Wenner (ver la sección de profundidad de investigación, en este mismo capítulo.).

El control que debe existir hidrogeológicamente debe ser exacto, ya que se corre el riesgo de interpretar de manera errónea la existencia de varias direcciones en la roseta de los SAG; por otro lado se debe tomar en cuenta que la información que se obtiene tiene que ser integrada con el resto del estudio. Como en todos los estudios geofísicos, es necesario realizar las verificaciones de campo para hacerlo compatible con los estudios geológicos.

Un tema que merece especial atención es la verificación de lo que se considera en métodos geoelectricos como la macro y la microanisotropía.

En estudios geoelectricos la macro y micro anisotropía son reconocidas en las siguientes formas:

**(a) Microanisotropía**

Está presente en rocas estratificadas con estructuras homogéneas. Cristales elongados y planos en capas de arcilla separadas por láminas capilares de agua, son buen ejemplo de microanisotropía.

**(b) Macroanisotropía**

Es resultado de la:

- i) Presencia de planos paralelos sucesivos y diferentes conductividades,
- ii) Grietas distribuidas en direcciones preferentes,
- iii) Estructuras largas lineales, etc.

También dos capas con diferentes conductividades y espesores definidos se comportan como un medio homogéneo anisotrópico. Alternancia de arenisca y pizarra, dan un excelente ejemplo de macroanisotropía.

De hecho, la distinción entre micro y macroanisotropía es vaga y este no es un buen método para encontrar la diferencia de contribución de micro y macroanisotropía en las formaciones geológicas, ya que finalmente el total de la anisotropía es el producto de la micro y macroanisotropía.

U N A M



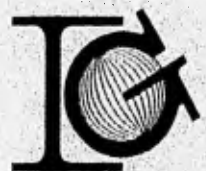
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERO GEOFISICO

III  
tres

" INVESTIGACIONES DE  
CAMPO Y RESULTADOS "

c a p í t u l o

TESIS PROFESIONAL



ISABEL SIMON VELAZQUEZ

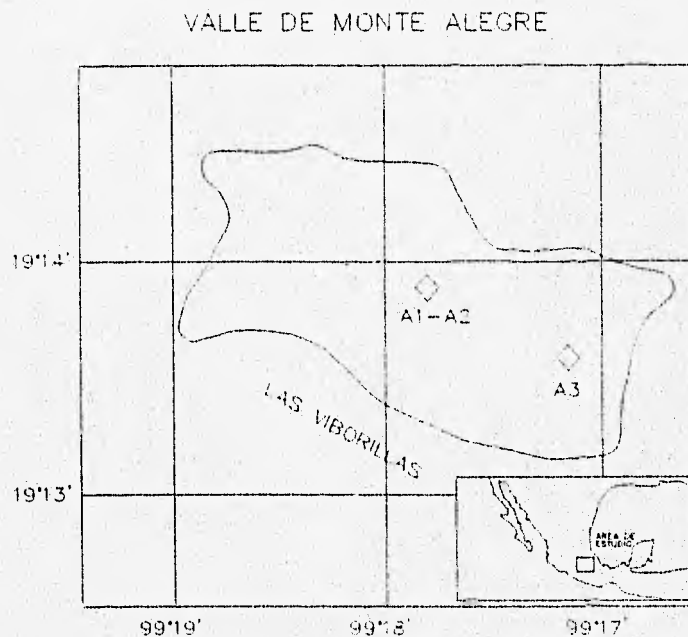
## CAPÍTULO III

### Investigaciones de campo y resultados

#### III.1 Zona uno Ajusco, D F

##### III.1.1 Hidrogeología

El área de estudio se encuentra entre las coordenadas  $19^{\circ} 13'$  de latitud norte y los  $99^{\circ} 16' 30''$  de longitud oeste y las coordenadas  $19^{\circ} 14' 43''$  de latitud norte y los  $99^{\circ} 19' 16.5''$  de longitud oeste. Está ubicada en la sierra del Ajusco que pertenece al eje neovolcánico. Este sitio se conoce como "El valle de Monte Alegre" (fig 3.1). La hidrogeología de la zona ha sido descrita por *Morales (1996)*.



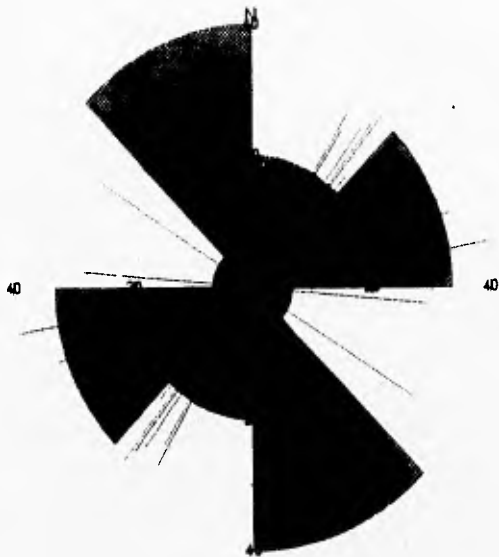
**Figura 3.1** Localización del área de estudio

Esta área se caracteriza por el emplazamiento de varios domos de lava andesítica. La roca de composición andesítica se encuentra altamente fracturada, lo que favorece la infiltración del agua de lluvia y de escurrimiento. La formación Ajusco está compuesta de andesita porfídica con fenocristales de plagioclasa zoneada y cristales de oxyhorblenda y augita incluidos en una matriz vítrea con andesina y hematita. Mucho del volumen de esta roca está fuera del área mapeada y se calcula un espesor mayor de 900 m (*Delgado y Martín del Pozo, 1993*). Los volcanes Ajusco, Panza y conos asociados están alineados sobre un sistema de fracturas N65°W. Varias fallas normales son paralelas a este alineamiento. El suelo del área de estudio tiene un espesor variable, el cual varía desde 0.30 m en las partes más altas y hasta más de 10 metros, conforme se llega al valle (*Morales, 1996*). El nivel freático se encuentra a más de 350 m de la superficie (*Ortega, 1985*).

Dentro del área de estudio, existen alineamientos de fracturas con una dirección preferencial de N65°W (*Chávez-Guillén, 1988, Delgado y Martín del Pozo, 1993*). *Morales (1996)* ha estado realizando un estudio de geología estructural para determinar a detalle cual(es) es(son) la(s) dirección(es) preferencial(es) de las diaclasas y fracturas así como sus echados y aperturas. La roseta regional que se obtuvo confirma los resultados de *Delgado y Martín del Pozo (1993)* a nivel regional, pero difiere a nivel local para la zona que se está estudiando. *Morales (1996)*, propuso una separación por familias, ya que se encontró que existen diferentes familias a nivel local. Para la verificación de este estudio, se tomaron los resultados de tres sitios cercanos donde se corrieron los SAG (fig 3.2).

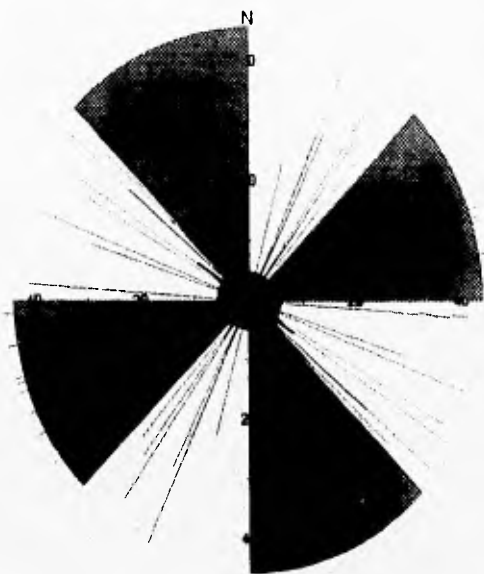


Diagrama de polos y rumbo principal de fractura.  
Familia 5, cercana al SAG Ajusco-1



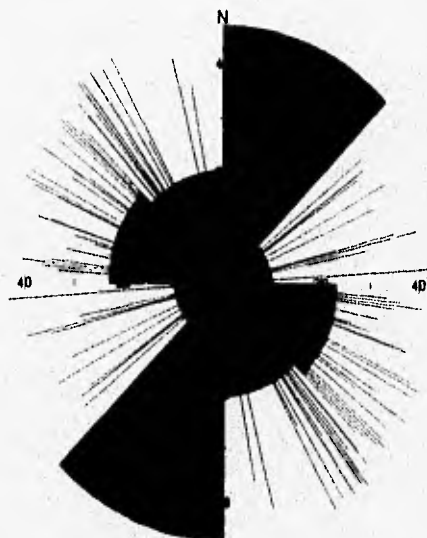
Número de muestras 123

Diagrama de polos y rumbo principal de fractura.  
Familia 7, cercana al SAG Ajusco-2.



Número de muestras 115

Diagrama de polos y rumbo principal de fractura.  
Familia 6, cercana al SAG Ajusco-3



Número de muestras 78

**Figura 3.2** Diagrama de polos de los planos de fracturas, división por familias de donde interesan las a)5, b)6 y c)7. (Morales, 1996).

### III.1.11 Resultados

En noviembre de 1995, en el valle de Monte Alegre, se realizaron tres Sondeos Azimutales Geoelectricos (SAG), con las coordenadas y aperturas que se indican en la tabla 3.1.1.

**TABLA 3.1.1: NÚMERO DEL SONDEO, LOCALIZACIÓN, APERTURA**

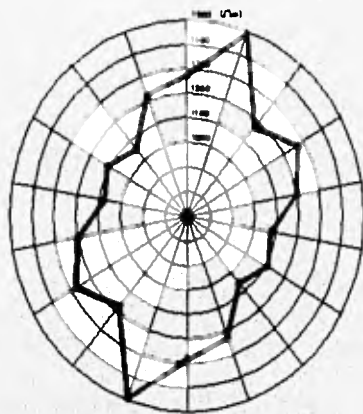
<b>Sondeo</b>	<b>Latitud Norte</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Apertura del arreglo a</b>
Ajusco 1	19° 14' 8.00"	99° 17' 47.30"	9 m
Ajusco 2	19° 13' 58.10"	99° 17' 48.80"	9 m
Ajusco 3	19° 13' 50.70"	99° 17' 10.90"	20 m

Los resultados de los sondeos se presentan en las figs 3.3a a la 3.3c. y en la tabla 3.1.2.

**TABLA 3.1.2. RESULTADOS DE CAMPO PARA CADA UNO DE LOS SONDEOS**

<b>Azimut (ángulo con respecto al norte)</b>	<b>Sondeo Ajusco 1 <math>\rho_a(\Omega/m)</math></b>	<b>Sondeo Ajusco 2 <math>\rho_a(\Omega/m)</math></b>	<b>Sondeo Ajusco 3 <math>\rho_a(\Omega/m)</math></b>
0	1273.60	1117.00	616.90
20	1490.70	1201.50	627.80
40	1172.70	1314.50	623.00
60	1274.50	1294.30	573.70
80	1200.20	1305.70	547.80
100	1078.00	1448.60	547.10

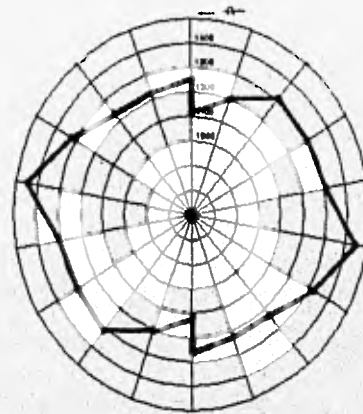
120	1111.40	1322.70	586.90
140	1058.60	1232.10	591.70
160	1225.30	1225.30	645.50
180	1278.40	1255.60	632.40



AJUSCO 1 (a)

$$\lambda = 1.18$$

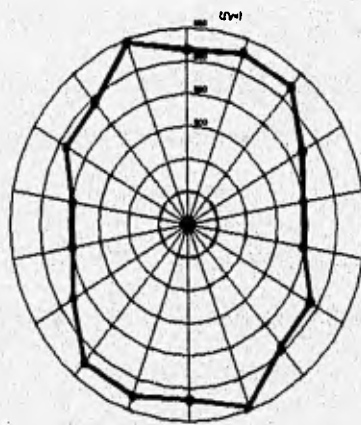
$$a = 9 \text{ m.}$$



AJUSCO 2 (b)

$$\lambda = 1.14$$

$$a = 9 \text{ m.}$$



AJUSCO 3 (c)

$$\lambda = 1.08$$

$$a = 20 \text{ m.}$$

Figura 3.3 SAG a) Ajusco 1, b) Ajusco 2 y c) Ajusco 3.

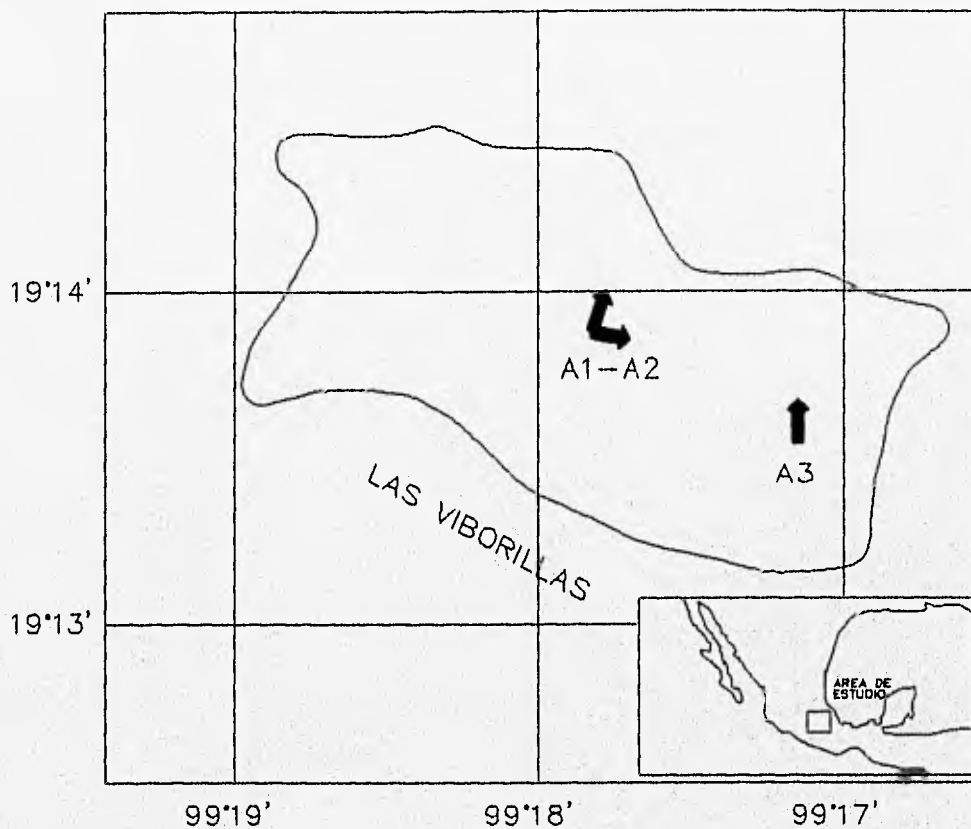
TABLA 3.1.3 COEFICIENTES DE ANISOTROPÍA CALCULADOS PARA CADA SONDEO

Número de sondeo	Coefficiente de anisotropía
Ajusco 1	$\lambda=1.18$
Ajusco 2	$\lambda=1.14$
Ajusco 3	$\lambda=1.08$

### III.I.III Discusión y conclusiones

Los tres SAG del valle de Monte Alegre sugieren que el medio es heterogéneo y presenta anisotropía, dando como resultado que existen direcciones preferenciales de flujo. El SAG-Ajusco 1 muestra dos valores máximos con una orientación de N20°E y de N60°E. Para el SAG-Ajusco 2 se observa un máximo con dirección preferente S80°E. Por lo que respecta al tercer SAG-Ajusco 3 se tiene una dirección con mucho mayor definición ya que participan más valores en la presentación del máximo que para este caso presenta una alineación casi norte-sur. Estos resultados verifican la tesis propuesta solo a un nivel local, además de que se presentan variaciones debido a la profundidad de investigación ya que los dispositivos fueron realizados con distinta apertura. En el caso del SAG-Ajusco 1 y del SAG-Ajusco 2, estos presentan una buena correlación con los datos estructurales, ya que se realizaron sobre un medio fracturado. En el caso del SAG-Ajusco 3, este fue realizado en un medio granular donde el principal factor que afecta es el gradiente topográfico que influye sobre el gradiente hidráulico.

VALLE DE MONTE ALEGRE



**Figura 3.4 Vista en planta de las direcciones localizadas en el valle de Monte Alegre, Ajusco, para la conductividad hidráulica con los SAG.**

### III.II Zona dos: Valle de Hermosillo, Sonora

#### III.II.1 Hidrogeología

El Valle de Hermosillo se encuentra en el Estado de Sonora, al noroeste de la República Mexicana. El área estudiada está en la parte suroeste de Sonora, a partir de la ciudad de Hermosillo y en dirección a la bahía de Kino, entre las coordenadas  $28^{\circ} 15'$  de latitud norte y  $110^{\circ} 45'$  de longitud oeste y  $29^{\circ} 15'$  de latitud norte y  $112^{\circ} 00'$  de longitud oeste (fig 3.5).

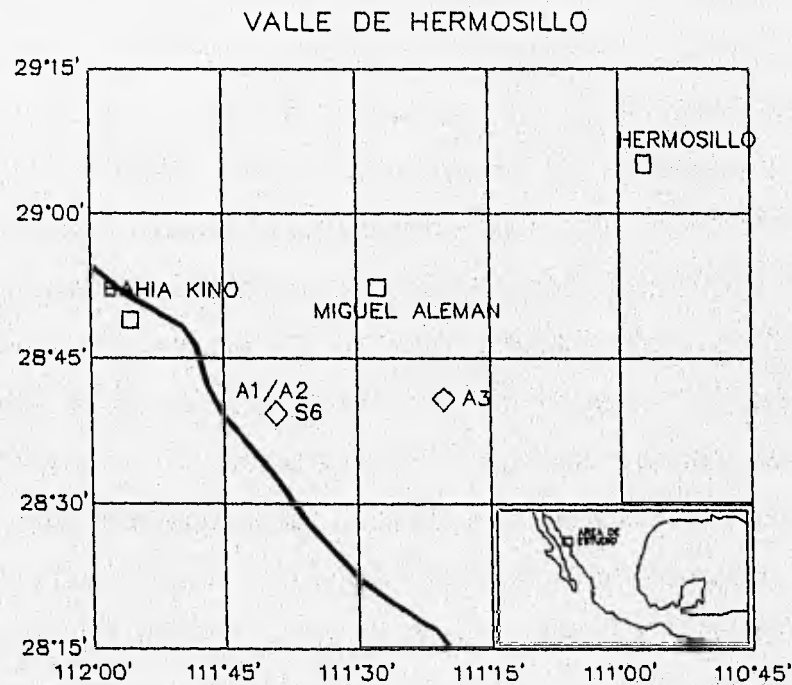


Figura 3.5. Ubicación del área de estudio

En el área se tiene un gradiente hidráulico bajo, según las cartas editadas por la Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP, 1987); este tiene una variación de entre 100 y 1000 mm/km.

En el área se concentra un importante desarrollo agropecuario, que se dedica principalmente a los monocultivos, consecuencia de esto es la alta explotación del acuífero a través de pozos de aproximadamente 140 m de profundidad (INEGI, 1993). Una grave secuela a este fenómeno es la invasión por intrusión salina que actualmente sufre toda esta franja costera, (INEGI, 1993). Sumado a este fenómeno, probablemente, el área esté expuesta a una contaminación por fertilizantes u otros químicos utilizados en la actividad agrícola. La geología del lugar indica que las rocas son sedimentarias presentando básicamente suelo de tipo aluvial (INEGI, 1993).

Se considera que en la costa de Hermosillo, se tienen dos acuíferos interconectados, denominados como acuífero superior e inferior. El primero está constituido por material aluvial con un espesor promedio de 200 m, caracterizado por limo y arcilla en los primeros 100 m además de arena y grava en los 100 restantes. Subyaciendo a este paquete, se encuentra un lente de arcillas con un espesor de 0 a 400 m para finalmente encontrar al acuífero inferior constituido por material clástico y rocas extrusivas con espesores variables de hasta 700 m. Por las condiciones del experimento nuestra profundidad de investigación se vio limitada a la parte superior, es decir, la zona no saturada, donde, además no influye la intrusión salina ya que ésta afecta principalmente el acuífero inferior en forma de estelas (Steinich, 1995). Según la Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas (INEGI, 1993) la concentración tan elevada de pozos genera las direcciones de flujo que se observan en la figura 3.6, donde se puede observar que se forma una especie de cono de abatimiento, hacia la zona central, generando un distribución radial.

# ZONA COSTA DE HERMOSILLO

111°30'

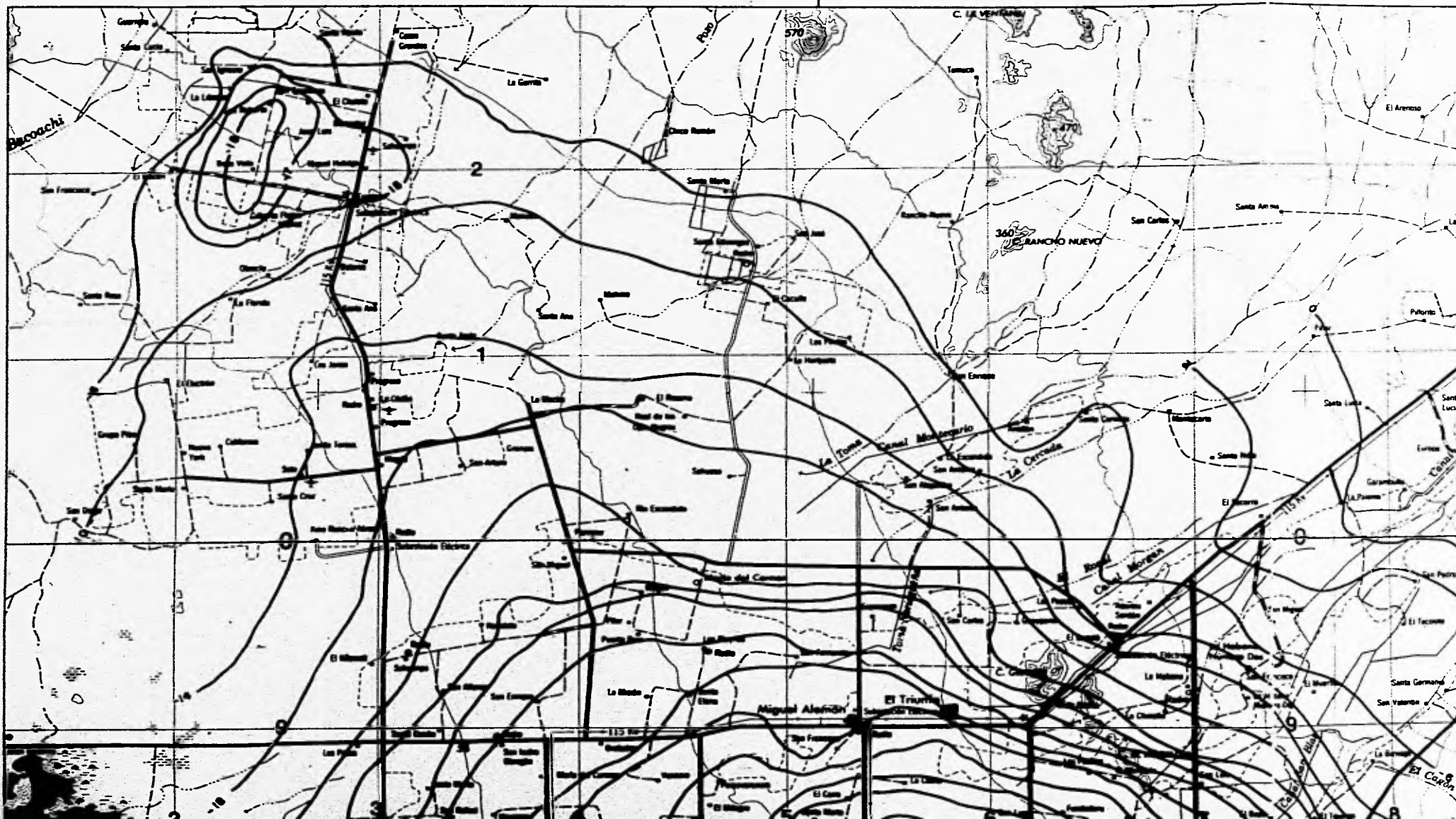






Figure 3.6 Can

26°45'

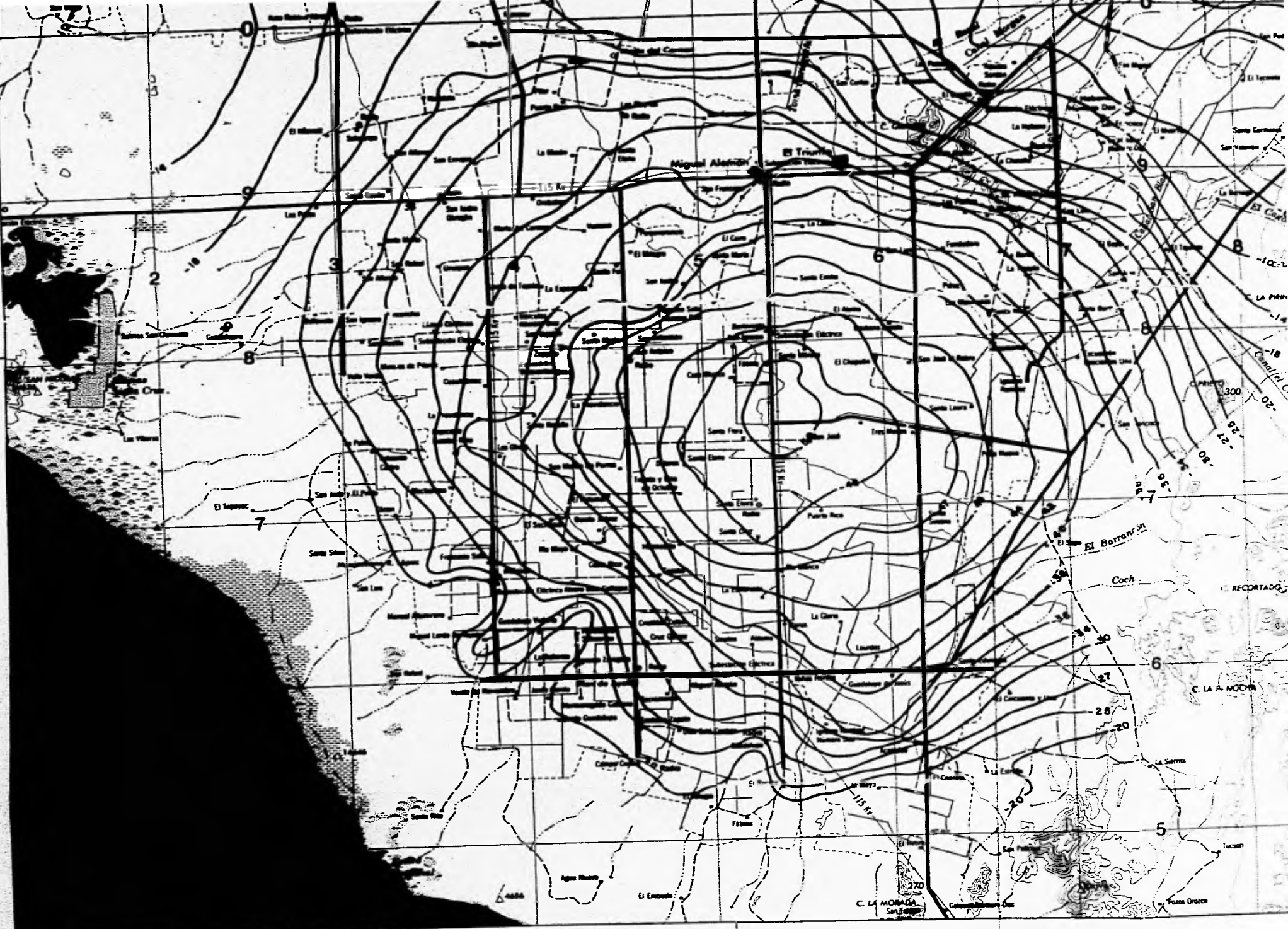


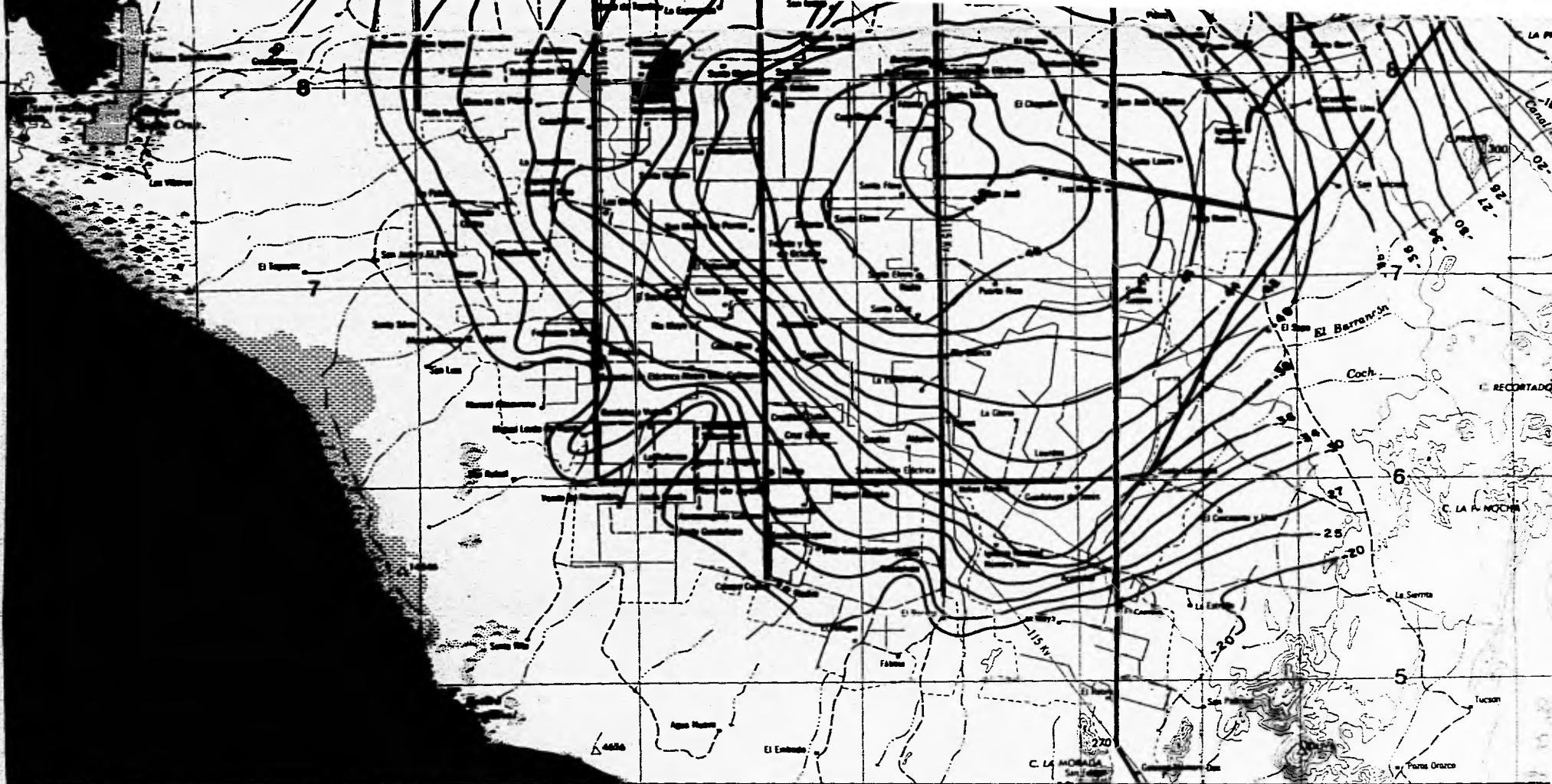
Figura 3.6 Carta hidrogeológica del Valle de Hemosillo (I)

111°30'

ELEVACION DEL M

ESTAD CO 1987

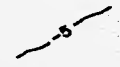
Figura 3.6 Carta hidrogeológica del Valle de Hermosillo (INEGI, 1993).



111°30'

ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO 1987.

S I M B O L O G I A



ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR.

PLANO 6.21

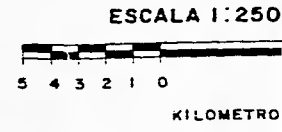
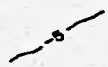


Figura 3.6 Carta hidrogeológica del Valle de Hermosillo (INEGI, 1993).



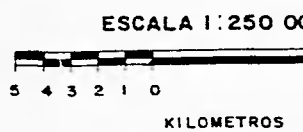
111°30'

S I M B O L O G I A



ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO EN METROS  
SOBRE EL NIVEL DEL MAR.

ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO 1987.



PLANO 6.21

### III.II.II Resultados

En el Valle de Hermosillo, se realizaron en de diciembre de 1995, tres SAG, en dos distintos sitios de esta área. Los datos del espaciamento usado así como de los resultados se muestran en las siguientes tablas.

*TABLA 3.2.1. NÚMERO DE SONDEO, UBICACIÓN Y APERTURA*

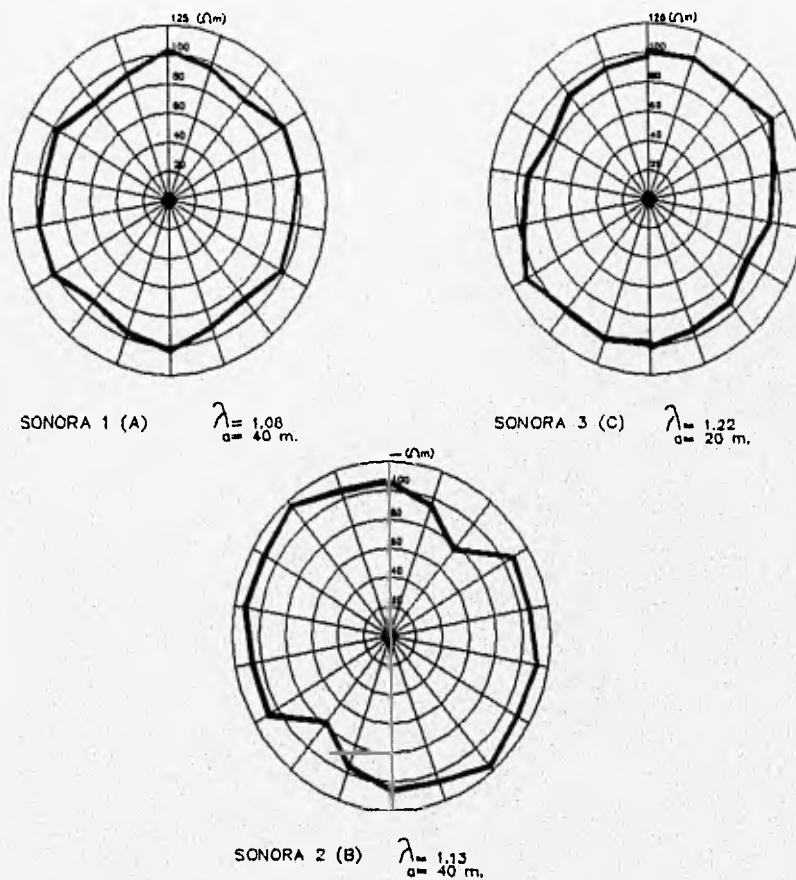
<b>Sondeo</b>	<b>Latitud Norte</b>	<b>Longitud Oeste</b>	<b>Apertura del arreglo a</b>
Sonora 1	28° 41' 10.5"	111° 37' 59.7"	40 m
Sonora 2	28° 41' 10.5"	111° 37' 59.7"	20 m
Sonora 3	28° 41' 04.5"	111° 18' 25.0"	40 m

*TABLA 3.2.2. RESULTADOS DE CAMPO PARA CADA UNO DE LOS SONDEOS*

<b>Azmut</b>	<b>Sondeo Sonora 1</b>	<b>Sondeo Sonora 2</b>	<b>Sondeo Sonora 3</b>
	$\rho_a(\Omega/m)$	$\rho_a(\Omega/m)$	$\rho_a(\Omega/m)$
0	96.75	106.79	101.55
20	90.28	95.63	102.80
40	100.96	77.57	
60	98.80	108.90	108.31
80	95.04	107.85	96.52
100	97.47	112.12	93.37
120	87.74	110.17	85.29
140	91.81	115.85	92.73
160	103.60	105.84	94.73
180	96.60	106.29	97.78

TABLA 3.2.3. COEFICIENTE DE ANISOTROPÍA

Número de sondeo	Coefficiente de anisotropía
Sonora 1	$\lambda=1.08$
Sonora 2	$\lambda=1.22$
Sonora 3	$\lambda=1.13$



Figuras 3.7a a la 3.7c. Rosetas de los SAG. Sonora 1 al Sonora 3

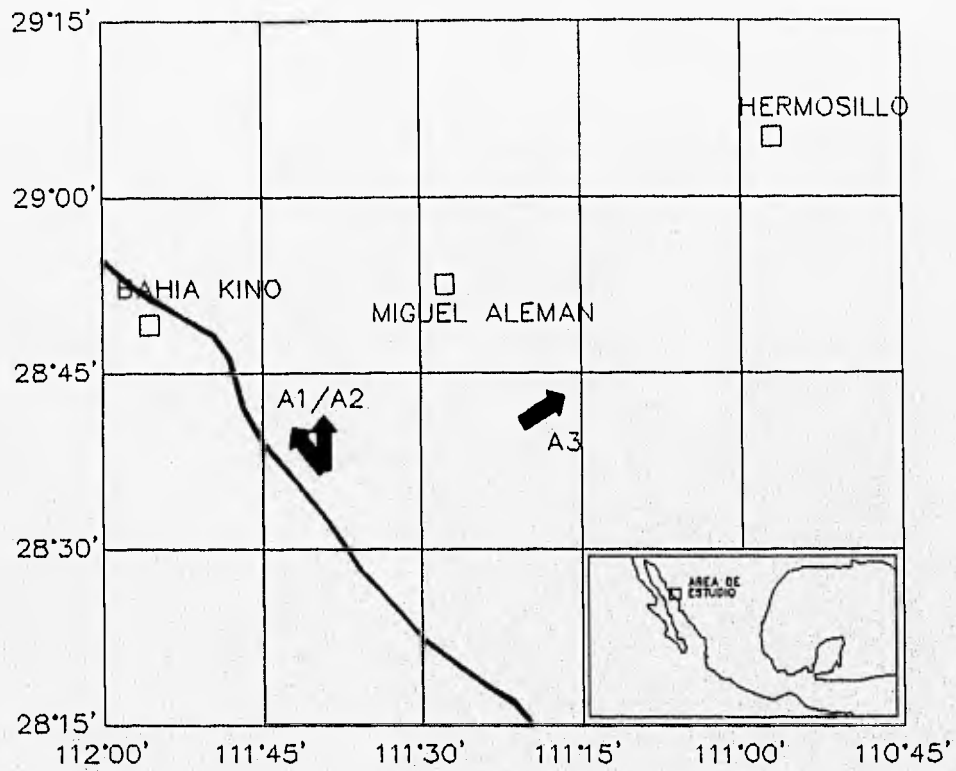
### III.II.III Discusión y conclusiones

Para el SAG Sonora 1. La dirección que aparece como preferencial corresponde con el eje N20W. En el caso del SAG Sonora 2, el cual fue realizado en el mismo sitio pero con una apertura a menor ( $a=20$  m) la dirección preferencial que se obtiene es la de N40° W, que concuerda básicamente con la anterior, es decir no se detectó una variación notable con respecto a la diferencia en profundidad de aproximadamente 20 m. Sin embargo, sí se observa un incremento en el coeficiente de anisotropía. Es posible que el medio presente una mayor heterogeneidad e irregularidades debido a la poca compactación del suelo, es decir, la parte más somera, con respecto a partes un poco más profundas que probablemente se encuentran sometidas a mayores presiones y en las que el cambio litológico también influye. En el caso del SAG Sonora 3, la dirección es N60° E. También se observa un desfase entre las lecturas de 0° y los 180°, esto debido a errores de medición y pequeñas variaciones en cuanto al sitio exacto de la lectura.

En el caso del SAG Sonora 1 se ve una excelente correlación con el gradiente hidráulico (fig 3.6) al presentar ortogonalidad con la isolinia del nivel estático; pero en el caso del SAG Sonora 3 la dirección preferencial de la conductividad hidráulica está influida por el sistema de riego que utilizan en esta zona, ya que en este distrito se utiliza un sistema de riego circular que al condensarse o infiltrarse el agua, genera un agrietamiento con la misma tendencia esto es circular.

De cualquier forma el SAG Sonora 3 conserva buena relación con el plano de gradiente hidráulico (fig 3.6). Además, debido a que el medio es aluvial y está sobre una capa de arcillas, los agrietamientos en la zona de arcillas no son observables en la superficie.

VALLE DE HERMOSILLO



**Figura 3.8 Vista en planta de los SAG así como las direcciones preferenciales de conductividad hidráulica que se obtuvieron**



### III.III Zona tres. Yucatán

#### III.III.I Hidrogeología

La Península de Yucatán se encuentra en la parte sureste de la República Mexicana entre las coordenadas 20° 00.0' de latitud norte y 90° 30.0' de longitud oeste y las coordenadas 21° 30' de latitud norte y 89° 00.0' de longitud oeste. El área de estudio está constituida por un acuífero cárstico, en el cual, el régimen de flujo es a través de un sistema bien desarrollado de cavernas interconectadas, por las cuales se realiza el transporte de fluidos (Perry, et al, 1995). Existe una zona de alta permeabilidad, la cual tiene como expresión superficial un anillo de cenotes. La densidad de este anillo varía de varios cenotes por kilómetro a varios cenotes entre kilómetros (Marín, 1990; Steinich y Marín, 1995; Perry et al, 1995). El nivel freático en la zona es somero, varía de algunos centímetros a 20 metros de la superficie. El gradiente hidráulico es poco perceptible apenas de 7 a 10 mm/km (Marín, 1990). La reciente perforación de núcleos supervisados por Marín en 1995, en esta zona, ha dado idea de la composición petrográfica. Las rocas son principalmente calizas y evaporitas con algunos lentes de arcilla.

#### III.III.II Resultados

El trabajo que a continuación se presenta, es una recopilación de los siguientes trabajos: Steinich y Marín (1995) y Steinich, 1996. Los levantamientos de los sondeos se realizaron durante una campaña muy extensa entre 1993 y 1995.

De estos sondeos se eligieron cuatro SAG con arreglo Wenner; las ubicaciones y aperturas se dan en la tabla 3.3.1, que se presenta a continuación

**TABLA 3.3.1. UBICACIÓN Y APERTURA DE LOS SAG YUCATÁN 1 AL YUCATÁN 4.**

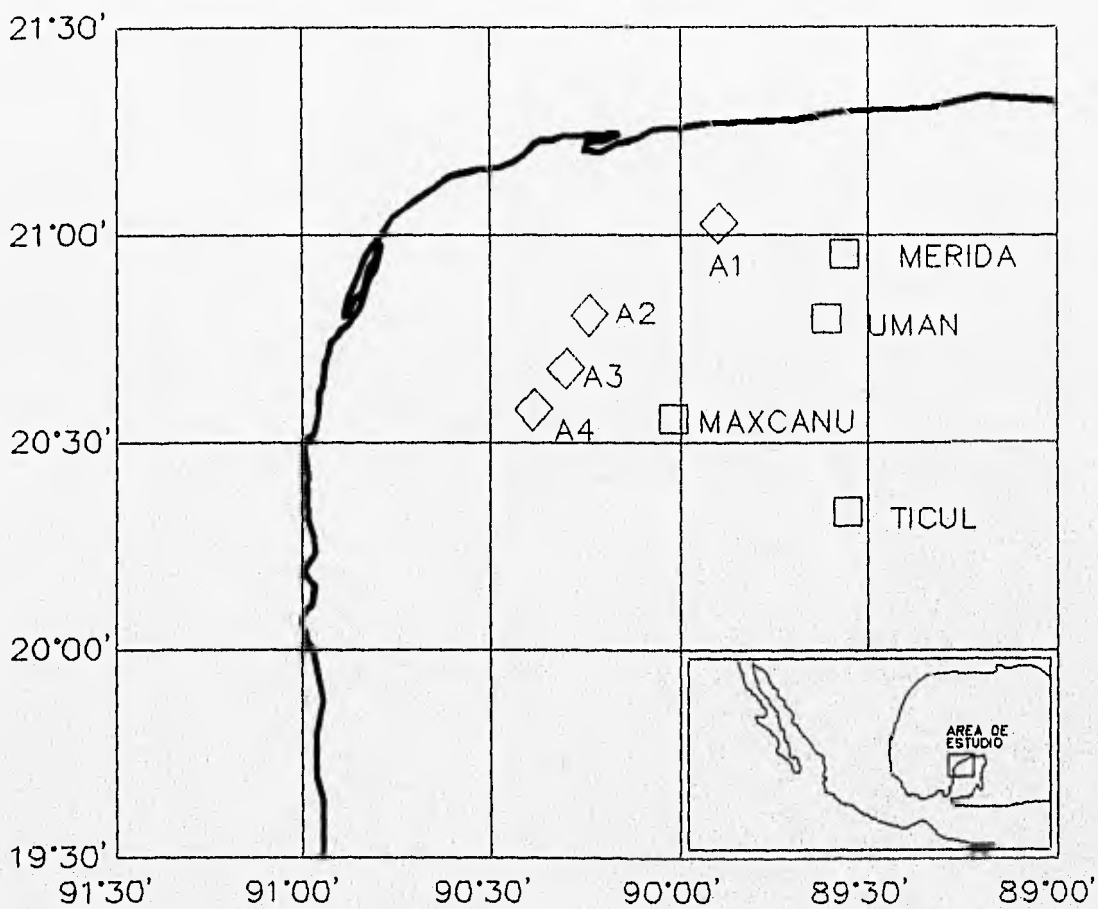
<b>Sondeo</b>	<b>Latitud norte</b>	<b>Longitud oeste</b>	<b>Apertura del arreglo a</b>
Yucatán 1	21° 05'	89° 55'	10 m
Yucatán 2	20° 51'	90° 10'	14 m
Yucatán 3	20° 43'	90° 15'	20 m
Yucatán 4	20° 40'	90° 17'	20 m

Los resultados de campo se pueden observar en la tabla 3.3.2

**TABLA 3.3.2. RESULTADOS DE CAMPO. (STEINICH Y MARÍN, 1995)**

<b>Azimuth</b>	<b>Sondeo Yucatán 1 <math>\rho_a</math> (<math>\Omega/m</math>)</b>	<b>Sondeo Yucatán 2 <math>\rho_a</math> (<math>\Omega/m</math>)</b>	<b>Sondeo Yucatán 3 <math>\rho_a</math> (<math>\Omega/m</math>)</b>	<b>Sondeo Yucatán 4 <math>\rho_a</math> (<math>\Omega/m</math>)</b>
0°	13.8	10.6	8.1	60.0
30°	10.6	9.7	6.6	46.4
60°	9.6	12.2	5.3	60.6
90°	11.6	14.3	5.5	76.1
120°	11.1	10.9	5.6	63.2
150°	19.0	9.6	6.9	57.4
180°	13.7	11.0	8.2	60.0

NOROESTE DE LA PENINSULA DE YUCATAN



**Figura 3.9. Ubicación del área de estudio, así como la localización de los SAG**

TABLA.3.3.3 COEFICIENTE DE ANISOTROPÍA PARA LOS SAG YUCATÁN 1 AL YUCATÁN 4. (STEINICH Y MARÍN, 1995).

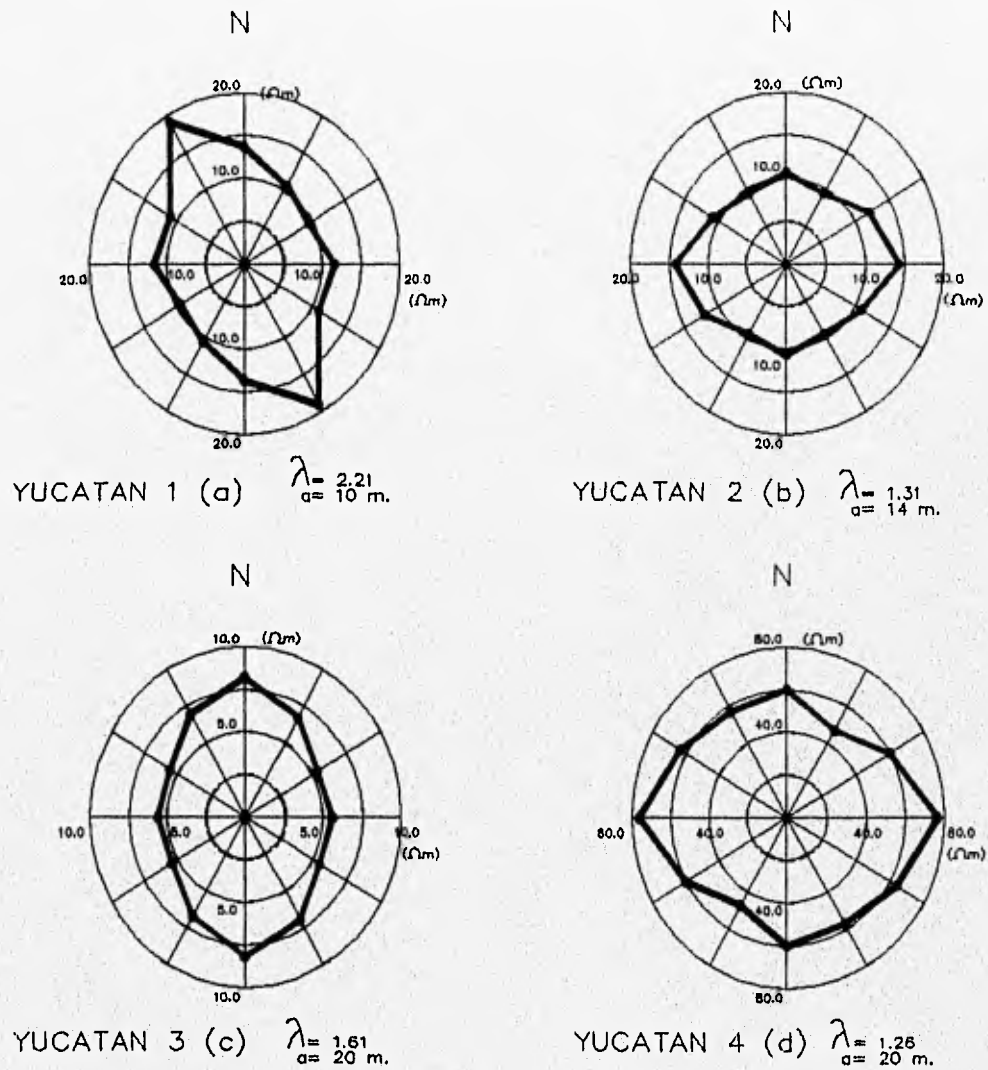
Número de sondeo	Coefficiente de anisotropía
Yucatán 1	$\lambda=2.21$
Yucatán 2	$\lambda=1.31$
Yucatán 3	$\lambda=1.61$
Yucatán 4	$\lambda=1.26$

### III.III.III Discusión y conclusiones

Integrando los datos geofísicos con los hidrogeológicos, se ha encontrado que las direcciones preferenciales de la conductividad hidráulica dan hacia la costa. Este trabajo tuvo la penetración necesaria para llegar a la zona saturada, y por tanto, se pudieron caracterizar las zonas preferenciales de la conductividad hidráulica en el acuífero. También se advierte la influencia del anillo de cenotes, que es caracterizado como una zona de alta permeabilidad. Se puede observar que los valores de los coeficientes de anisotropía son en general altos, esto se explica debido a que el medio, que tiene grietas y fisuramientos debido a esfuerzos y disolución, se comporta de manera similar a un medio fracturado con un ángulo de buzamiento vertical.

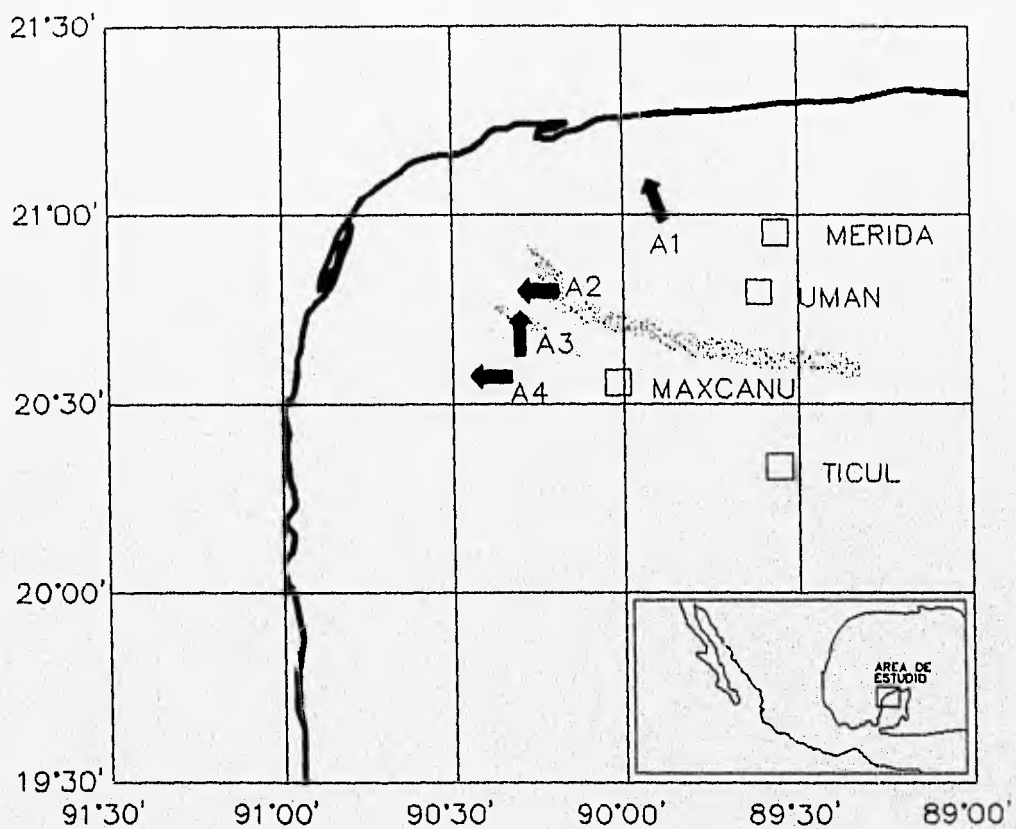
Las direcciones que se obtuvieron para el SAG Yucatán 1 fue N20<sup>0</sup>W, para los SAG Yucatán 2 y 4 son E-W y para el SAG Yucatán 3 es N-S (fig 3.10 y 3.11). De ser este un medio anisotrópico pero homogéneo, se podría observar una especie de abanico donde las direcciones estarían únicamente influidas por el gradiente hidráulico y estas apuntarían hacia la costa; pero como en este

caso, dos de los sondeos se hicieron sobre una zona de alta permeabilidad (anillo de cenotes); se observó esta influencia sobre los SAG Yucatán 2 y Yucatán 3 (fig 3.11).



**Figura 3.10. Rosetas de los resultados de los SAG a) Yucatán 1, b) Yucatán 2, c) Yucatán 3 y d) Yucatán 4**

NOROESTE DE LA PENINSULA DE YUCATAN



**Figura 3.11.** Direcciones preferenciales de la conductividad hidráulica calculadas con los SAG.

U N A M



FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERO GEOFISICO

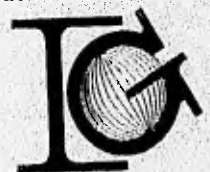
**IV**  
**cuatro**

**" CONCLUSIONES "**

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

**c a p í t u l o**

TESIS PROFESIONAL



ISABEL SIMON VELAZQUEZ

## **CAPÍTULO IV**

### **Conclusiones**

Como resultado de este trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones

- 1) La técnica de los SAG ofrece buenos resultados cuando se integra con estudios hidrogeológicos, ya que permite identificar la dirección preferencial de la conductividad hidráulica en acuíferos porosos, fracturados o cársticos. Asimismo, puede ser utilizado tanto en la zona no saturada como en la zona saturada. Combinando esta técnica con pruebas de bombeo, se puede caracterizar mejor el tensor de la conductividad hidráulica.
- 2) Esta técnica permite caracterizar sitios hidrogeológicamente disminuyendo el número de perforaciones. Es un método barato y fácil de implantar.
- 3) El método tiene las limitaciones comunes para cualquier método eléctrico, como son interferencias por arcillas, agua salada, etc.
- 4) Se recalca el hecho de que al utilizarse en medios fracturados, ya sea por esfuerzos o disolución, como en el caso de Yucatán y El Ajusco, el método funciona de mejor manera que sobre medios con una distribución homogénea como lo son los acuíferos granulares. La diferencia no es muy grande.
- 5) Cuando la técnica se probó a dos distintas aperturas para observar la diferencia que se produce en la dirección de la conductividad hidráulica a distintas profundidades, se vio que la variación en la dirección obtenida no es muy grande, no así con el coeficiente de anisotropía ya que este sí tuvo una



variación; de cualquier forma se puede considerar que la dirección obtenida es la misma para ese mismo estrato.

## **Bibliografía**

- ASTIER, Jean Louis, "Geofísica Aplicada a la Hidrogeología", revisado por Ernesto Orellana, 1era ed, Paraninfo, Madrid, España (1975), 344 pp
- BEAR, J, "Dynamic of Fluids in Porous Media". American Elsevier, Nueva York (1972), 764 pp
- BHATTACHARYA, B B y Sen, M K, "Depth of Investigation of Collinear Electrode Arrays Over Homogeneous Anisotropic Half-space in Direct Current Methods", Geophysics, vol 46, N° 5 (1981), 768-780 pp
- CARPENTER, E W, "Some Notes Concerning the Wenner Configuration", Geophysical Prospecting, vol 3 (1955), 388-402 pp
- CARPENTER, E W, y Habberijam, G M, "A Tripotential Method for Resistivity Prospecting", Geophysics, vol. 21, N° 2 (1956), 455-469 pp
- CARPENTER, P J, Kaufmann, R S y Price, B, "Use of Resistivity Soundings to Determine Landfill Structure". Ground Water, vol 28, N° 4 (1990), 560-575 pp
- CHÁVEZ-GUILLÉN, Rubén, "Región 10, Faja Volcánica Transmexicano", The Geology of North America, vol 0-2, Hidrogeolgy, The Geological Society of America, Boulder, Colorado (1988), 93-98 pp
- DELGADO Granados, Hugo y Martín del Pozo, Ana Lilian, "Pliocene to Holocene Volcanic Geology at the Junction of Las Cruces, Chichinautzin and Ajusco Renges, Southwest of Mexico City", Geofísica Internacional, vol 32, N° 3 (1993), 511-522 pp
- DOBRIN, Milton B, " Introduction to Geophysical Prospecting", 3era ed, McGraw-Hill, E U A (1976), 630 pp
- EDWARD, L S, "A Modified Pseudo Section for Resistivity and I P", Geophysics, vol 42 (1977), 1020-1036 pp

- EVJEN, H M, "Depth Factor and Resolving Power in Electrical Measurements", *Geophysics*, vol 3 (1938), 78-95 pp
- FREEZE R, Allan y Cherry, John A, "Groundwater", 1era ed, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N J, (1979), 604 pp
- HABERJJAM, G M, "The effect of anisotropy on square array resistivity measurements", *Geophysical Prospecting*, vol 20 (1972), 249-266 pp
- INEGI, "Estudio Hidrogeológico del Estado de Sonora, México", Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, D F (1993), 100-104 pp
- KOEFOED, Otto, "Geosounding Principles, 1. Resistivity Sounding Measurements", *Serie Methods in Geochemistry and Geophysics*, vol 14A, Elsevier, Amsterdam (1979), 276 pp
- KELLER, G V y Frischknecht, F C, "Electrical Methods in Geophysical Prospecting", Pergamon Press, Oxford, Londres (1966), 519 pp
- MARÍN, Luis E, "Field Investigations and Numerical Simulation of Groundwater Flow in the Karstic Aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico", tesis doctoral, Northern Illinois University, Dekalb Illi (1990), 183 pp
- MARÍN, L. E. y Perry, E. C. "The Hidrogeology and Contamination Potential of Northwestern Yucatan, Mexico, *Geofísica Internacional*, vol 33, N° 4, México, D F (1994), 619-623 pp
- MARÍN, L E, "Informe Final Sobre las Perforaciones en Yucatán" Reporte técnico, Instituto de Geofísica, UNAM (1994)
- MORALES, René, "Caracterización Hidrogeológica del Valle de Monte Alegre, Ajusco." tesis de maestría, Colegio de Posgraduados, Chapingo (1996), 185 pp
- MÜLLER, M, "Der Einfluß der Anisotropie der Gesteinsmedien auf die Verteilung nieder periodischer elektromagnetischer Wechselfelder", *Gerlands Beiträge z. Geophysik*, vol 30 (1931), 142-195 pp

- NEGI, J G y Saraf, P D, "Anisotropy in Geoelectromagnetism" Serie: Methods in Geochemistry and Geophysics, vol, 28, Elsevier, Holanda (1989), 238 pp
- ORELLANA, E, "Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua", 2da ed, Paraninfo, Madrid, España (1982), 579 pp
- ORTEGA Guerrero, M A, " Analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the basin of Mexico", tesis de maestria, Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá (1985), 45 pp
- PERRY, E C, Marín, L E, McClain, J, y Velázquez, G, "The Ring of Cenotes (sinkholes), Northwest Yucatan, Mexico: Its Hydrogeologic Characteristics and Possible Association With the Chicxulub Impact Crater", Geology, vol 23, N°.1 (1995), 17-20 pp
- PIRSON, S J, "Effect of Anisotropy on Apparent Resistivity Curves", Bull of the American Association of Petroleum Geologists. vol 19 N° 1 (1935) 35-37 pp
- RITZI, R W y Andolsek, R H, "Relation Between Anisotropic Transmissivity and Azimuthal Resistivity Surveys in Shallow, Fractured, Carbonate Flow Systems", Ground Water, vol 30 N° 5, E U A (1992), 774-780 pp
- SECRETARÍA DE PROGRAMACIÓN Y PRESUPUESTO (S P P). "Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, esc 1:250,000", Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, (1987)
- SLICHTER, L, "The Interpretation of Resistivity Prospecting Method for Horizontal Structures", Physics, vol 4 (1933), 307-322 pp
- SNOW, D T, "Anisotropic Permeability of Fractured Media", Water Resources Research, vol 5 (1969), 1273-1289 pp
- STEINICH, B, Marín, L E, Velázquez, G, Simón, I. y González, R, "Caracterización Geoquímica del Valle de Hermosillo", informe final,

- proyecto CNA, Instituto de Geofísica, UNAM, México, D F (1995), 45 pp
- STEINICH, B y Marín, L E. "Determination of Flow Characteristics in the Aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatán, México", Journal of Hidrology, (1995)
- TAYLOR, R. W., y Fleming, A. H. "Characterizing Jointed Systems by Azimuthal Resistivity Surveys. Ground Water, vol 26, N°. 4, E U A (1988) pp 464-474.
- WANG, H F y Anderson, M P, " Introduction to Groundwater Modeling, Finite Diference and Finite Element Methods", 1era ed Freeman, San Francisco, Cal (1982), 237 pp

## **Apéndice I**

**Equipo mínimo necesario para realizar un levantamiento geoelectrico.**

- Generador de corriente (Fuente de poder)**
- Voltímetro y amperímetro (Receptor)**
- Electrodos (Dependiendo del arreglo a usar, se sugieren cuando menos 4)**
- Martillos**
- Cinta métrica**
- Cinta de aislar**
- Pinzas de electricista**
- Radiotransmisor**
- Cable**
- Cables para conectar (Caimán, banana)**
- Agua salada y/o agua con sulfato de cobre.**

## Apéndice II

**Analogías en el flujo del agua subterránea y algunos parámetros eléctricos.**

Variable	Agua subterránea	Electricidad
Potencial	Gradiente hidráulico, $h$ (cm)	Voltaje, $V$ (voltios)
Cantidad transportada	Volumen de descarga, $(\text{cm}^3\text{s}^{-1})$	Carga eléctrica, (coulomb)
Propiedad física del medio	Conductividad hidráulica, $K$ ( $\text{cm s}^{-1}$ )	Conductividad eléctrica, $\sigma$ (mhos $\text{m}^{-1}$ )
Relación entre potencial y campo de flujo	Ley de Darcy $q = -k \nabla \times h$ , donde $q$ es la descarga específica $(\text{cm s}^{-1})$	Ley de Ohm $i = -\sigma \nabla \times V$ , donde $i$ es la corriente eléctrica (amperes)

## **Reconocimientos**

**Mi más profundo agradecimiento al Dr Luis E Marín Stillman por el entusiasmo y la estricta vigilancia durante el desarrollo de este proyecto, así como a su grupo de colaboradores que me apoyaron durante todo el trabajo; de manera especial a la Dra Birgit Steinich, por sus valiosos consejos y por permitirme utilizar muchos de sus resultados.**

**Deseo expresar mi agradecimiento al Dr Alfonso Gutiérrez Ariza, y al Arq Antonio Simón Velázquez, por su invaluable y desinteresada colaboración en la edición de este trabajo.**

**Agradezco a los sinodales que revisaron minuciosamente el trabajo y a los amigos que aportaron sus comentarios al mismo.**

**Parte de este proyecto fue financiado a través del proyecto CNA-Hermosillo.**

**Por ultimo agradezco las becas del proyecto IN107595 DGAPA.(Dirección General de Asuntos del Personal Académico), UNAM de licenciatura y maestría.**