La filtración en el Dique (Figura 5.6d) tiene valores para el Na, Cl y SO_4 de 10 a 50 me/l. Para las otras especies los valores están en la década de 1 a 10 me/l, excepto el potasio, que tiene una valor bajo (< 0.2 me/l).

TABLA 5.7
PARÁMETROS DETERMINADOS EN MUESTRAS DEL VASO Y DE LA FILTRACIÓN DEL DIQUE.

Parámetro	V1	V2	V3	V4	V5	FD1	FD4	FD5
Temperatura (°C)	18.0	24.0	28.4	32.0	21.4	18.0	29.0	25.0
pH	8.7	8.7	8.7	8.3	7.1	8.2	8.4	7.6
C.Elec. (MS/cm)	0.665	0.700	0.695	0.656	0.470	5.26	1.86	4.24
S. Tot. (mg/l)	470	480	484	439	496	5318	1289	3881
S. Dis. (mg/l)	405	428	446	382	481	4980	1175	3711
S. Sus. (mg/l)	65	52	38	57	15	338	114	170
Alc. T. (mg/l)	138.7	133.7	129.8	112.6	69.5	202.6	277.8	125.0
D. Tot. (mg/l)	238.3	255.7	339.9	216.5	205.2	1420.2	433	1721.8
D. Par. (mg/l)	171.7	147.4	138.0	150.2	161.7	875.5	330.0	1521.6
Ca^{+2} (mg/l)	68.8	59.0	55.3	60.2	64.7	350.6	132.2	609.3
Mg^{+2} (mg/l)	16.1	26.3	24.8	16.1	10.6	132.3	25.0	48.6
Na^{+} (mg/l)	46.8	54.4	51.4	45.8	46.6	977.0	243.0	525.6
K^{+} (mg/l)	0.5	0.5	0.5	6.18	4.5	0.8	7.15	20.4
CO_3^{-2} (mg/l)	5.43	Nd	Nd	Nd	Nd	nd	1.3	Nd
HCO_3^{-} (mg/l)	158.2	163.1	158.3	137.4	84.7	247.1	336.3	152.5
Cl^{-} (mg/l)	46.1	53.7	53.4	49.6	34.7	1024.3	367.7	437.1
SO_4^{-2} (mg/l)	158.4	162.6	138.8	144.8	124.3	2005.1	268.3	1682.4
Ca^{+2} (me/l)	3.433	2.944	2.759	3.004	3.229	17.495	6.597	30.406
Mg^{+2} (me/l)	1.333	2.164	2.041	1.325	0.872	10.887	2.057	3.998
Na^{+} (me/l)	2.036	2.366	2.236	1.992	2.027	42.497	10.570	22.862
K^{+} (me/l)	0.013	0.013	0.013	0.158	0.113	0.020	0.183	0.510
CO_3^{-2} (me/l)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
HCO_3^{-} (me/l)	2.593	2.673	2.594	2.252	1.388	4.050	5.512	2.499
Cl^{-} (me/l)	1.300	1.515	1.506	1.399	0.979	28.892	10.371	12.330
SO_4^{-2} (me/l)	3.298	3.385	2.890	3.015	2.588	41.746	5.586	35.035
Err. Reac (%)[a]	-3.92	-.064	0.35	-1.41	11.51	-2.60	-5.14	7.37

[a]Ver Tabla 5.6

La conductividad eléctrica del agua de la filtración en el Dique ha variado con el tiempo como se puede apreciar en la Figura 5.7. El descenso en la parte izquierda de la curva se puede explicar si asumimos que tiene lugar la mezcla de aguas del Vaso con las del acuífero superior original, provocando que este último disminuya su concentración de iones a medida que transcurre el tiempo. El aumento que se observa en la parte derecha

hace suponer que acuíferos más profundos se han involucrado en la mezcla, esto al aumentar el nivel de la Presa y por consiguiente la presión hidrostática. La información contenida en la Figura 5.7 será de utilidad cuando se calculen las propiedades de las rocas y del fluido del acuífero original.

El alto contenido de iones de Cloro, Sodio, Calcio y Magnesio en las aguas de las filtraciones, supone que uno de sus componentes de mezcla (el acuífero original) ha diluido capas de evaporitas (RODRÍGUEZ-LOZANO, 1976, LÓPEZ-RAMOS, 1982 y ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, 1986). Por otra parte, se ha encontrado en el campo cierto mineral que rellena algunas de las diaclasas. La identificación de dicho mineral se realizó mediante un estudio de difracción de rayos X en un sistema SIEMENS D-5000. Se aplicó un método de polvos con irradiación CuK_{α} (λ = 1.5418 nm). La fase fue identificada como yeso, tal como se muestra en la Figura 5.8.

La disolución de evaporitas (yeso), bajo la Cortina y el Dique, pondría en riesgo la estabilidad de la obra hidráulica, pudiendo surgir un colapso; así como el incremento del volumen de agua que se filtra. Por otra parte los acuíferos localizados aguas abajo de la obra tendrán una alta concentración de iones, no pudiéndose utilizar el agua para consumo humano ni animal ni con fines agrícolas.

Ya que no se cuenta con análisis de aguas originales en el área de la Cortina, se supone las de la filtración del Dique como las originales, siendo similares a las reportadas por NAVARRO (1996) para acuíferos del área de la Loma Los Pozos. Si se mezclaran las aguas con concentraciones químicas semejantes a las del Dique con las aguas de la Presa se pueden obtener las concentraciones de las aguas de la filtración de la Cortina.

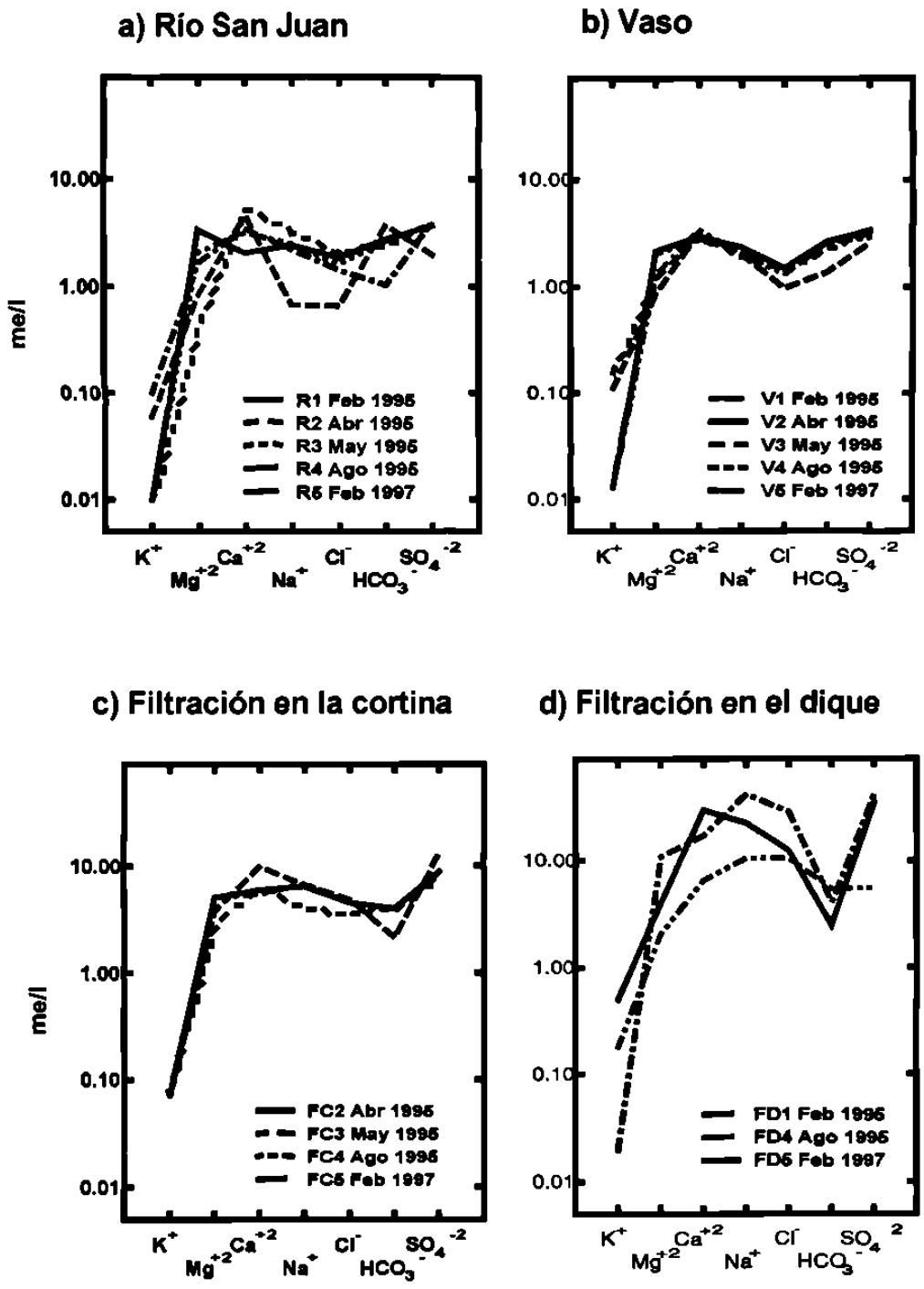

Figura 5.6 Diagramas de Schoeller para las diferentes aguas de: a) El Río San Juan, b) El Vaso, c) La filtración en la Cortina y d) La filtración en el Dique.

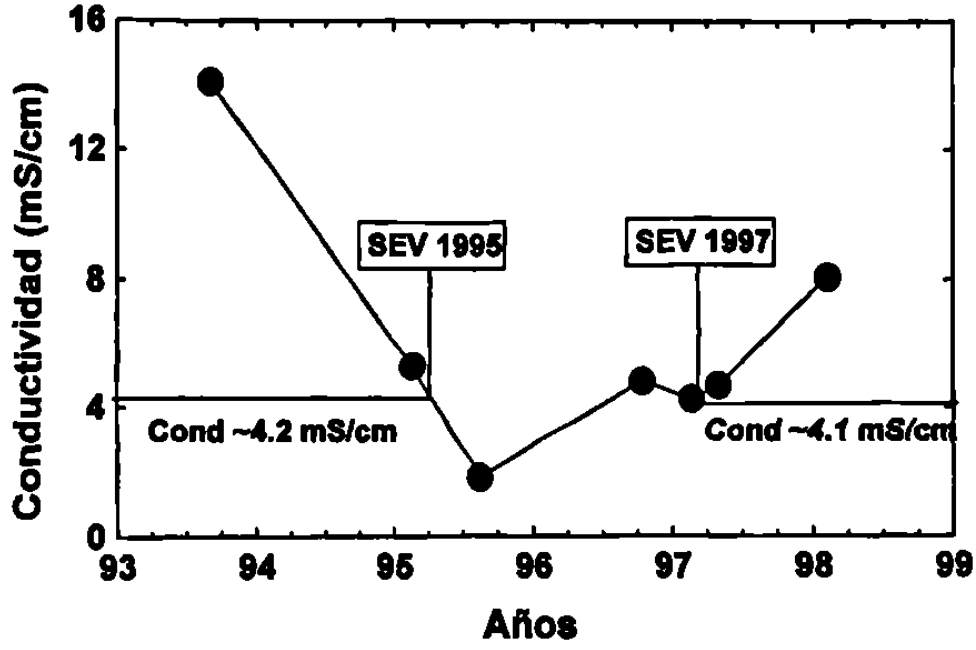

Figura 5.7 Variación de la conductividad eléctrica de las aguas de la filtración del Dique antes y durante la primera etapa de llenado de la Presa.

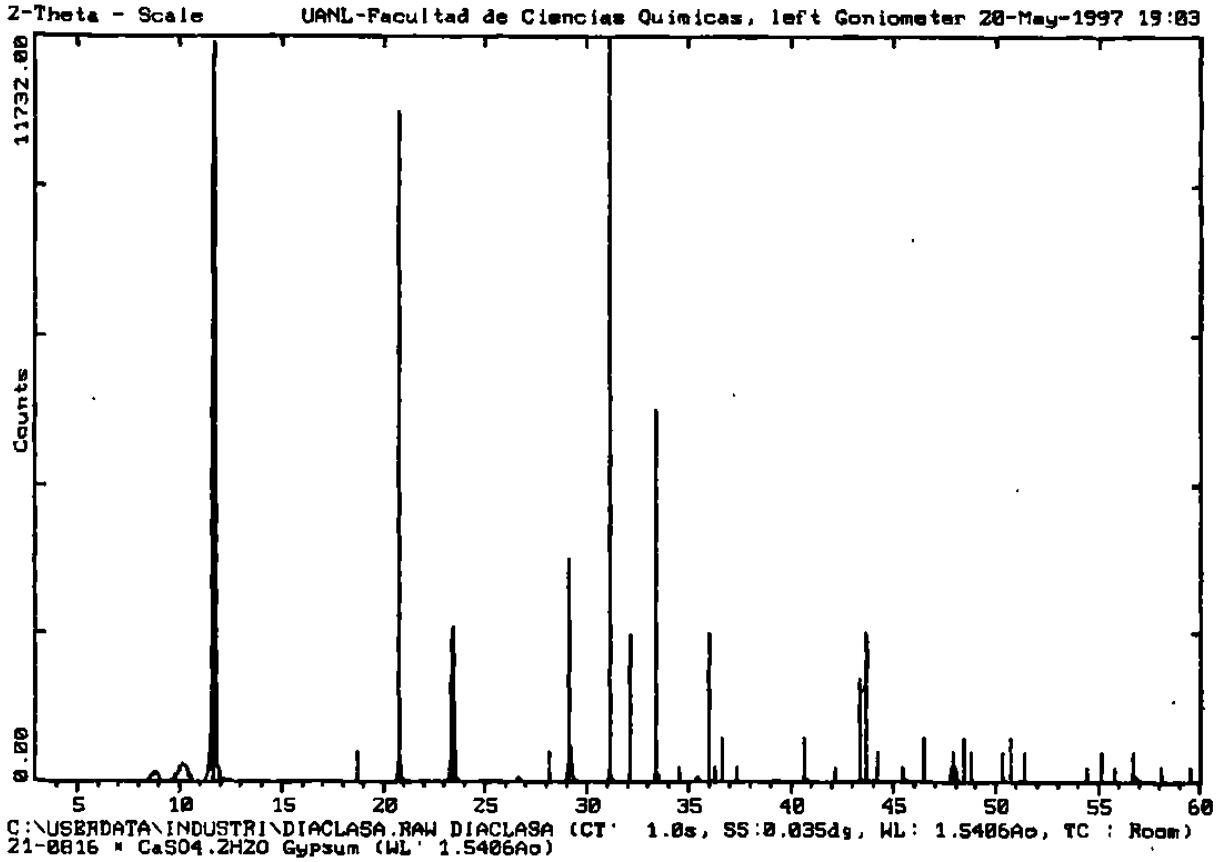

Figura 5.8 Identificación de material que rellena diaclasas por medio de Rayos-X.

CAPÍTULO 6
INVESTIGACIONES GEOFÍSICAS

6.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de determinar las condiciones geológicas del subsuelo se recurre a la a la prospección geofísica. Los métodos que se utilizan relacionan la medición de algún campo físico con alguna propiedad física. Los campos pueden ser de origen natural o artificial. Algunos de los parámetros de las rocas que tienen importancia en la determinación de parámetros hidrogeológicos son: la resistividad, la resistencia transversal y la conductancia longitudinal.

La resisitividad eléctrica o su inverso la conductividad eléctrica pueden ser determinados por métodos geoeléctricos, desde la medición de campos eléctricos o magnéticos. Los métodos geoeléctricos se clasifican en eléctricos cuando las corrientes asociadas son de frecuencia cero (corriente directa); en cambio, para frecuencias variables reciben el nombre de métodos electromagnéticos. En ambos casos los estudios pueden realizarse a través de sondeos (para estudiar la variación a profundidad) o perfiles (para estudiar la variación lateral).

Las investigaciones que se realizaron en el área de estudio para caracterizar las condiciones geólogo-geofísicas fueron: a) sondeos eléctricos verticales y b) perfiles electromagnéticos.

6.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS

Se considera **resistividad eléctrica** (ρ) a la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso por un material determinado (ORELLANA, 1982), sus unidades son ohm-m y se puede calcular en un material mediante la ecuación

$$\rho = R\,l/A\,, \tag{6}$$

siendo R la resistencia del material en ohm, l su longitud y A la sección de dicho material.

El valor de la resistividad eléctrica de un material geológico depende de su composición mineralógica, su porosidad, de las características químicas del electrolito que se encuentra en dichos poros y de su grado de saturación. Estas variables son de interés hidrogeólogico y determinando algunas de ellas podemos calcular las faltantes.

Otro parámetro importante es la **resistencia transversal unitaria** y para explicarla partimos de que tenemos un medio estratificado en forma de prisma recto de sección cuadrada (Figura 6.1), con el eje perpendicular a la orientación de las capas y de lado igual a la unidad de longitud. Suponemos que el prisma es atravesado por una corriente eléctrica que fluye perpendicular a la estratificación, las diferentes capas se comportaran como conductores en serie, por lo que sus resistencias se sumarán (ORELLANA, 1982). Para la primera capa se puede calcular el producto de sus resisistividad por el espesor (h) a lo que se le llama resistencia transversal unitaria (Ti), y con la suma de estos valores de n capas donde se conocen los espesores y resistividades se obtiene la resistencia total T, donde:

$$T = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2 + \rho_3 h_3 \ldots + \rho_n h_n. \tag{7}$$

Las dimensiones de T son ohm - m^2.

Si consideramos el mismo prisma y suponemos que la corriente fluye paralela a la estratificación, la resistencia del tronco del prisma que corresponde a la i-ésima capa será

$$R = \rho_i / h_i. \tag{8}$$

Las resistencias así definidas no pueden sumarse, por estar en paralelo; por lo que convine pasar a sus inversas, las conductancias. Llamando S_i a la conductancia de la i-ésima capa tendremos:

$$Si = hi / \rho_i. \quad (9)$$

A esto se le llama **conductancia longitudinal unitaria** y el conjunto de las *n* primeras capas del corte tendrá una conductancia total:

$$S = h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2 + h_3 / \rho_3 \ . \ . \ .+ \ h_n / \rho_n \ . \quad (10)$$

Las unidades de *S* son siemens.

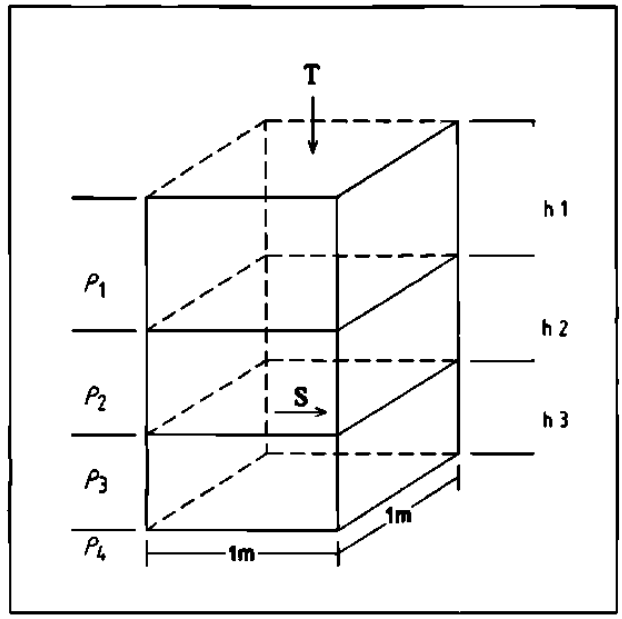

Figura 6.1 Medio estratificado utilizado para la definición de la resistencia transversal unitaria (Modificado de ORELLANA, 1982).

6.3 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV's)

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) están comprendidos en los métodos geoeléctricos de campo artificial. Fueron utilizados en este trabajo con el fin de caracterizar, de manera general, las rocas del área de la Presa y delimitar zonas potencialmente permeables. Los SEV's consisten de una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el dispositivo mostrado en la Figura 6.2 (DAVIS y DE WEIST, 1971). La separación creciente entre los electrodos de emisión (A y B) y los de recepción (M y N), permite investigar a mayor profundidad.

Cuando tenemos un medio heterogéneo como el de la Fig. 6.1 en donde se realiza prospección geoeléctrica mediante algún dispositivo (como el de la Fig. 6.2), los valores de resistividad que obtenemos para cada separación de los electrodos de corriente serán, no la resistividad específica de cada capa, sino el efecto conjunto de ellas, llamándosele a este valor resistividad aparente. El valor de resistividad aparente puede calcularse desde

$$\rho = C\,\Delta V/I\,, \tag{11}$$

donde C es el factor geométrico que depende de la posición de los electrodos, ΔV es la diferencia de potencial medida e I es la corriente eléctrica inyectada.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada SEV se representan mediante una curva, en función de la distancia entre electrodos. Dicha curva dependerá de la disposición geométrica de los electrodos de corriente y los de potencial. Entre los dispositivos más utilizados se encuentran: el dispositivo Wenner y el dispositivo Schlumberger.

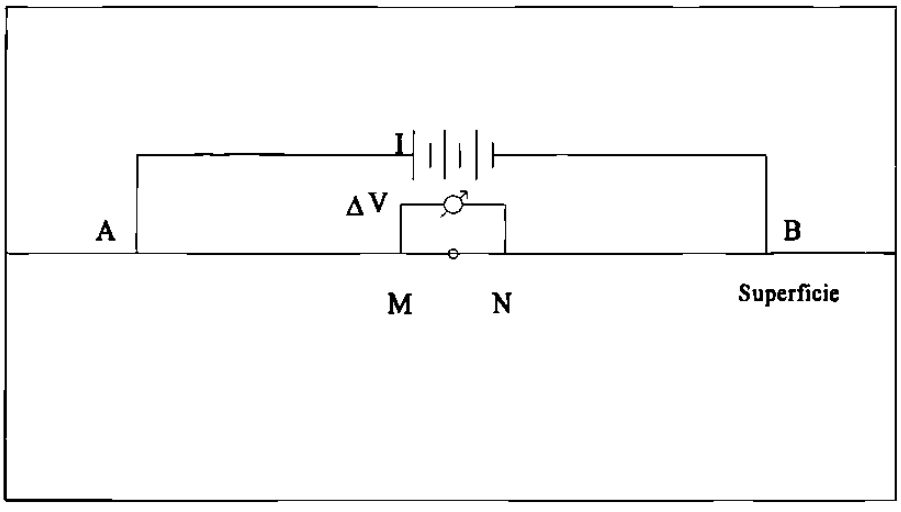

Figura 6.2 Arreglo Schlumberger empleado para realizar los Sondeos Eléctricos Verticales (Modificado de ORELLANA, 1982).

La curva obtenida recibe el nombre de curva de resistividad aparente y para el arreglo Schlumberger se grafica AB/2 contra ρ_a en escala logarítmica. Dicha curva debe ser interpretada para obtener los valores de la resistividad eléctrica y espesor de cada parte de la sección geológica.

En el área del Dique de la Presa se realizaron tres campañas de SEV´s en las siguientes fechas: octubre de 1992, abril de 1995 y marzo de 1997. En el área de la Cortina se realizaron sólo en abril de 1995, ya que después de esa fecha no fue posible tener acceso al área. La localización de los SEV´s se indica en los ANEXOS A y B. En el ANEXO A se presenta la Tabla 1 con la localización de los sondeos en el Dique y en la Tabla 2, para la Cortina. En el ANEXO B se presenta un plano donde aparece la ubicación de los sondeos.

Para la realización de los SEV´s se utilizó un equipo de resistividad marca SCINTREX, compuesto por:

- Transmisor modelo TSQ-2E con 750 W de potencia. El transmisor es alimentado por un motor de gasolina que suministra 115 V de Corriente Alterna.
- Receptor modelo RDC-10 con una rango de lectura de 30 microvolts a 30 volts.
- Equipo complementario: dos carretes portacables, marros, electrodos de acero, cinta métrica, brújula y botes para solución salina.

La configuración utilizada para los SEV´s fue el dispositivo Schlumberger con aberturas AB/2 de 1.5 hasta 220 m. Los puntos de los sondeos se distribuyeron a distancias de 300 a 1000 m. Los sondeos que se realizaron en 1992 se ubican cerca del Dique en el área de la Presa actual; mientras que para los de 1995 y 1997 se desplazaron los puntos de sondeo al otro lado del Dique, una distancia que no excede los 50 metros, y se realizaron paralelos al rumbo de las capas.

En el ANEXO A se encuentran los valores de la resistividad aparente obtenidos en las diferentes campañas a lo largo del Dique, para 1992 se presentan en la Tabla 3; en la Tabla 4, para 1995 y en la Tabla 5, para 1997. En la Tabla 6 se presentan los datos de los sondeos realizados a lo largo de la Cortina para el año de 1995. Con los valores de la resistividad aparente obtenidos de los sondeos realizados en el área del Dique se construyeron gráficas de resistividad aparente, las cuales se encuentran también en el ANEXO A.

Con los valores de resistividad aparente presentados en el ANEXO A se construyeron secciones de resistividad aparente del área del Dique para los años 1992, 1995 y 1997 (Figura 6.3). La distancia entre los sondeos varía de 300 a 1000 metros y las secciones se presentan esquematizadas dando una exageración vertical y horizontal aproximadamente de 20 veces.

En la sección para el año de 1992, se observa que existen dos zonas bien diferenciadas, la de la parte Oeste en donde los valores de resistividad aparente son bajos (6 – 20 ohm-m) y la parte Este con valores de 20 a 40 ohm-m. En la dirección Este se pueden distinguir que en la parte superior los valores de resistividad son bajos, aumentando hacia la parte intermedia de la sección y disminuyendo hacia la parte profunda.

En el año de 1995 los valores de resistividad disminuyeron considerablemente en la parte inferior Este de corte, tendiendo ha ser homogéneas en la parte inferior de toda la sección, lo que pudiera estar relacionado con el ascenso del nivel freático al aumentar el nivel del embalse. Hacia la parte superficial existen todavía algunos lugares con valores altos de resistividad. No se observa cambio significativo entre las secciones de 1995 y 1997, sólo en la parte superficial, lo que pudiera estar relacionado con los trabajos de remoción de la parte superficial del terreno por trabajos de ingeniería civil a lo largo de la carretera, poco tiempo antes de la última campaña de estudios.

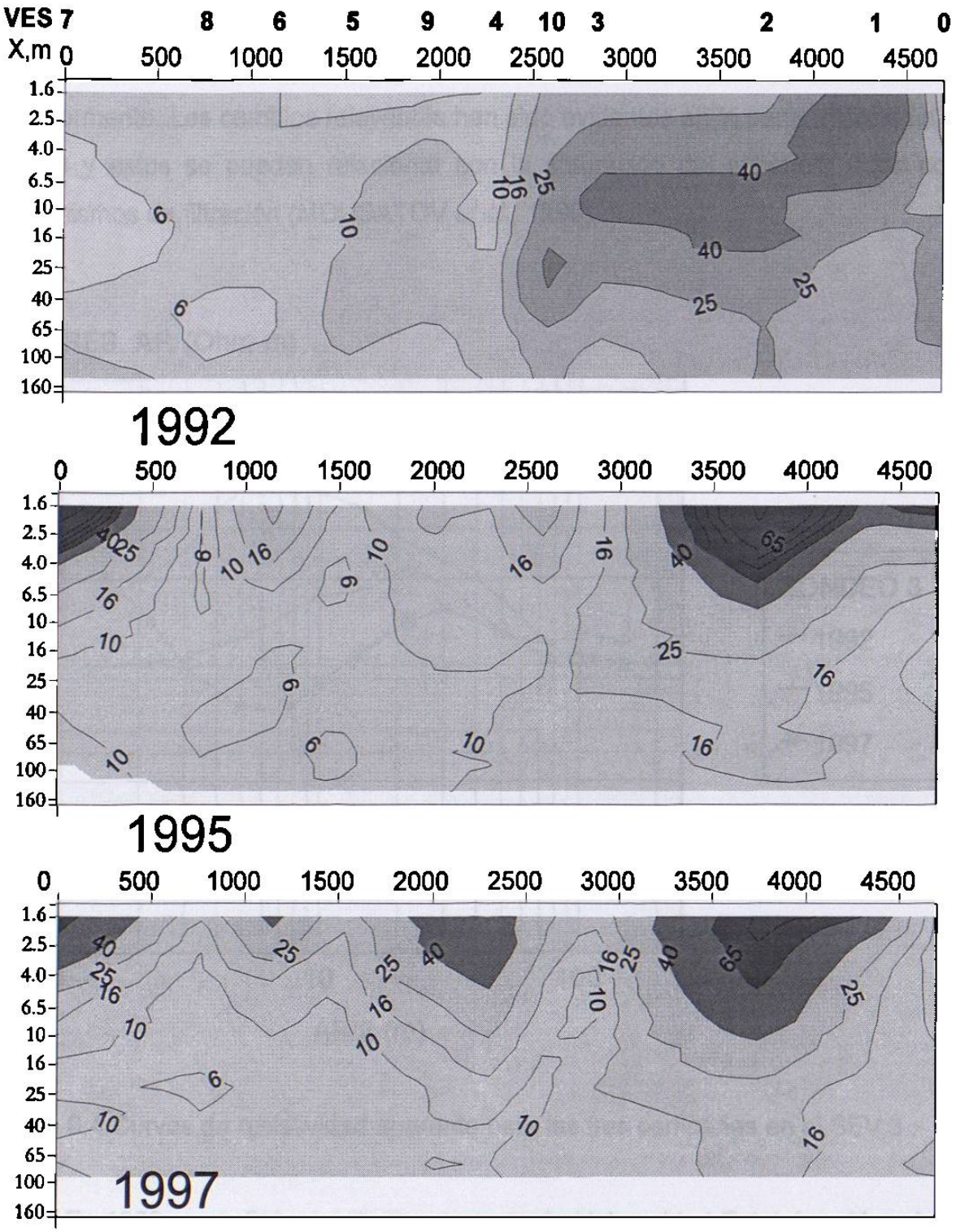

Figura 6.3 Secciones de resistividad aparente del área del Dique para los años 1992, 1995 y 1997.

En la Figura 6.4 se presentan las curvas de resistividad aparente para las tres campañas en el punto del sondeo 3. Entre ellas, se observan cambios en la parte izquierda debido al desplazamiento del centro de los sondeos, como se explicó anteriormente. Los cambios relevantes han sido evidentes en la parte intermedia de las curvas y estos se pueden relacionar con la saturación del subsuelo y los posibles mecanismos de filtración (MOUSATOV *et al.*, 1999).

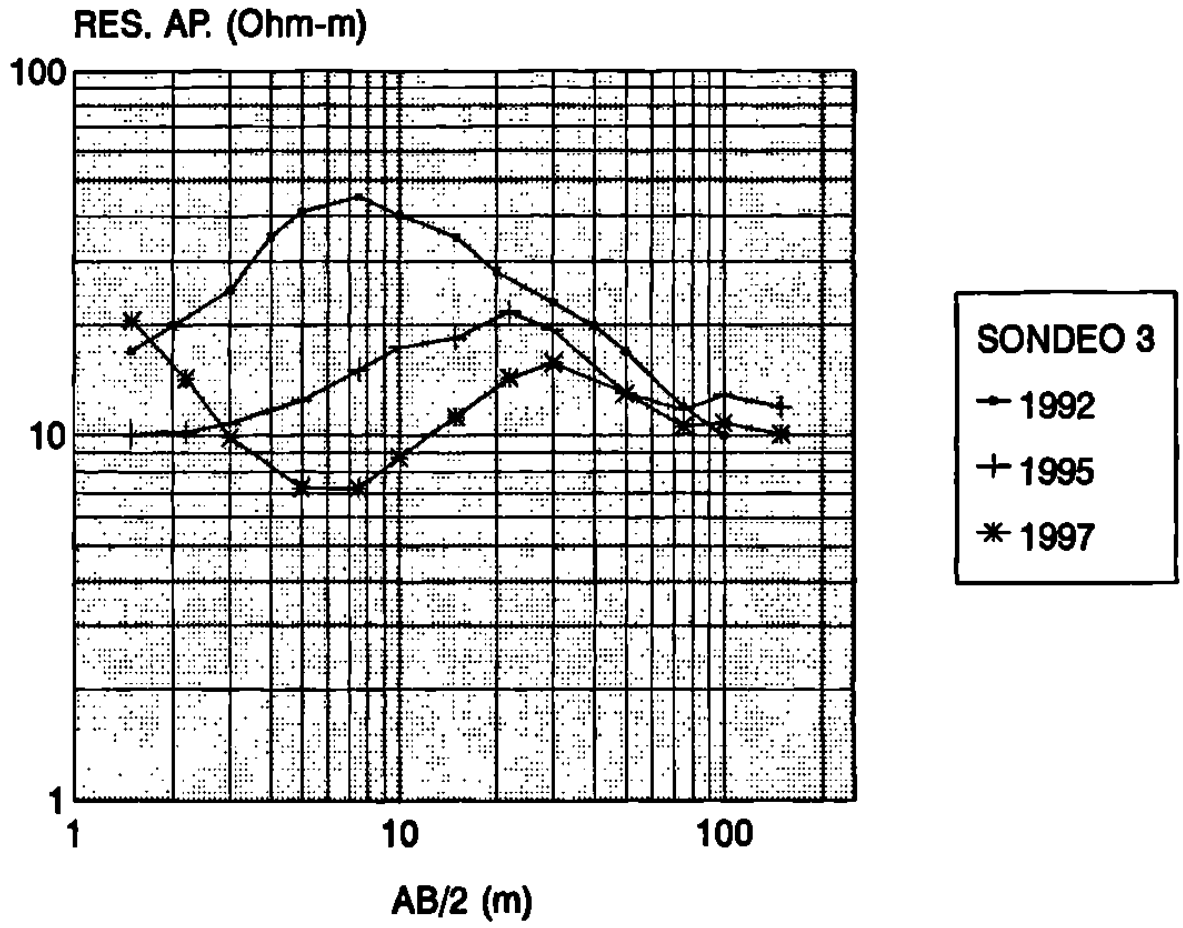

Figura 6.4 Curvas de resistividad aparente para las tres campañas en el SEV 3 .

En 1992 se realizó un estudio por parte de Universidad Estatal de Moscú (UEM) y de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en el área de la Presa El Cuchillo con el fin de caracterizar de manera general las rocas del área y delimitar zonas potencialmente permeables (UANL-UEM, 1993b). En dicho año se efectuaron un

total de 110 SEV's con el dispositivo Schlumberger, con aberturas de AB/2 desde 1.4 hasta 150 – 200 m. Los datos obtenidos fueron sometidos a tratamiento estadístico con la finalidad de elaborar los modelos geoeléctricos para interpretación cuantitativa, determinar las características generales del macizo rocoso y las zonas potenciales en cuanto a permeabilidad hidráulica del área de la Presa. Los resultados del análisis estadístico muestran que el promedio de las curvas corresponde al modelo de un medio de cuatro capas tipo QH con las resistividades 30-20-14-16 ohm-m, y espesores h = 1.5 – 3 – 30 m. Los valores del factor estándar (para distribución logarítmica) disminuyen de 2.8 en las aberturas cortas hasta 1.3 en las mayores. La disminución de la dispersión con la profundidad tiene correspondencia con la situación hidrogeológica y se relaciona con la saturación de las rocas de la Formación Mount Selman por aguas subterráneas salobres (MOUSATOV *et al.*, 1996).

Para la interpretación de los datos de los SEV's se empleó el programa IPI desarrollado en la Universidad Estatal de Moscú. Suponiendo un semiespacio estratificado (1 D) para el que se determinaron los valores de resistividad y espesor de cada uno de los estratos. EL programa permite resolver el problema inverso por corrección manual o automática de los parámetros de las capas y se puede fijar información obtenida *a priori* de parámetros conocidos. Este programa puede trabajar con un grupo de curvas para diferentes SEV en un mismo archivo obteniéndose una sección geoeléctrica (PRADO-GÓMEZ, 1997).

Los datos de las resistividades y espesores de capas obtenidas al interpretar, para cada sondeo y para las tres diferentes campañas, se presentan en el capítulo 7 por requerirse para realizar cálculos de propiedades de las rocas; sin embargo, en la Figura 6.5 se puede ver la sección geoeléctrica que corresponde a los SEV's a lo largo del Dique para las tres campañas.

Los resultados de las interpretaciones para los SEV's efectuados en 1992 (Figura 6.5a) reflejan de forma general la estructura geológica principal con buzamiento de las capas intercaladas de areniscas y lutitas de 10° hacia el Este (tomando en cuenta exageración de escalas). Se puede dividir el corte geoeléctrico en tres unidades principales. En la parte superior del corte, las resistividades de las capas y sus espesores varían a lo largo del perfil con límites de 10 a 50 ohm-m y de 1 a 3 m, respectivamente. La parte intermedia corresponde a la profundidad de 1-3 a 40 m y se observan dos áreas: una al Oeste entre los sondeos 8 y 4, con resistividades de 3 –15 ohm-m; la otra, al Este entre los puntos 10 a 0 con resistividades de 15 a 60 ohm-m. La parte inferior del corte, a profundidades mayores de 40 m, se caracteriza por resistividades más homogéneas con límites de 7 a 15 ohm-m, que corresponde con las rocas que están debajo del nivel de saturación de las aguas subterráneas salobres.

Debido al desplazamiento del centro de los sondeos para las campañas de 1995 y 1997, las partes izquierdas de las curvas de resistividad aparente tienen cambios evidentes con respecto a las de 1992, sin embargo, esta diferencia se relaciona con profundidades de 1-3 m y corresponde a la parte superior del corte.

El extremo Oeste del corte geoeléctrico en el Dique continúa con valores bajos al transcurrir el tiempo, mientras que para el Este los valores de resistividad bajaron significativamente en la parte intermedia del corte, siendo del orden de 7 a 30 ohm-m. La parte baja del corte tiende a homogenizarse con valores de 30 – 40 ohm-m.

El corte geoeléctrico para 1997 (Figura 6.5c) muestra una disminución considerable en la resistividad de las rocas a profundidades > de 10 m en la parte W y esto se ha generalizado hasta el sondeo 3, mostrando el resto de los SEV valores estables de resistividad.

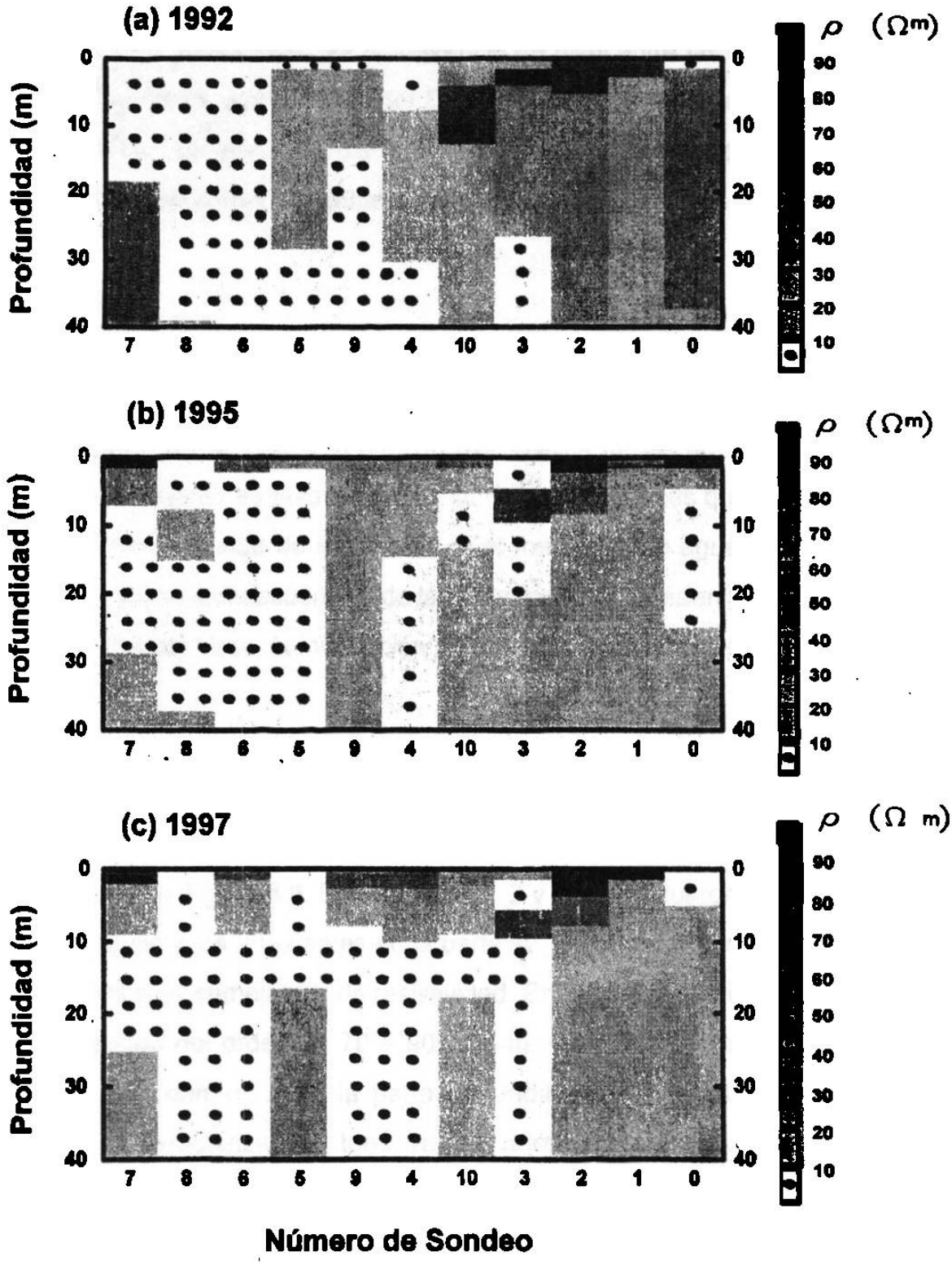

Figura 6.5 Secciones geoeléctricas a lo largo del Dique para el año a) 1992, b) 1995 y c) 1997.

De los valores de resistividad de las rocas y su cambio en el tiempo se pueden deducir los mecanismos probables de filtración que tienen lugar en el Dique. Para la parte Oeste (sondeos 7 y 8), se propone que el mecanismo está relacionado con filtraciones laterales provocadas por la diferencia de nivel entre las aguas de la Presa y los niveles topográficos aguas abajo del Dique. Este mecanismo es favorecido por la existencia de zonas de fallas y las diaclasas. Prueba de lo anterior es la aparición de un de un manantial intermitente de aguas con contenido de sales (0.5 g/l) semejante al de la Presa.

En la parte Este del Dique (sondeos 10 – 0) se requiere de un mecanismo más complicado; en este caso se supone que las aguas salobres subterráneas de la región ascienden aguas abajo debido a la presión hidrostática de las aguas de la Presa. La penetración de las aguas es favorecida por las fallas y diaclasas que se encuentran en la base de la Presa. Prueba de lo anterior es el manantial de aguas salobres (3.5 g/l) frente al SEV 0. Como consecuencias de las filtraciones se pueden tener, además de la perdida del líquido del Vaso, la inundación de terrenos adyacentes del nivel de la Presa y su salinización.

Con el fin de documentar los resultados de los sondeos realizados en 1995 a lo largo de la Cortina, se presenta su interpretación, obteniéndose la sección geoeléctrica que se muestra en la Figura 6.6. Los sondeos 1, 2 y 3 se efectuaron en la parte E de la Cortina aguas abajo y los 2 restantes en la parte W. Se observa que los sondeos 1 al 3 muestran valores muy semejantes de resistividad. En la parte superior se tienen valores altos de resistividad del orden de 70 – 90 ohm-m; en la parte intermedia (5 a 20 m), valores de 5 – 20 ohm-m; y en la parte profunda valores de 20 - 50 ohm-m. Los sondeos 4 y 5 se caracterizan por tener valores altos de resistividad del orden de 30 a 120 ohm-m. Los valores de resistividad de la parte intermedia de los sondeos 1-3 pudieran relacionarse con una zona de saturación, prueba de ello es la filtración que se

encuentra frente al sondeo 2. Los valores de resistividad altos en los sondeos 4 y 5 muestran que las rocas se encuentran no saturadas.

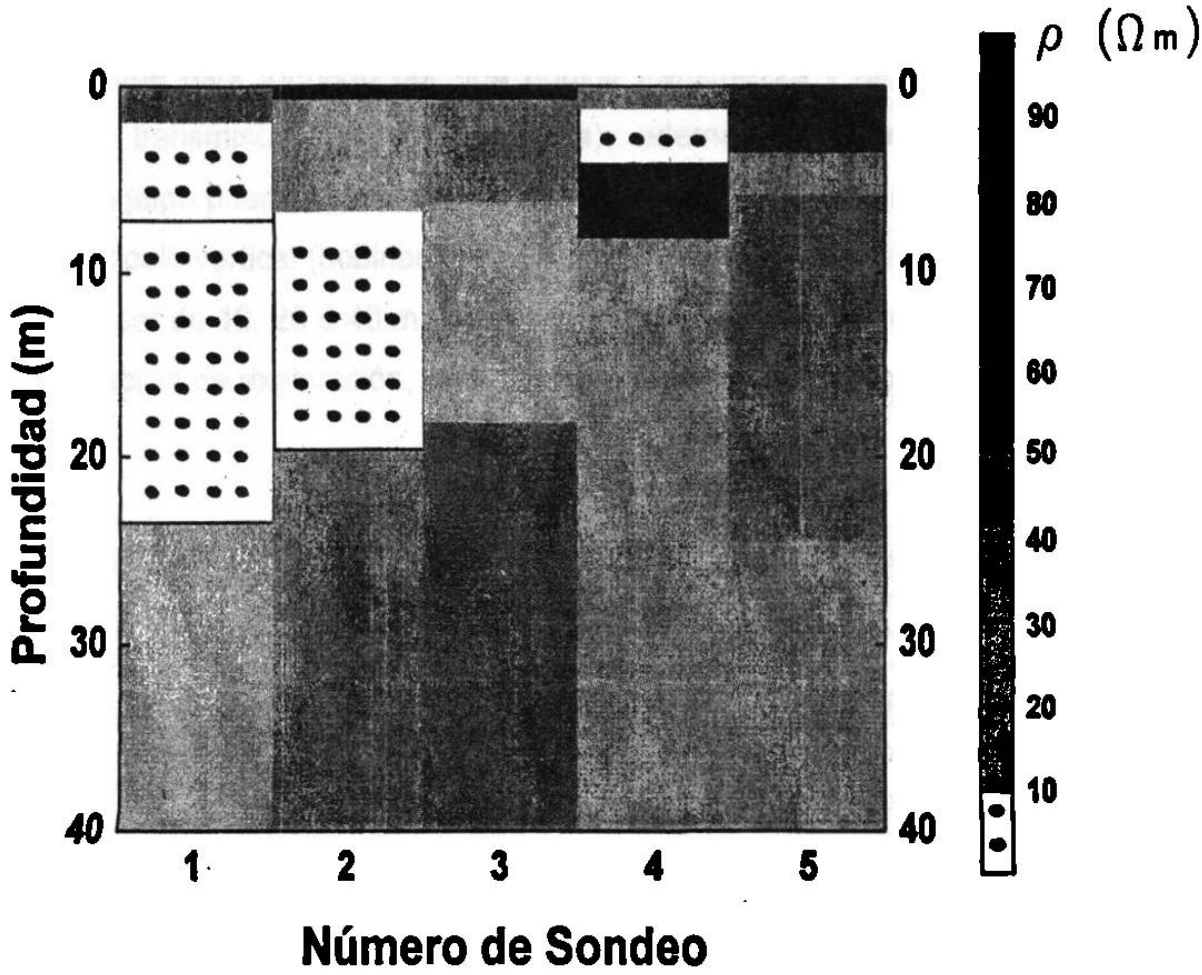

Figura 6.6 Sección geoeléctrica a lo largo de la Cortina para el año 1995.

6.4 PERFILES ELECTROMAGNÉTICOS

Existe una gran diversidad de arreglos y configuraciones en los métodos electromagnéticos, los cuales dependen de varios factores como: naturaleza del campo medido, frecuencia y tipo de receptor utilizado, entre otros.

En el presente trabajo se realizaron perfiles electromagnéticos con el fin de determinar los cambios laterales en las propiedades de las rocas, específicamente

conductividad; lo que puede estar asociado, según reporta McNEILL (1980), con zonas de fractura. Por la anterior razón se ha empleado en el territorio adyacente al Dique, aguas abajo. Cabe aclarar que también se pueden realizar sondeos electromagnéticos para determinar los cambios en las propiedades verticalmente.

El equipo utilizado para la prospección electromagnética es el EM-34-3 de Geonics, Ltd., que está formado por una bobina transmisora y otra receptora y dos consolas (una transmisora, y otra receptora), además de cables de diferentes longitudes. El equipo puede operar en dos modos: dipolo horizontal (bobinas verticales coplanares) y dipolo vertical (bobinas horizontales coplanares). La separación entre las bobinas puede ser de 10, 20 ó 40 m y esta separación tiene una relación directa con la profundidad efectiva de exploración, tal y como se muestra en la Tabla 6.1.

TABLA 6.1
PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN DEL EQUIPO EM-34-3 PARA VARIAS SEPARACIONES ENTRE BOBINAS (TOMADA DE MCNEILL, 1980).

SEPARACIÓN ENTRE BOBINAS EN METROS	PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN EN METROS (DIPOLO HORIZONTAL)	PROFUNDIDAD DE EXPLORACIÓN EN METROS (DIPOLO VERTICAL)
10	7.5	15
20	15	30
40	30	60

Basándonos en la Figura 6.7, el equipo funciona de la manera siguiente: la bobina transmisora a la que se le suministra corriente alterna de frecuencia conocida, genera un campo magnético primario *Hp* que también varía en el tiempo e induce pequeñas corrientes en la tierra; la bobina receptora se localiza a una distancia y a ella llega un campo magnético total que incluye al campo primario y el inducido o secundario *Hs*. En general el campo magnético secundario depende de la separación

entre las bobinas (*s* en metros), la frecuencia de operación (*f* en Hertz) y la conductividad aparente del subsuelo (σ_a en siemens/m).

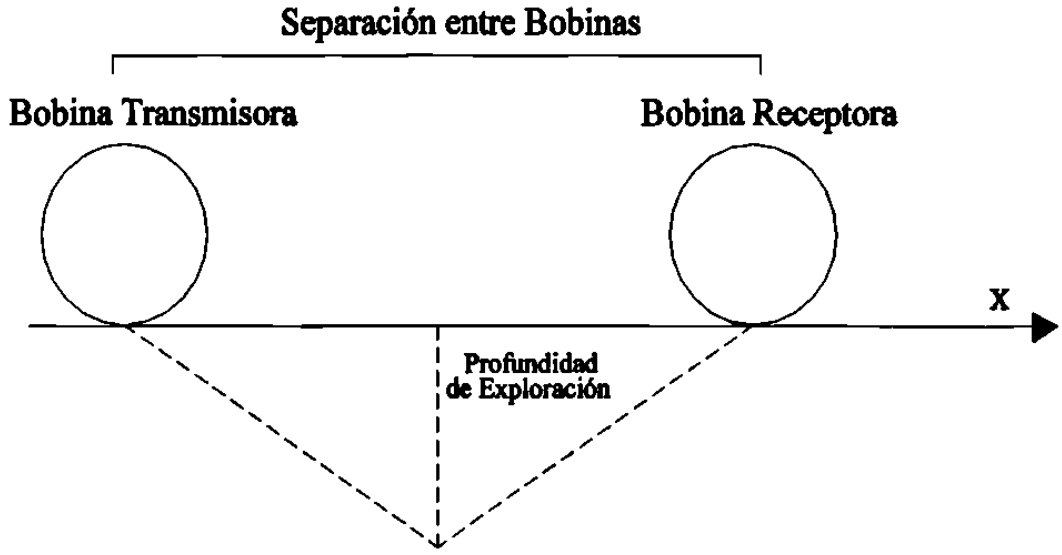

Figura 6.7 Configuración de las bobinas utilizadas en la investigación (modificada de MÉNDEZ-DELGADO, 1999).

El equipo opera a bajas frecuencias en lo que es llamado el límite resistivo o pequeños números de inducción. El valor de conductividad aparente tiene una relación con el cociente del campo magnético secundario al primario (McNEILL, 1980; OGILVY *et al.*,1991), y está dado por

$$\sigma_a = (i4/\omega\mu s^2) * (H_s/H_p)\,, \qquad (12)$$

donde $\omega = 2\pi f$, μ es la permeabilidad magnética e $i = \sqrt{-1}$.

Se realizaron dos perfiles paralelos al Dique en marzo de 1997 (Figura 6.8). El primero es paralelo al Dique y tiene su inicio en su extremo Oeste a 10 m aguas abajo y con una longitud de 5340 m (perfil 0). El segundo a 154 m al Norte, paralelo al primero y con una longitud de 4680 m (perfil 1). La separación entre las bobinas fue de 20 m.

Las bobinas se utilizaron en la modalidad de dipolo horizontal, por lo que se espera tener una profundidad de exploración de 15 m; la justificación de utilizar tal modalidad radica en que se puede efectuar una interpretación más simple y directa que con el otro modo, puesto que las anomalías son más simples (MÉNDEZ-DELGADO, 1997; MÉNDEZ-DELGADO *et al.*, 1999).

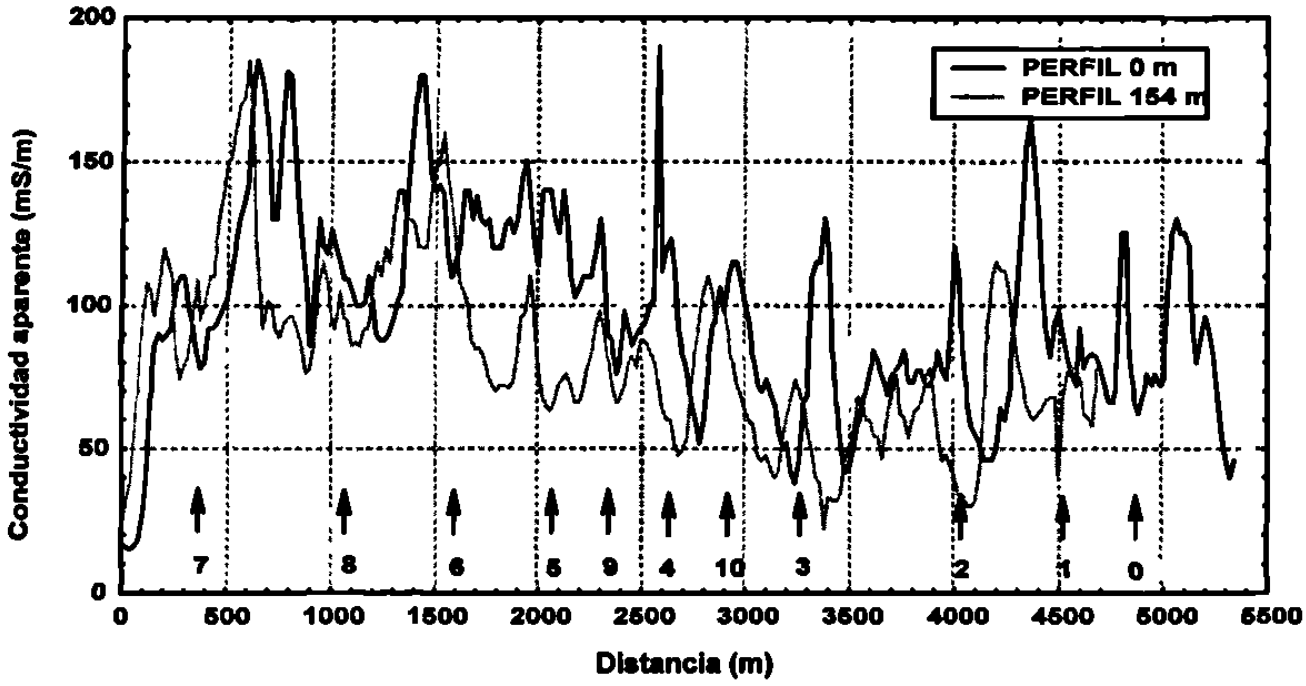

Figura 6.8 Variación de conductividad aparente obtenida con el modo de bobinas verticales coplanares a lo largo del Dique (los números en la parte de abajo corresponden a los SEV's).

Existe similitud entre las anomalías de ambos perfiles. Con el fin de tener un parámetro que nos reflejara dicha similitud, se calculó el coeficiente de correlación, el cual fue de 0.60. Si efectuamos una correlación cruzada, es decir, tomamos como fijo el perfil cero y desplazamos hacia el Este los datos del perfil uno, se obtienen coeficientes mayores, siendo el máximo de 0.77 cuando el desplazamiento es de 80 m.

El desplazamiento de los datos de los perfiles, uno con respecto a otro, para obtener valores más altos de correlación, se puede relacionar con la situación geológica del lugar. Podemos suponer que las anomalías de conductividad aparente tienen relación con el rumbo de las capas de lutitas y areniscas de la Fm. Mount Selman, así como con uno de sus rumbos de diaclasas (ver apartado 4.4). El valor promedio de conductividad aparente para los primeros 230 datos del perfil a 10 m aguas abajo del dique es de 100 mS/m, mientras que para el perfil a 154 m aguas abajo es de 82.67 mS/m. Esta disminución en la conductividad se puede relacionar con el descenso del nivel freático al alejarnos de la zona de recarga (el Vaso).

CAPÍTULO 7
RESULTADOS DE LA INTEGRACIÓN DE LOS ESTUDIOS

7.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados de la integración de los deferentes métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos que contribuyen a la determinación de los mecanismos de filtración que tienen lugar en el área de la Cortina y del Dique. Para lograr la determinación del mecanismo de filtración, además de los estudios realizados en el presente trabajo, se incluye información relevante de otros trabajos efectuados con anterioridad en el área de la Presa El Cuchillo.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación pueden servir como base para la realización de modelado matemático a efectuarse en una etapa posterior de investigación de las condiciones hidrogeológicas. Por otro lado, la información generada se puede utilizar como parte del control (monitoreo) de la obra hidráulica y su relación con el medio geológico.

7.2 ANÁLISIS DE DATOS GEOQUÍMICOS

Como se mencionó en el apartado 5.6, referente a los análisis geoquímicos de las aguas de las fuentes del área de estudio, el proceso de mezcla de aguas podría ser la explicación de las diferentes concentraciones químicas de las aguas en las filtraciones frente a la Cortina y el Dique.

La Figura 7.1 muestra la gráfica de Schoeller obtenida resumiendo los resultados de la figura 5.6. La concentración de iones de las aguas de la filtración de la Cortina, muestra que allí tiene lugar la mezcla de las aguas del Vaso con las aguas del acuífero original. Se observa que la concentración de la mayoría de los iones analizados para el caso de la filtración de la Cortina, se encuentra entre las del Vaso y la filtración del Dique.

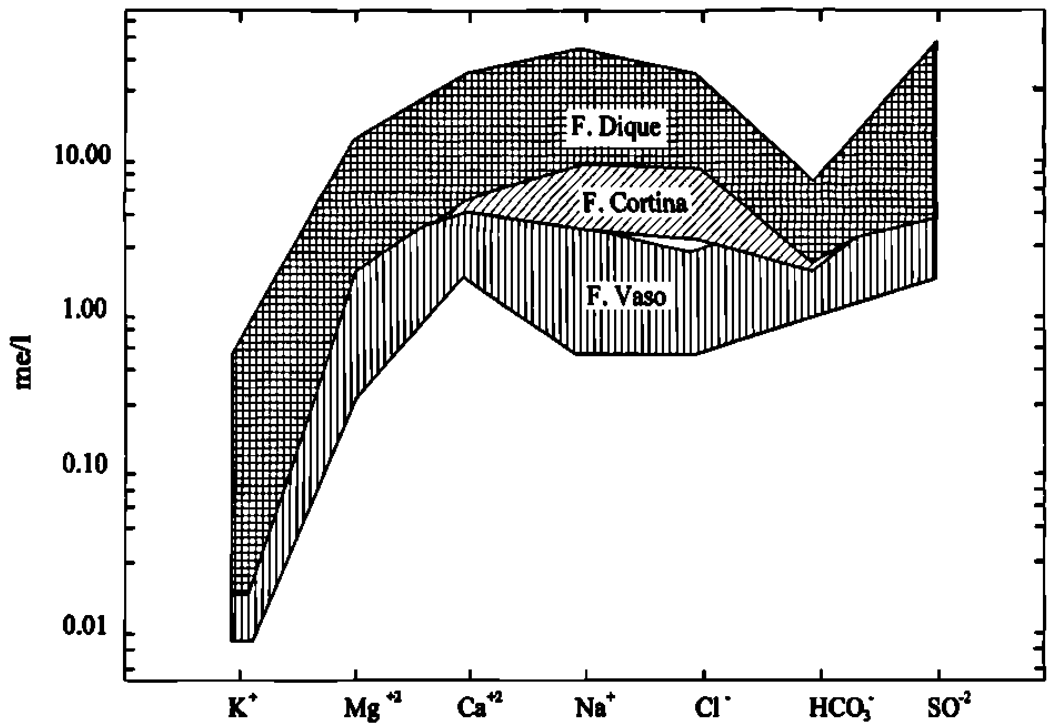

Figura 7.1 Gráfica de Schoeller para las diferentes aguas del área de estudio.

En vista de que no se cuenta con muestras y, por consiguiente, análisis de aguas del acuífero original, se suponen las aguas de la filtración frente al Dique como las originales. Esto es soportado por los estudios realizados por NAVARRO (1996) en la loma Los Pozos, donde se localizan aguas con concentraciones de iones muy semejantes a la filtración del Dique.

Con el fin de determinar las proporciones de los componentes de la mezcla se realizaron algunos cálculos basándonos en la ecuación propuesta por MAZOR (1991)

$$Ax + B(1 - x) = C, \qquad (13)$$

donde *A*, *B* y *C* son la concentraciones del ion seleccionado en cada tipo de agua que participa en la mezcla, calculándose para todos los iones analizados; *x* es la proporción de la componente *A* y (1-*x*), la de *B*.

Para el presente trabajo se seleccionaron como aguas que se mezclan, la del Vaso (V2) y la del Dique (FD1); como producto, el agua de la filtración de la Cortina

(FC2). Cabe aclarar que se seleccionó la FD1 por ser de las primeras en aparecer (muestreo 1) y la V2 y FC2 por tener registro de ambas (muestreo dos), existiendo entre las muestras uno y dos un periodo de dos meses. Los datos utilizados para el cálculo de las proporciones se presentan en la Tabla 7.1, así como las proporciones calculadas de V2 y FD1.

Se concluye que para lograr las concentraciones químicas de las aguas de la filtración de la Cortina, se requiere que una porción de 0.8232 ± 0.0939 del agua del Vaso se mezcle con 0.1768 ± 0.0939 de agua del acuífero original, es decir, su relación es 4.66:1 respectivamente.

TABLA 7.1

DATOS PARA EL CÁLCULO DE PROPORCIÓN DE MEZCLA Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Ion		V2	FD1	FC2	Proporción de V2	Proporción de FD1
Ca^{+2}	(mg/l)	59.0	350.6	118.9	0.795	0.205
Mg^{+2}	(mg/l)	26.3	132.3	61.1	0.672	0.328
Na^{+}	(mg/l)	54.4	977.0	147.5	0.899	0.101
K^{+}	(mg/l)	0.5	0.8	2.8	*	*
HCO_3^{-}	(mg/l)	163.1	247.1	254.4	*	*
Cl^{-}	(mg/l)	53.7	1024.3	159.9	0.891	0.109
SO_4^{-2}	(mg/l)	162.6	2005.1	422.8	0.8599	0.1401
Promedio					0.8232	0.1768
Desviación Estándar					0.0939	0.0939

7.3 ANÁLISIS DE VARIACIONES GEOFÍSICAS

7.3.1 EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO (1992)

En este apartado se señalan algunas de las características del medio geológico del área de la Presa El Cuchillo, que fueron obtenidos de las investigaciones geológicas y geofísicas efectuadas en el año de 1992 (UANL-UEM, 1993a).

Durante el llenado de la Presa se esperaba que surgieran fenómenos hidrogeológicos indeseables en el territorio adyacente de la Presa, tales como: la anegación de centros de población (China, N.L.), ascenso del nivel freático con la consecuente salinización e inutilización de terrenos cultivables y la aparición de agua salada e impropia para uso doméstico en pozos y norias.

Como resultado de los estudios geológicos, se pronosticó la aparición de filtraciones en la parte Norte de la Presa, a través de zonas de intenso fracturamiento de las rocas, conjugándose esto a que en el área del Dique existe coincidencia entre los rumbos de las rocas y las posibles direcciones de filtración. Las pérdidas esperadas por filtraciones se estimaron bajas, ya que el espesor de la zona de intemperismo de las rocas del Eoceno es menor a los 15 metros y la permeabilidad es baja (0.0005 cm/s); además, las filtraciones serían evitadas por el bajo gradiente que existe en el Dique, el cual forma un pequeño parteaguas (CNA, 1993).

La posibilidad del incremento del nivel freático de las aguas al Norte de Dique, presumía el riesgo de anegamiento del tramo de la carretera Monterrey–China. Las condiciones de relieve, estructura geológica, existencia de fracturas y las propiedades de filtración de las rocas, no excluían la posibilidad de filtraciones bajo la Cortina y el Dique. No obstante, el anegamiento de la población de China sería evitado por la cuenca que se extiende a lo largo de la Cortina, la que actuaría como drenaje natural.

También se realizaron investigaciones geofísicas mediante métodos geoeléctricos (SEV´s), de su interpretación se calculó el valor de *T*, mismo que se utilizó como parámetro de pronóstico. De estas investigaciones se delimitaron dos zonas con

mayor probabilidad de filtración de agua. La primera se encuentra ubicada en el área de la Cortina en donde los valores más altos de *T*, obtenidos sobre un perfil realizado a lo largo de la construcción en el embalse alcanzan 2500 – 3000 ohm-m^2. Por otra parte, el rumbo de las capas y la Cortina son paralelos, sin embargo, la estructura y un rumbo de las diaclasas son perpendiculares, lo que aumenta la probabilidad de filtración. Puesto que la Cortina contiene una pantalla impermeable y dispone de pozos de control piezométrico a lo largo del eje, se decidió realizar solamente monitoreo hidrogeológico en la parte Sureste de ella, la Loma Los Pozos.

La segunda zona donde fueron pronosticados sitios de alta probabilidad de fugas de agua corresponde al Dique. La existencia de diaclasas y fallas perpendiculares al Dique y la ausencia de una pantalla impermeable en esta construcción, así como el descenso (15 m) del nivel del terreno aguas abajo con respecto al nivel ordinario de la Presa aumentaban la posibilidad de existencia de procesos de filtración. Los lugares señalados como más probables fueron los SEV´s cero, tres y diez, de donde se pueden calcular valores de *T* del orden de 800-1200 ohm·m^2.

Las conclusiones generales de los estudios fueron:

1 - Las areniscas y lutitas que afloran en el lecho del Vaso y que componen una parte de sus riberas están cortadas por fracturas, que pueden convertirse en conductos de fugas de agua de la Presa, básicamente en dirección normal al Dique.

2 – Según revelan los datos geofísicos, el fracturameinto puede alcanzar los 30 metros de profundidad o más, lo que crea un riesgo potencial de anegar las tierras contiguas al Dique y al territorio de la población de China.

Los puntos expuestos anteriormente fueron acertados porque:

1 - Las filtraciones esperadas frente al sondeo cero se han manifestado; sin embargo, las pérdidas no son bajas, ya que se estima que los gastos son del orden de 20 l/s.

2 - El aumento en el nivel freático ha sido evidente en la zona de la Cortina, donde existe una filtración; no manifestándose esto en el área del Dique, donde se esperaba ocurriera.

3 - Una filtración surgió frente al SEV 7 del Dique, la cual no fue pronosticada con base en los valores *T*, pero su aparición pudiera estar relacionada al intenso fracturamiento del lugar.

4 - Aparición de aguas saladas en la filtración frente al SEV 0, en donde se esperaban filtraciones de aguas con características químicas semejantes a las aguas del Vaso.

7.3.2 RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS GEOELÉCTRICOS E HIDROGEOLÓGICOS

La correlación entre la conductividad hidráulica y la resistividad ha sido estudiada por HEIGOLD *et al.* (1979), FROHLICH y KELLY (1985), NIWAS y SINGHAL (1985), CURTIS y KELLY (1990), GORMAN y KELLY (1990), MBONU *et al.* (1991) y QUARTO y SCHIAVONE (1994), entre otros; no pudiendo encontrar una correlación sencilla entre las dos propiedades antes mencionadas, obteniendo relaciones ambiguas, en algunos casos de tipo directa y otras de tipo inverso.

MAZAC *et al.* (1990) sugieren un modelo para explicar ambos tipos de correlaciones, proponiendo que las relaciones entre las propiedades dependen principalmente del tipo de roca y su porosidad. La forma de la relación, lineal o curvilínea, es modificada por la relación entre la dirección del flujo del agua subterránea, la estratificación y el tipo de resistividad.

Generalmente, la relación entre la conductividad hidráulica es directamente proporcional al tamaño de grano, lo que caracteriza los diferentes tipos de rocas. Por otra parte, en un particular tipo de roca la variación de la porosidad tiene una relación inversa (MAZAC *et al.*, 1985) tal y como se observa en la Figura 7.2

MAZAC *et al.* (1990) concluyen que se puede determinar la conductividad hidráulica a partir de los valores de resistividad, debiéndose calcular en cada caso la ecuación característica del medio geológico que se pretende estudiar.

Para el presente trabajo no es posible calcular la conductividad hidráulica por no contar con estudios paramétricos, sin embargo, las posibilidades de hacerlo dependerán de la perforación de pozos y la realización de pruebas de bombeo.

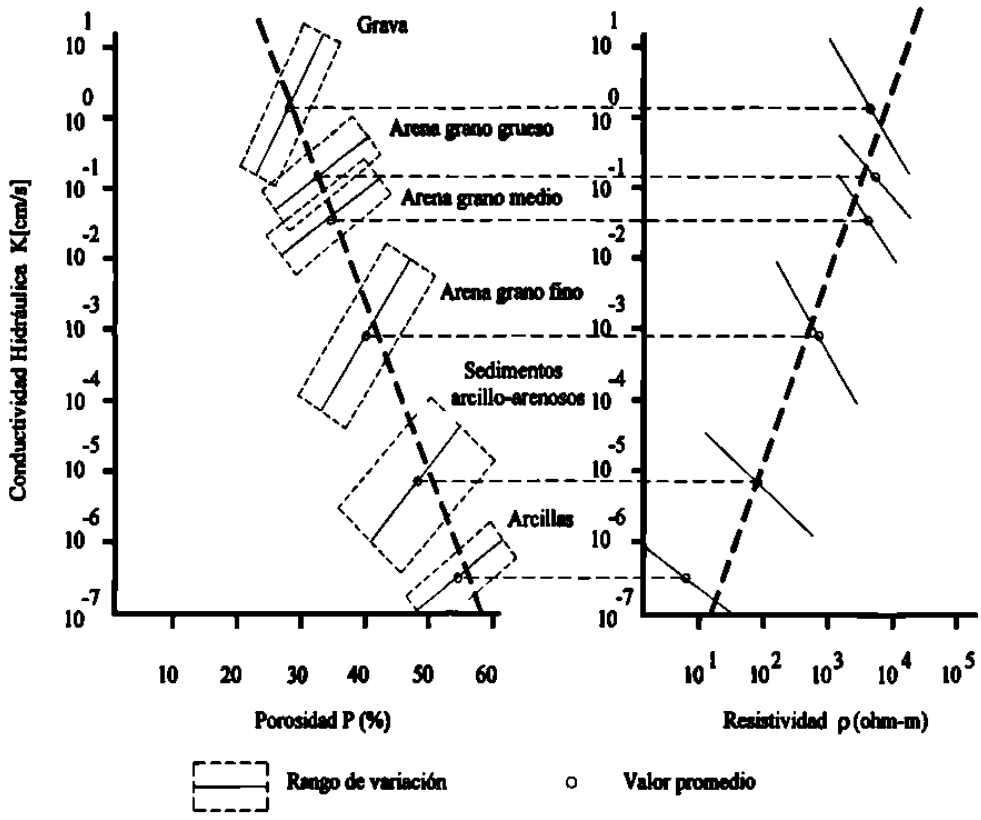

Figura 7.2 Relación entre la conductividad hidráulica, porosidad y resistividad para diferentes tipos de sedimentos (Tomada de MAZAC *et al.*, 1985).

7.3.3 PARÁMETROS PARA PRONÓSTICOS

El empleo de la resistencia transversal como parámetro de pronóstico de filtraciones en zonas aledañas a Presas es común en ingeniería geofísica, ya que tiene una relación directa con la transmisibilidad hidráulica de las rocas, y por otra parte, no es afectado por el principio de equivalencia (ORELLANA, 1982). Sin embargo, cuando se calcula el valor de *T* sólo se toman en cuenta las capas de las cuales se conoce su resistividad y su espesor, no incluyéndose la última capa por no conocerse su espesor, pudiendo ésta ser de importancia al tener valores altos de resistividad.

En este trabajo se presenta una modificación a la forma tradicional de determinar *T*, y esta consiste en calcular *T* hasta una profundidad determinada *H*. El valor de la profundidad *H* equivale a la suma de los espesores de las capas obtenidas de la interpretación de la curva de resistividad aparente promedio, que resulta del análisis estadístico de los SEV's.

La ecuación es semejante a la tradicional, difiriendo en que a la modificada *Tm* se le agrega un miembro más de la sumatoria

$$Tm = T + \rho_n\left(H - \sum_{i=1}^{1} hi\right), \tag{14}$$

donde

$$T = h_1\rho_1 + h_2\rho_2 + \ldots + h_i\rho_i + \ldots + h_{n-1}\rho_{n-1}\ , \tag{15}$$

h_i y ρ_i son la resistividad específica y espesor de la i-ésima capa.

En este trabajo se utiliza un valor de *H* de 40 m, los valores de resistividad y el espesor de cada capa se presentan en las Tablas 7.2, 7.3 y 7.4 para los años 1992, 1995 y 1997, respectivamente. En ellas se incluyeron los valores de *T* y *Tm*, observándose que los valores de *Tm* son mayores que los de *T*. Para comparación entre los valores de *T* y *Tm* se calculó la Diferencia de la resistencia transversal (*DT*) para cada sondeo.

Con el fin de apreciar los cambios en la resistencia transversal de las rocas se calcularon los cocientes de las resistencias transversales para los diferentes años, los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 7.5.

TABLA 7.2

RESULTADOS DE LA INTERPRETACIÓN DE LOS SEV's DE 1992.

SEV	*7*	*8*	*6*	*5*	*9*	*4*	*10*	*3*	*2*	*1*	*0*
h1	1.3	2.7	60	1	1	1	1	1	0.8	2.8	1
ρ1	9.5	9.8	6	4	5	5.5	16.7	14	12	65	63
h2	16.6	16		13	12	6.5	2.5	3	4	37.2*	36
ρ2	3.6	6.3	40	11.5	16	8	25	90	71	18.5	34
h3	22.1*	20		14	27*	22.5	9.3	22	35.2*		3*
ρ3	60	3.7		15	7	16	70	21	25		17
h4		1.3		12*		10*	27.2*	14*			
ρ4		10		7		7.7	15	8			
T	72	201	360	363	205	418	730	746	293	182	1230
Tm	1404	214	240	447	386	495	1138	858	1173	870	1281
* **DT**	1332	13	0	84	181	77	408	112	880	688	51

*** Este valor se obtiene restándole a *H* la suma de los espesores anteriores**

***DT* = *Tm* – *T*, ρ están en ohm·m, los de *h* en m, y los de *T* y *Tm* en ohm·m^2.**

TABLA 7.3

RESULTADOS DE LA INTERPRETACIÓN DE LOS SEV's DE 1995.

SEV	*7*	*8*	*6*	*5*	*9*	*4*	*10*	*3*	*2*	*1*	*0*
h1	1.2	7.4	2	1	2	1	1	4	1.7	1	1
ρ1	145	5	31	11	17	20	44	10	90	56	84
h2	5.4	7.4	7	3.5	7.5	13	4	5	6	3.5	3.5
ρ2	28	19	7	4	12	11	18	66	43	21	21
h3	22	22	25	20	30.5*	26*	8	11	32.3*	35.5*	20
ρ3	6.7	2	4.5	9	9	9.5	6	5	18	13	6.5
h4	11.4*	3.2*	6*	15.5*			27*	20*			15.5*
ρ4	17	11	9	4.5			16	14			17
T	473	222	224	205	124	163	164	425	411	130	288
Tm	669	257	278	275	399	410	596	705	992	591	551
DT	196	35	54	70	275	247	432	280	581	461	263

*** Este valor se obtiene restándole a *H* la suma de los espesores anteriores**

TABLA 7.4

RESULTADOS DE LA INTERPRETACIÓN DE LOS SEV's DE 1997.

SEV	*7*	*8*	*6*	*5*	*9*	*4*	*10*	*3*	*2*	*1*	*0*
h1	1.7	0.8	1.4	0.8	2.5	2.5	1.7	1	3.4	0.9	0.8
ρ1	87.4	33.4	57.5	31.8	47.5	58.3	29.7	28.1	81.2	120	10.4
h2	7.1	7.6	7.5	7.8	5.2	7.6	7.1	4.1	3.8	7.5	4.1
ρ2	15.7	7	11.5	9.6	13.8	26.8	11.9	4.8	49.1	17	6.5
h3	16.2	17.8	17.3	7.3	32.3*	29.9*	8.8	3.9	32.8*	31.6*	35.1*
ρ3	4.8	5.0	4.5	3.3	9.5	9.1	4.9	68.5	18.1	12.5	17
h4	15*	13.8*	13.8*	24.1*			22.4*	31*			
ρ4	13.4	7.3	8.9	22.1			14.6	9.1			
T	338	169	245	124	197	350	178	315	463	236	35
Tm	539	270	368	657	504	622	505	597	1057	631	632
DT	201	101	123	533	307	272	327	282	594	395	597

* Este valor se obtiene restándole a *H* la suma de los espesores anteriores

TABLA 7.5

COCIENTES DE RESISTENCIA TRANSVERSAL PARA DIFERENTES TIEMPOS.

SEV	7	8	6	5	9	4	10	3	2	1	0
T1995/T1992	6.56	1.10	0.93	0.56	0.60	0.38	0.22	0.57	1.40	0.71	0.23
T1997/T1992	4.69	0.84	1.02	0.34	0.96	0.83	0.24	0.42	1.58	1.29	0.03
Tm1995/Tm1992	0.47	1.20	1.16	0.61	1.03	0.82	0.52	0.82	0.84	0.67	0.43
Tm1997/Tm1992	0.38	1.26	1.53	1.47	1.31	1.26	0.44	0.69	0.90	0.93	0.49

Se observa que los valores de *T* entre 1995/1992, oscilan entre 0.22 a 6.56, siendo los tres valores más pequeños para los sondeos 4, 10 y 0, del orden de 0.22 a 0.38. Si hacemos la misma comparación para los valores de *Tm* tenemos que los valores más pequeños se ubican en los sondeos 7, 10 y 0. Esta comparación se realiza para determinar las zonas que han tenido cambios considerables en sus valores de resistencia transversal debido a la saturación de las rocas.

En la Figura 7.3 se presenta la gráfica de los valores de *T* para cada uno de los sondeos y para los diferentes años. Para el año 1992 se observa que existen valores altos (mayores de 600 ohm·m^2) en los sondeos 10, 3 y 0, siendo estas las zonas de mayor riesgo por las fugas que pudieran suceder.

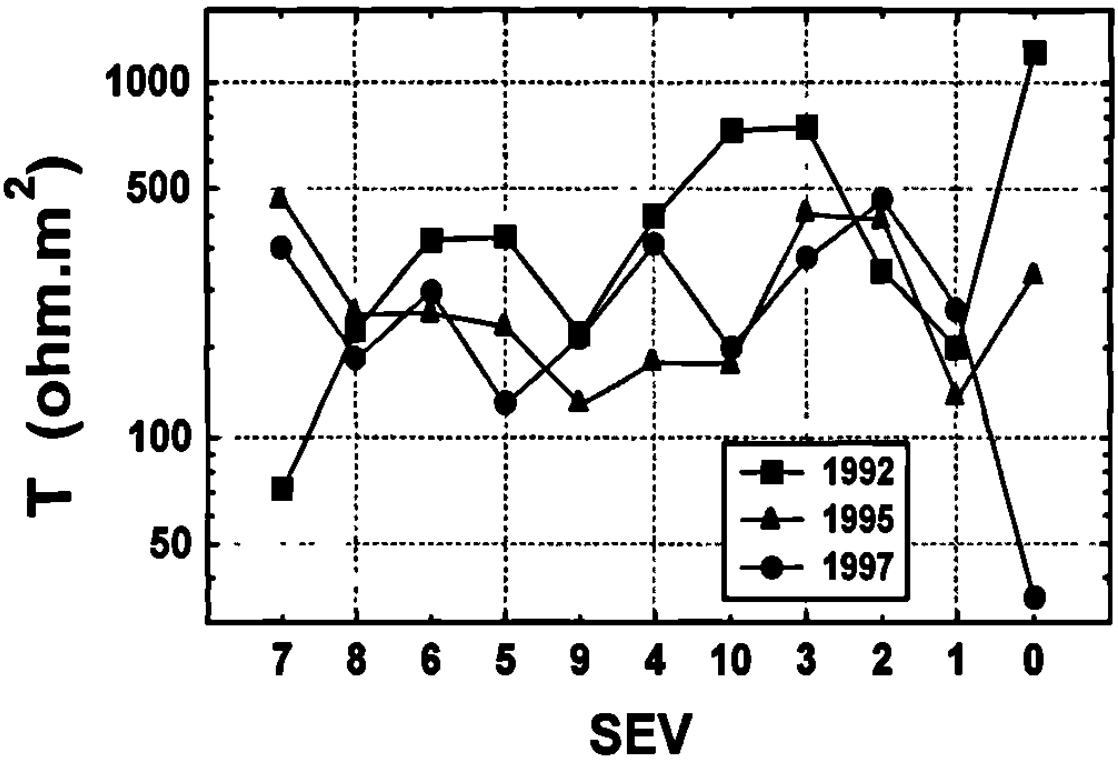

Figura 7.3 Gráfica de los valores de *T* para cada uno de los sondeos a lo largo del Dique.

Los valores modificados de la resistencia transversal *Tm* se han graficado (Figura 7.4) para los años 1992, 1995 y 1997. Se muestra que, además de las zonas destacadas en la Figura anterior, los puntos 7, 2 y 1 también tienen valores altos y pueden ser pronosticados como zonas potenciales de filtración.

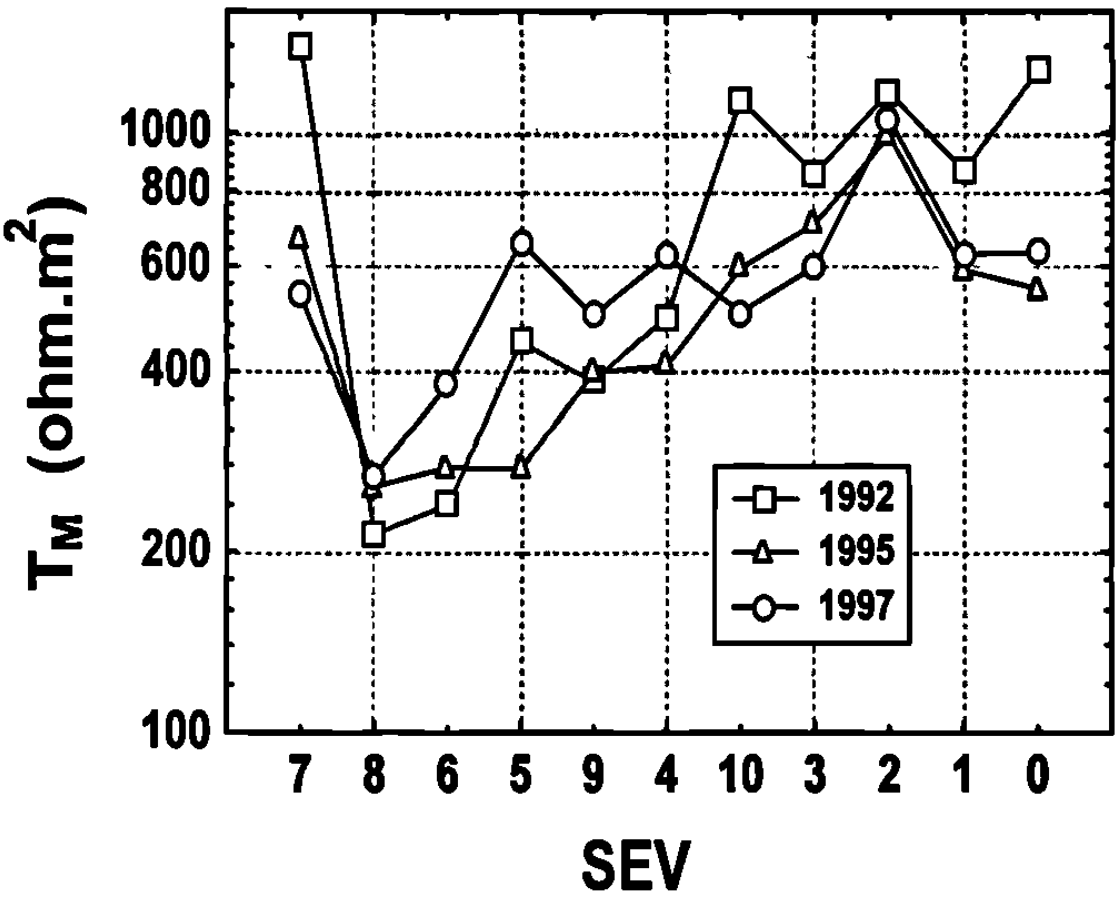

Figura 7.4 Gráfica de los valores de *Tm* para cada uno de los sondeos a lo largo del Dique.

7.4 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS CON BASE EN LOS DATOS GEÓLOGO-GEOFÍSICOS

Con el fin de determinar la situación hidrogeológica del área de estudio, se procede a analizar, con cada uno de los métodos utilizados, las características físicas de las rocas que tienen estrecha relación con el comportamiento del agua dentro de un sistema.

7.4.1 DATOS ESTRUCTURALES

En el área de estudio se realizaron levantamientos de rumbo y buzamiento de las diaclasas en tres afloramientos cercanos a la Cortina y el Dique de la Presa. En la Figura 7.5 se presenta un concentrado de los datos de rumbos de diaclasas, notándose que existen tres sistemas.

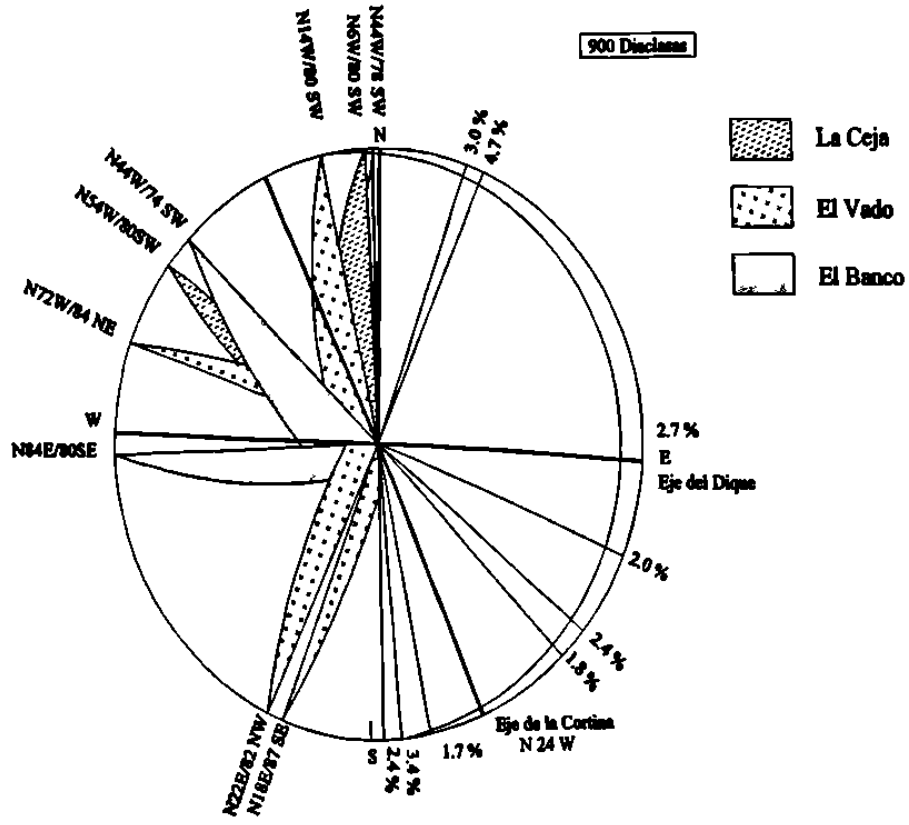

Figura 7.5 Elementos estructurales (diaclasas y estratificación) para el área de estudio.

El primero, con rumbo entre N14W y N20E, reviste mayor importancia en cuanto a filtraciones, ya que es prácticamente perpendicular al Dique. El segundo sistema es ortogonal al primero con rumbo E-W y que, para el caso de la Cortina, representa una condición favorable para filtraciones. Por último, existe el tercer sistema que tiene un rumbo de N44W a N72W y que parece estar relacionado con la filtración frente al SEV 7 en el Dique; además, presenta coincidencia en rumbo con las fracturas mayores de la región.

La abertura de las diaclasas varía de 0.5 a 1.2 mm, lo que conjugado con su separación entre ellas, que oscila entre 51.18 y 94.88 cm, da como resultado conductividades hidráulicas del orden de 10^{-4} a 10^{-3} m/s en las areniscas; no obstante, algunas de estas se encuentran rellenadas por limos y arcillas, y en ocasiones yeso, lo que podría traer como consecuencia la disminución del valor de conductividad hidráulica.

7.4.2 DATOS DE MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

Basándonos en la información obtenida de los perfiles electromagnéticos (Fig. 6.8) a lo largo del Dique, se puede establecer que la parte superficial del corte geológico (< 15 m de profundidad) puede ser dividida en dos zonas: la primera abarca de los SEV 7 al 9, en donde la conductividad es alta, y la otra, del SEV 4 al 2, donde la conductividad es baja. La conductividad alta se asocia con saturación del subsuelo por flujo lateral del agua del Vaso, mientras que los valores de conductividad bajos hacen suponer que las rocas en este lugar no se encuentran saturadas por ser esta una parte alta topográficamente. Cerca del SEV 1 se encuentra un pico con valor muy alto de conductividad lo que pudiera estar relacionado con una zona del subsuelo ya saturada.

Se observó que los cambios laterales de la conductividad son bruscos, es decir, existen valores altos de conductividad que contrastan a unos pocos metros con valores bajos. Los valores bajos conductivos se relacionan con las capas de areniscas no saturadas, mientras que los altos, con las lutitas o areniscas saturadas. Si se correlacionan en la superficie los picos de ambos perfiles obtendríamos una dirección N15W, coincidiendo esta con los rumbos de las capas y con la dirección de uno de los juegos de diaclasas. Esta es la dirección que pudieran seguir las filtraciones en la parte Este del perfil, favorecidas por el gradiente superficial, ya que el Dique está construido sobre un parteaguas de topografía suave.

7.4.3 DATOS DE ANISOTROPÍA DE PROPIEDADES FÍSICAS

En el año de 1992, entre los sondeos 9 y 10, se realizaron tres perfiles circulares con un ángulo de cambio de arreglo de 30°. La finalidad era establecer la orientación

dominante de las rocas y su relación con la variación de la resistividad específica (UANL-UEM, 1993b).

Para elevar al máximo la sensibilidad del método se utilizó un dispositivo dipolar ecuatorial. En los tres perfiles circulares es predominante la dirección N15W, la que coincide con el rumbo de las rocas, así como con la orientación principal de la fracturación, ambas con dirección normal al Dique, lo que puede favorecer la filtración de aguas de la Presa.

Con el fin de determinar la anisotropía de las velocidades sísmicas en el macizo rocoso, se realizaron cuatro perfiles azimutales, con una distancia angular de 45°, con el método de primeros arribos. De estos estudios se concluyó que el contraste de velocidades, según las diferentes direcciones, se relaciona con la orientación predominante de las diaclasas.

De los anteriores estudios sísmicos se determinó una frontera suavemente ondulada a una profundidad de 5 – 7 m, la cual corresponde al techo de las areniscas no alteradas por debajo de la zona de intemperismo. Por otra parte es evidente la existencia de un sistema de fracturas subverticales con un rumbo N8W, prácticamente perpendicular del Dique, la profundidad que alcanzan las fracturas es de al menos 10 metros en las areniscas (UANL-UEM, 1993b).

7.4.4 PROPIEDADES HIDRÁULICAS CON BASE EN SEV's

Uno de los métodos geoeléctricos para determinar las propiedades de las rocas son los SEV's, los cuales se aplicaron a lo largo del Dique en tres campañas. Se han interpretado las curvas de resistividad aparente, y con los datos obtenidos, se pretende calcular la porosidad y la conductividad eléctrica del fluido que rellena los poros.

Para lograr lo anterior se siguió la metodología propuesta por STEINICH *et al.* (1997), la cual tiene sus bases en la ley de Archie, que en su forma más explícita es

$$\rho_r = (a\, b\, \eta^{-m}\, S^{-n})\rho_a ; \qquad (16)$$

donde ρ_r es la resistividad de las rocas, *a* y *b* los coeficientes según tipo de roca, η la porosidad, *m* el parámetro de cementación, *S* el grado de saturación, S^{-n} el índice de resistividad y ρ_a la resistividad del agua.

De la ecuación anterior se puede despejar η con la finalidad de dejar la porosidad en función de las demás variables y obtenemos

$$\eta = (ab\rho_a / S^n \rho_r)^{1/m} . \qquad (17)$$

Por considerarse que tenemos areniscas bien cementadas se tomaron (ORELLANA, 1982) los valores de *a* igual a 0.6 y *b* igual a 0.6. Se supone que existe en algunos puntos saturación del 100%, el valor del índice de resistividad es de 2.25 y el parámetro de cementación de 1.7. Los valores de ρ_r son las resistividades específicas de las rocas del corte geológico y ρ_a es la resistividad del agua contenida en los poros y es de 2.358 ohm-m.

Con los datos del párrafo anterior y los obtenidos de la interpretación de los sondeos de 1997, se han calculado las porosidades de las rocas en los sitios donde los SEV's tuvieron cambios significativos de *Tm*. Para el sondeo cero, donde existe una filtración, los valores obtenidos del porcentaje de porosidad son de 22.90, 30.19 y 17.15 % para rocas con espesores 0.8, 4.1 y 35.1 m y resistividades 10.4, 6.5 y 17 ohm-m, respectivamente. En el sondeo 7 los valores de porosidad son de 6.54, 17.97, 36.09 y 19.73 % para espesores de 1.7, 7.1, 16.2 y 15 m con resistividades de 87.4, 15.7, 4.8 y 13.4 ohm-m, respectivamente. En el sondeo 10 la porosidad es de 12.35, 21.15, 35.65 y 18.76 para espesores de 1.7, 7.1, 8.8 y 22.4 m y resistividades de 29.7, 11.9, 4.9 y 14.6 ohm-m.

Por otra parte, para calcular la resistividad del agua que se encontraba en el acuífero original se supone que los parámetros, *a*, *b*, *m*, *n*, η y *S*, para la parte baja del sondeo 0, no han cambiado con el tiempo de 1992 a 1997.

Se puede determinar que el mecanismo de filtración en la parte Este del Dique, frente al sondeo cero, es aquel donde el agua salada, que se encontraba en el acuífero original, tiende a mezclarse con agua del Vaso, por lo que la conductividad del agua de la filtración disminuye al transcurrir el tiempo, dándose también un aumento en el nivel del agua del acuífero, como se ilustra en la Figura 7. 6. La mezcla de aguas es apoyada por los datos geoquímicos, en donde para los datos de abril de 1995 se han calculado proporciones de agua de la Presa y agua del acuífero del orden de 4.66:1.

El ascenso del nivel freático tiene las siguientes evidencias:

a) Las Primeras manifestaciones de filtraciones tienen lugar a aproximadamente un kilómetro al Norte del Dique donde la topografía es más baja (desnivel del orden de 15 metros), y a medida que avanza el tiempo estas filtraciones se manifiestan más cerca del Dique hasta quedar a escasos metros (<de 10 m) de la estructura del mismo.

b) En las secciones geoeléctricas se observa que los cambios en los valores de resistividad específica al transcurrir el tiempo tienen lugar primeramente en la parte baja de dicha sección, especialmente en el Este, disminuyendo considerablemente la resistividad específica de las rocas por la saturación de agua del acuífero.

El curso que siguen las aguas es a través de las areniscas, ya que estas rocas tienen conductividades hidráulicas altas debido a su porosidad primaria, calculada del 6 a 15% mediante análisis de fotografías de secciones delgadas y de 6 a 35 % según estimaciones con base en los datos geoeléctricos. Esta discrepancia en los valores de porosidad podría deberse que con los datos geoeléctricos se puede considerar la porosidad secundaria debida a la fracturación de las rocas.

El ascenso del agua no es en forma vertical ya que las lutitas, con inclinación de 10° al NE, lo evitarían ante su baja conductividad hidráulica; más bien, el flujo del agua es siguiendo el echado de las areniscas, esto apoyado en que las filtraciones se manifiestan en estas rocas que forman las crestas topográficas de la región frente al Dique. Las filtraciones se ven favorecidas por la disposición de las capas y su rumbo prácticamente al Norte; además la geología estructural y la anisotropía, en los valores

de resistividad, muestran que existe un sistema de fracturamiento en dirección perpendicular al Dique, lo que ayuda a que las filtraciones tengan lugar.

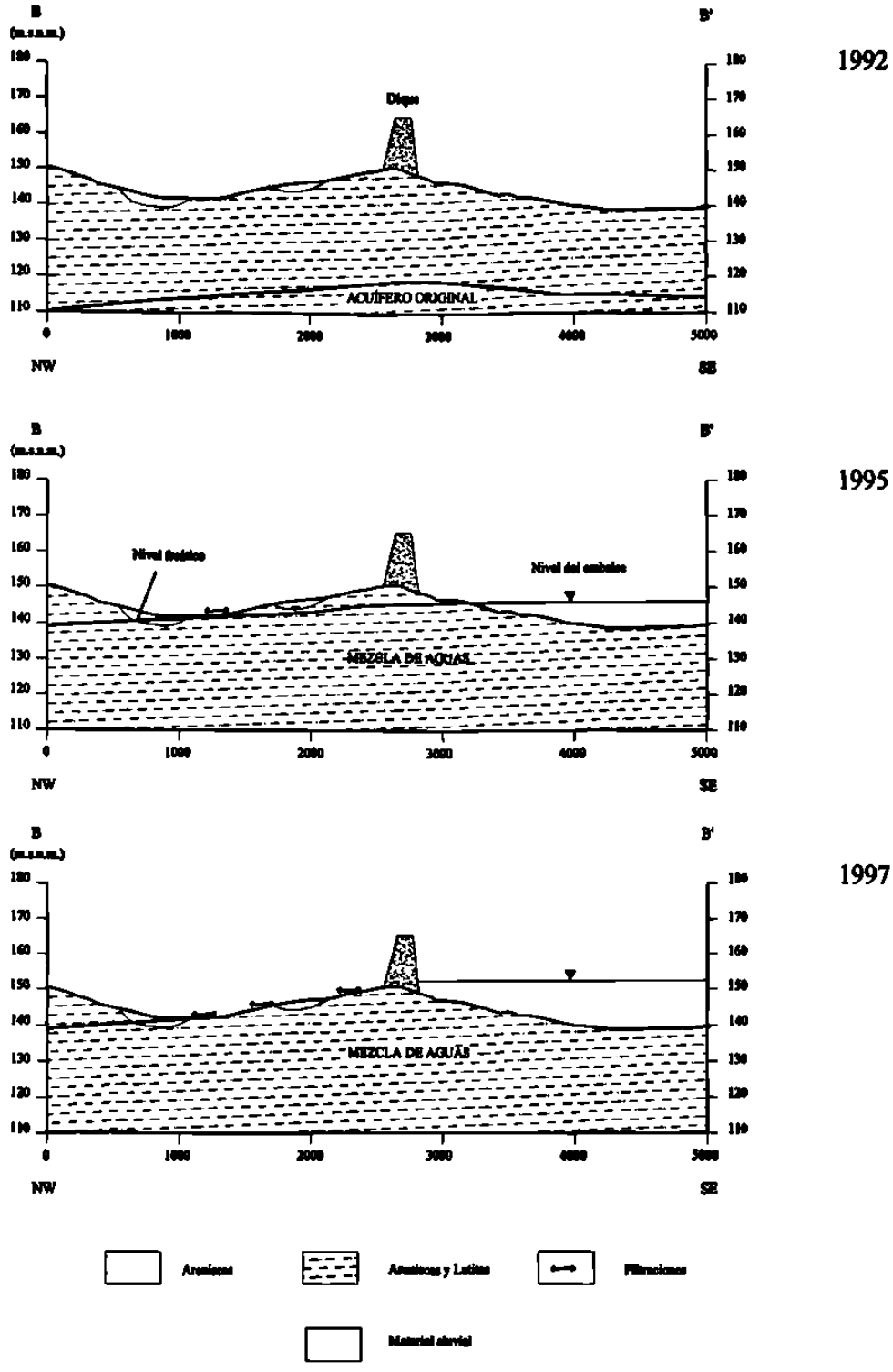

Figura 7.6. Modelo de ascenso del nivel freático en el área del Dique para un corte geológico perpendicular al Dique cerca del sondeo cero.

En cuanto a las filtraciones en la parte Oeste del Dique, el mecanismo propuesto está relacionado con flujos laterales provocados por la diferencia de nivel entre las aguas de la Presa y los niveles topográficos aguas abajo del Dique. Este mecanismo tiene lugar a través de fallas y diaclasas, evidencia de lo anterior es el manantial intermitente localizado entre los sondeos 7 y 8 de aguas con contenidos de sales semejantes las aguas del Vaso.

Existe poca información disponible de la Cortina, sin embargo, se estima que el mecanismo de filtración coincide con el del Dique en cuanto a la infiltración del agua del Vaso y su mezcla con el agua del acuífero ya existente, pero el ascenso del agua tiene lugar a través de fallas, ya que el buzamiento de las areniscas está en la misma dirección de la presión hidrostática.

7.6 PROPUESTA PARA FUTUROS ESTUDIOS EN SITIOS DE PRESAS

7.6.1 ESTUDIOS A REALIZARSE PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN

Enseguida se presenta, con base en la experiencia adquirida en el desarrollo de este trabajo, una propuesta de metodología a ser empleada en el estudio de sitios de construcción de Presas.

Los requisitos indispensables para la construcción de una Presa son: contar con una recarga hidrológica suficiente en una cuenca, que se cumplan las condiciones geomorfológicas para cerrar dicha cuenca y lograr tener un Vaso de almacenamiento. Cumpliendo lo anterior se procede a la búsqueda de materiales para la construcción.

El otro punto indispensable, no para la construcción, sino para tener un control de las condiciones del sitio, es realizar estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos del área, por lo que se propone se realicen las siguientes investigaciones:

Geológicas:

- Determinación de la distribución de las unidades geológicas mediante reconocimiento de campo, interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, poniendo énfasis en las unidades que pudieran presentar alta permeabilidad hidráulica y salinidad.
- Estudio estructural a detalle para determinar las zonas de fracturas que pudieran dar lugar a filtraciones después de construida la Presa Con esta información se puede estimar la permeabilidad del macizo rocoso.
- Perforación de pozos someros y profundos en el sitio de la Cortina y demás Diques para conocer la litología del subsuelo y posibles zonas de carstificación. Además, perforar otros pozos aguas abajo de la Cortina y los Diques para usarlos en la observación de los cambios hidrogeológicos.
- Realización de pruebas de bombeo para determinar la permeabilidad de las rocas, especialmente en los sitios de construcción de la Cortina y de el (los) Dique(s), así como en las estructuras que servirán como Diques naturales.
- Determinación de la porosidad y de los componentes mineralógicos de las rocas de la zona de estudio, así como de los materiales que rellenan las diaclasas y fracturas.
- Estudios de los datos del clima para determinar la precipitación y la evaporación en la cuenca y en la zona del Vaso.

Geoquímicas:

- Determinación de las propiedades químicas y físicas de las aguas de la zona de estudio.
- Estudios isotópicos de las aguas de la zona para determinar el origen de las mismas.

Geofísicas:

- Realización de sondeos eléctricos verticales para determinar la resistividad específica de las rocas y calcular los parámetros de pronóstico de zonas de fugas

de agua; así como la realización de perfiles circulares para determinar la orientación de las discontinuidades de las rocas.

- Estudio magnetométrico a detalle para determinar zonas de fracturamiento.
- Investigaciones por emanación de radón para determinar las zonas de fracturamiento y estimar la permeabilidad hidráulica.
- Estudios sísmicos para determinar el grado de fracturamiento y su dirección.
- Realización de perfiles electromagnéticos para refinar los estudios de control estructural.
- Registros geofísicos en los pozos para determinar, mediante las propiedades físicas, el tipo y la distribución de las rocas.

7.6.2 ESTUDIOS A REALIZARSE POSTERIORES A LA CONSTRUCCIÓN

Durante y después del llenado de la Presa se recomienda efectuar los siguientes estudios:

Geológicos

- Realización de pruebas de bombeo para determinar la permeabilidad de las rocas y evaluar la cementación de las obras.
- Monitoreo periódico de las filtraciones en cuanto a sus gastos.
- Obtención de datos de nivel del Vaso y de los pozos de observación para determinar si existe intercomunicación y evaluar su intensidad.
- Monitoreo de los niveles piezométricos e interpretación de los datos para determinar el régimen hidrogeológico de las obras y las áreas aguas abajo de las mismas, así como monitorear la estabilidad (asentamientos) de la construcción mediante la información generada por los inclinómetros.

Geoquímicos

- Determinación de las propiedades físicas y químicas de las diferentes aguas de la región (río, Vaso, filtraciones, acuífero, etc.) y de las variaciones de estas propiedades en el tiempo.

Geofísicos

- Monitoreo mediante sondeos eléctricos verticales de los cambios en las propiedades de las rocas al modificarse la situación hidrogeológica por el llenado del Vaso.
- Levantamiento de datos de potencial natural para determinar las zonas de ascenso o descenso de las aguas, tanto dentro del Vaso como aguas abajo de los Diques.
- Perfiles electromagnéticos para determinar los cambios temporales en las propiedades de las rocas al cambiar el régimen hidrogeólogico.

CAPÍTULO 8
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los estudios realizados en el área de la Cortina y el Dique de la Presa El Cuchillo se **concluye** lo siguiente:

- Las rocas que constituyen el subsuelo, en donde se construyó la Presa, son una secuencia de areniscas y lutitas de la Formación Mount Selman del Eoceno. Las areniscas presentan espesores variables desde centímetros hasta metros, y una orientación promedio NNW-SSE y buzamiento de 6 a 10° hacia el NE. Sobreyacen a estas rocas sedimentos aluviales y conglomerados del Cuaternario.
- Los componentes principales de las areniscas son granos de cuarzo y feldespatos angulosos (25 a 50 %); conteniendo, además, fragmentos líticos y limolita cementada con micrita. Presentan una porosidad de 6 a 15% según estimaciones petrográficas, y del orden de 20 a 30% según estudios de resistividad de las rocas.
- Las orientaciones principales de las fracturas y diaclasas se pueden agrupar en tres sistemas, donde sus promedios de rumbos son N-S, E-W y N50W. En dichas direcciones aumenta la conductividad hidráulica de las areniscas, provocando filtraciones al pie de la Cortina y el Dique. La abertura de las fracturas es de 0.5 a 1.2 mm y el número de ellas por metro es de 1 a 2. En cuanto a las propiedades de las rocas, se ha determinado que la conductividad hidráulica tiene valores de 0.0001 a 0.0005 cm/s.
- Los datos piezométricos en la Cortina han mostrado que existe un acuífero múltiple, en donde se han identificado hasta cuatro pisos hidrogeológicos, donde las areniscas actúan como almacenadoras y conductoras de agua.
- Se han presentado filtraciones al pie de la Cortina y del Dique, teniéndose un gasto total aproximado de 250 l/s, siendo la concentración de iones muy alta. Las concentraciones químicas de los diferentes iones pueden explicarse como una mezcla

de las aguas del Vaso y las aguas del acuífero, en donde las proporciones son de 4.66:1, respectivamente.

- La concentración de especies de iones en las aguas de filtración de la Cortina no cambia significativamente con respecto al tiempo. Las del Dique si cambian en forma decreciente, para luego incrementarse, lo que supone que ya ha existido flujo de agua de varios acuíferos, al menos dos. Las altas concentraciones pudieran estar relacionadas con disolución de evaporitas, lo que se podría acelerar con la recarga de la Presa.
- De los Sondeos Eléctricos Verticales se ha observado que existen variaciones temporales en la resistividad de las rocas, manifestándose disminución de sus valores de abajo hacia arriba del corte geoeléctrico, relacionadas estas variaciones con el grado de saturación de las rocas. Los cambios que se observan son más evidentes hacia la parte Este del Dique.
- El parámetro de Resistividad Transversal *T*, propuesto en la literatura, es una herramienta utilizada con el fin de pronosticar zonas de filtraciones; sin embargo, el parámetro de Resistividad Transversal Modificado *Tm* muestra ser mejor, ya que con él si se pudieron pronosticar zonas de filtración, que el parámetro *T* no podía evidenciar.
- El mecanismo de filtración en el Dique consiste en que las aguas del Vaso pasan a través de las areniscas y debido al gradiente topográfico, sigue el rumbo de las capas hacia el Norte, su ascenso es a través de las mismas areniscas, manifestándose las filtraciones en las partes de relieve alto; en cambio, para la Cortina, el mecanismo sugiere filtración similar a la del Dique, pero la salida es a través de fallas.
- Teniendo como base los estudios efectuados, se establece que el pronóstico de filtración realizado en 1992 fue acertado y coincide con las condiciones hidrogeológicas que hoy día se registran en la zona. De la información obtenida en el presente estudio se pronostica que las filtraciones continuarán hacia la parte W del Dique a medida que aumenta el nivel del Vaso.
- Por último, basado en la experiencia del presente trabajo y de otros estudios en Presas, se presenta una propuesta metodológica a emplearse en el estudio de sitios

de almacenamiento de aguas. Se propone incluir la integración de estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos. Esta metodología contempla las investigaciones a realizarse, previas a la construcción, así como las que se deben realizar con el fin de monitorear las condiciones de estabilidad de las obras y del cambio en el régimen hidrogeológico.

Con el fin de tener un mejor control de las condiciones geólogo-geofísicas en el área de la Presa El Cuchillo, **se recomienda**:

- Continuar con la toma de datos geofísicos en el área del Dique. Es recomendable ya que esto nos permitirá observar los cambios en la distribución de la resistividad de las rocas debido a su relación con el contenido de agua; además, realizar pruebas de laboratorio y de campo para determinar las propiedades como transmisividad hidráulica y más pruebas de porosidad, parámetros muy importantes para estudios hidrogeológicos.
- Realizar estudios de potencial natural dentro y fuera del Vaso con el fin de determinar las zonas de ascenso y descenso de agua.
- Los estudios geoquímicos de las aguas del área deben continuar con la finalidad de obtener los datos que permitan elaborar un modelo de evolución, así como los cálculos del equilibrio de especies minerales, esto con el objetivo de verificar si los procesos de disolución de evaporitas (yeso y halita) tienen lugar y en qué magnitud.
- Crear un banco de información sobre los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos del área para continuar las investigaciones, esto con el fin de no repetir esfuerzos en futuros estudios.
- Perforar algunos pozos aguas abajo del Dique que sirvan de plataforma para el monitoreo de los valores del nivel del agua y permitan evaluar el riesgo hidrogeológico de la obra hidráulica.

- Realizar estudios isotópicos con el fin de ayudar a determinar el origen de las aguas de la región y refinar los datos de mezclas.
- Elaborar los estudios de impacto ambiental debido a obras hidráulicas como la Presa El Cuchillo – Solidaridad, antes, durante y después de la construcción de la obra, con el fin de conocer el impacto ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

APHA-AWWA-WPCF (1992) Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17a edición, Washington, D.C.1246 p.

BARTON, N., BAMFORD, W.E., BARTON, C.M., MACMAHON, B. et al., (1978) Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 15, 319 - 368.

CAVAZOS, T. (1994) The influence of the southern oscillation on the winter climate of Nuevo Leon, Mexico. Geof. Int., 33, 295 – 302.

CNA (1993) Proyecto "Presa El Cuchillo". Informe Técnico. 30p.

CURTIS, B. y KELLY, W. E. (1990) Resistivity – recharge relationships – Field Study. J. Hydrol., 118, 39 – 53.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. (1976) Hidrología subterránea, 2ª edición, Editorial Omega, España. Tomo II. 1154 p.

DAVIS, S.N. y DE WEIST, R. (1971) Hidrogeología. 2ª edición, Editorial Ariel. España. 563 p.

DE LEÓN-GÓMEZ, H., SCHETELIG, K. y MEIBURG, P. (1994) Abastecimiento de agua potable en el noreste de México. Ejemplo: Presa Cerro Prieto. Zbl. Geol. Palaont. Alemania, Tiel 1 (1/2), pp 593 - 602.

ECHÁNOVE-ECHÁNOVE, O. (1986) Geología petrolera de la Cuenca de Burgos. Parte I – Consideraciones geológico-petroleras. Bol. Asoc. Mexicana de Geólogos Petroleros, 38, 3 - 39.

FRANKLIN, J.A. y DUSSEAULT, M.B., (1989) Rock Engineering. 1ª edición. Editorial Mc Graw Hill. Estados Unidos de América. 600 p.

FRANKLIN, J. A., VOGLER, U.W., SZLAVIN, J., EDMOND, J.M. y BIENIAWKI, Z.T. (1979) Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absortion and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 16, 141 – 156.

FREEZE, R.A. y CHERRY, J.A. (1979) Groundwater. 1ª Edición. Editorial Prentice Hall. Estados Unidos de América. 604 p.

FROHLICH, R.K. y KELLY, W.E. (1985) The relation between hydraulic transmissivity and transverse resistence in a complicated aquifer of glacial outwash deposits. J. Hydrol., 79, 215 – 229.

GARCÍA, E. (1981) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 1a. edición, México, D.F. 252 p.

GORMAN, T. y KELLY, W.E. (1990) Electrical – hydraulic properties of unsaturated Ottawa sands. J. Hydrol., 118, 1 – 18.

HEIGOLD, P.C., GILKESON, R.H., CARTWRIGHT, K. y REED, P. C. (1979) Aquifer transmissivity from surficial electrical methods. Ground Water, 17, 338 – 345.

HEM, J.D. (1986) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3ª edición. Editado por el U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263 p.

INEGI (1978) Carta edafológica, Hoja China G14C29. Escala 1:50,000, 1a. edición, México, D.F.

INEGI (1991) Censo poblacional, El Norte. – Monterrey.

KENNEDY, W. (1992) A seccion from Terrell. Kaufman Country to Sabine Pass on the Golf of Mexico, Tex. G.S., An. Rp., 3, 41 - 125.

KÖPPEN, W. (1936) Das geographische System del Klimate. En: Koppen-Geiger, Handbuch del Klimatologie. Bd. 1, Teil C, Berlín, 44p.

LÓPEZ-RAMOS, E. (1982) Geología de México. 3ª Edición, México. Tomo 2, 454 p.

MAZAC, O., CISLEROVA, M., KELLY, W. E., LANDA, I. y VENHODOVA, D. (1990). Determination of hydraulic conductivities by surface geoelectrical methods. En Geotechnical and Environmental Geophysics, Vol. 2, Environmental and Groundwater, p 125 – 131, ed. Ward, S. H., Soc. Expl. geophys., Tulsa.

MAZAC, O., KELLY, W.E. y LANDA, I. (1985) A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifer. J. Hydrol., 79, 1 – 19.

MAZOR, E. (1991) Applied chemical and isoptopic groundwater hidrology. Ed Willey and Sons, 1ª edición, Estados Unidos de América. 274 p.

MBONU, P.C., EBENIERO, J.O., OFOEGBU, C.O. y EKINE, A.S. (1991) Geoelectic sounding for the determination of aquifer characteristics in parts of the Umuahia area of Nigeria. Geophysics, 50, 284 – 291.

MCBRIDE, M.B. (1994) Enviromental chemistry of soils. Ed. Oxford University Press, Inc. 1ª edición. Estados Unidos de América. 367 p.

MCNEILL, J.D. (1980) Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers: Technical Note TN - 6, Geonics Ltd, Mississauga, Canada.

MEIBURG, P. (1987) Paleogeografía y desarrollo estructural del Cretácico de la Sierra Madre Oriental Septentrional, México. Actas Fac. Ciencias de la Tierra, U.A.N.L., Linares, 2, 197 - 199.

MÉNDEZ-DELGADO, S. (1997) Inversión y modelado de campos eléctricos y magnéticos para números de inducción pequeños. Tesis Doctoral, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, BC, México.

MÉNDEZ-DELGADO, S., GÓMEZ-TREVIÑO, E. y PÉREZ-FLORES, M.A. (1999) Forward modelling of direct current and low-frecuency electromagnetic fields using integral equations, Geohys. J. Int., 137, 336 – 352.

MOUSATOV, A.A., POLA-SIMUTA, C., SHEVNIN, V.A., KOUZOUB, N.A. y ANDAVERDE, J. (1996) Investigaciones geoeléctricas para pronosticar y monitorear procesos de filtración en la presa El Cuchillo, China, Nuevo León, México. Resumen. Geowissenschaftliches Lateinamerika-Kolloquium. Terra Nostra. 8, 100 – 101.

MOUSATOV, A.A., POLA-SIMUTA, C., SHEVNIN, V.A., KOUZOUB, N.A. y ANDAVERDE, J. (1999) Geoelectrical studies to predict and monitor the filtration process on the reservoir at Nuevo Leon, Mexico. Enviromental and Engineering Geophysical Society European Section, Proceedings 2 p.

NAVARRO, I. (1996) Estudios hidrogeológicos de la Loma Los Pozos durante la fase inicial de llenado de la Presa El Cuchillo - Solidaridad, China, Nuevo León, México. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, U.A.N.L. 145 p + anexos.

NIWAS, S. y SINGHAL, D.C. (1985) Aquifer transmissivity of porous media from resistivity data. J. Hydrol., 82, 143 – 153.

OGILVY, R.D., CUADRA, A., JACKSON, P.D. y CUELLAR, V (1991) Delineation of a resistive drainge channel by EM conductivity survey. Geoexploration. 28, 139 – 152.

ORELLANA, E. (1982) Prospección geoeléctrica en corriente continua, 2ª edición. Ed. Paraninfo, Madrid. 578 p.

PRADO-GÓMEZ, J. (1997) Aplicación de métodos geofísicos (SEV's) para investigar zonas de canales de gravas en el área de Hualahuises – Linares, Nuevo León, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. 96 pp + anexos.

QUARTO, R. y SHIAVONE, D. (1994) Hydrogeological implications of the resistivity distribution inferred from electrical prospecting data from the Apulian carbonate platform. J. Hydrol., 154, 219 – 244.

RAGAN, D.M. (1980) Geología Estructural. Editorial Omega, Barcelona, 207 p.

RODRÍGUEZ-LOZANO, D. (1976) Bioestratigrafía de la franja Paleoceno-Eoceno de la Cuenca de Burgos, Memorias III Simposium de geología del subsuelo. Petróleos Mexicanos, Zona Noreste 241 – 253 p.

SARH (1979) Informe geológico del proyecto "El Cuchillo" sobre el Río San Juan, Municipio de China, Estado de Nuevo León. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Reporte interno, 70 p.

SCHLUMBERGER (1984) Evaluación de formaciones en México. 1ª Ed. Francia. 325 p.

SCHOELLER, H. (1954) La classification géochimique des eaux. IASH. General Assembly of Berkeley, publ. 64, 16 - 24.

SPP (1981) Geología de la República Mexicana. Secretaría de Programación y Presupuesto, México. 82 p.

STEINICH, B., SIMÓN, I., ANDRÉS-CHAVARRÍA, J. y MARÍN, L. E. (1997) Geophysical investigations of the vadose zone in the Valley of Hermosillo aquifer., Sonora, Mexico. Geof. Int., 36, 191 – 200.

TORRES-HERRERA, F. (1987) Obras hidráulicas, 2ª edición, Editorial LIMUSA, México, 294 p.

UANL-UEM (1993a) Estudios geofísicos en la Loma Los Pozos, Presa El Cuchillo. Informe Técnico. 40 p y anexos.

UANL-UEM (1993b) Investigaciones Ingeniero - geológicas y geofísicas en el área de la Presa El Cuchillo. Informe Técnico. 41 p y anexos.

VELDE, B. (1992) Introduction to clay minerals. 1ª edición. Editorial Chapman & Hall. Gran Bretaña. 356 p.

WERNER, J. (1996) Introducción a la Hidrogeología. Facultad de Ciencias de la Tierra, Linares, N.L, 1ª. edición, 174 p.