

COMPARACION DE TECNICAS GEOFISICAS EN SUPERFICIE Y EN SONDEO HACIA LA DETECCION DE INTRUSION MARINA. APLICACION AL CAMPO DE DALIAS (ALMERIA)

Resumen

Introducción

Situación geológica

Metodología utilizada

Técnicas de superficie

a) Instrumentación y toma de datos

b) Tratamiento e interpretación

c) Comparación de resultados

Medidas en sondeo

a) Instrumentación y toma de datos

b) Tratamiento e interpretación

c) Comparación de resultados

Comparación de medidas superficie-sondeo

Conclusiones

**COMPARACION DE TECNICAS GEOFISICAS EN SUPERFICIE Y EN SONDEO
HACIA LA DETECCION DE INTRUSION MARINA. APLICACION AL CAMPO
DE DALIAS (ALMERIA)**

DOMINGUEZ, S. * ; ROZYCKI, A. * ; DEL CAMPO, M. ** ; RAMOS, G. ***

* Dpto. de Ingeniería Geológica. Cátedra de Geofísica Aplicada. E.T.S. de Ingenieros de Minas de Madrid. Univ. Politécnica de Madrid.

** Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras (ENADIMSA).

*** Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

RESUMEN

Para la evaluación de la eficacia de las técnicas geofísicas en el seguimiento de intrusiones marinas se efectuaron las medidas con distintos métodos. - Se aplicaron, tanto las medidas en superficie (SEDT, SEV, SPI), como en sondeos mecánicos (R_{NC} , R_{NL} , R_{LAT} , PE, σ , T, γ_n , θ , REDT, RPI).

Las técnicas de testificación geofísica determinaron claramente la interfase agua dulce-agua salada con los parámetros eléctricos y de temperatura, proponiéndose este último junto con el PE como parámetros aconsejables para el seguimiento cualitativo del proceso.

Dentro de las técnicas geofísicas de superficie, para el modelo geológico estudiado, el más exacto resultó el método SEDT.

El método de P.I. disminuye la ambigüedad del modelo geológico construido a través de las técnicas geofísicas. Se obtienen mejores resultados si se procede a la descomposición factorial de los datos de P.I.

INTRODUCCION

La detección de procesos de intrusión marina en acuíferos costeros, provocando su salinización, está adquiriendo un notable interés por las consecuencias económicas que ello implica. No es casual que se presente en áreas de importantes inversiones agrícolas, donde el clima favorecedor para cultivos extratempranos en invernaderos y la ausencia de aportes superficiales provocan la sobreexplotación de sus recursos hídricos subterráneos.

En este sentido, y como método indirecto, la Geofísica puede tener un importante papel. Son escasos, sin embargo, los estudios realizados con esta finalidad y, aun menos, en áreas geológicamente complejas como son los acuíferos carbonatados fuertemente tectonizados.

Esta investigación pretende examinar las técnicas y metodologías óptimas en el estudio de dichos acuíferos con difícil resolución geofísica. Para ello se han aplicado la mayoría de las técnicas geofísicas sensibles a parámetros físicos variables con la salinidad, realizándose medidas en superficie y en

sondeo ("in situ") para comprobar su resolución.

SITUACION GEOLOGICA

Para este estudio se eligió el sondeo A-10, situado en la localidad de Agua-dulce (Almería) dentro del Campo de Dalías y alrededor del cual se realizaron las medidas de superficie (Fig. 1).

En general se trata de una sucesión de dolomías alpujárrides fracturadas pertenecientes al Manto de Gador con intercalaciones esquistosas y que constituyen el denominado Acuífero Inferior Noroeste (IGME). A techo aparece un término detrítico pliocuaternario perteneciente al Acuífero Superior Noroeste - (s.l.) IGME). Un esquema de las columnas litoestratigráficas obtenidas en dicho sondeo y otro muy próximo aparecen en la Fig. 2.

METODOLOGIA UTILIZADA

En un estudio a fondo, este problema deberá ser atacado, en una primera fase, dentro de un ámbito espacial, es decir, determinando la exactitud real de cada técnica en la determinación de la interfase agua dulce-agua salada - correlacionando con medidas "in situ" a un tiempo fijo. Posteriormente, analizar la resolución de dichas técnicas en diversos instantes, comparándolas con parámetros hidrológicos dentro de un ámbito temporal.

En esta investigación nos hemos limitado a estudiar la primera fase, utilizando medidas, tanto en superficie como en sondeo para compararlas con los datos litológicos e hidrogeológicos.

Las medidas de superficie se efectuaron, tanto sobre el propio sondeo, como a una distancia siempre menor a 200 en la dirección del sondeo A-11, con lo cual dada la proximidad y la similitud de las columnas litológicas, las medidas pueden ser atribuibles al sondeo A-10 (Fig. 2).

Igualmente, tanto las medidas de superficie como las de sondeo se realizaron en fin de semana para intentar evitar las alteraciones hidrogeológicas en -- tiempo inferior al de toma de datos, como consecuencia de explotaciones próximas.

TECNICAS DE SUPERFICIE

a) Instrumentación y toma de datos

Se realizaron dos sondeos electromagnéticos en dominio de tiempo (SEDT) con bobina receptora centrada en el bucle emisor. La longitud de este -- último fué de 200 m x 200 m. El instrumental utilizado, de la casa CRONE fue programado con tiempo de emisión 10 ms y tiempo de rampa 0.5 y 1 ms. La señal recibida fué tratada mediante filtros y volcada a un computador IBM PC en el campo para una interpretación preliminar.

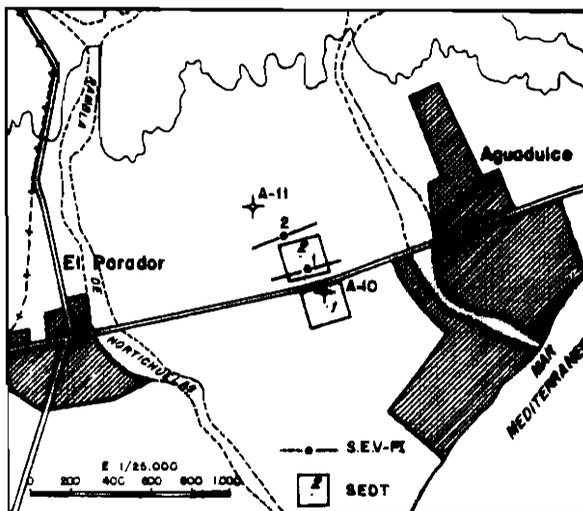
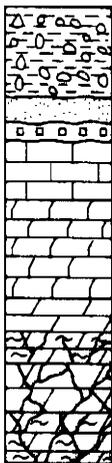


Fig. 1.- Situación del estudio

A-10



A-11



LEYENDA

PLIOCUATERNARIO CONT.

 Gravas limo-arcillosas

 Arenas de playa

TRIASICO
 Brecha calcarea

 Dolomia. Dolomia "INDIANA"

 Caliza. Caliza dolomitizada

 Calcoesquistos

Escala: 1/2.500

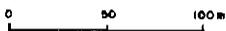


Fig. 2 (Informe interno ENADIMSA)

Igualmente, se realizaron dos sondeos de polarización inducida (SPI) y eléctricos verticales (SEV) con dispositivo tipo SCHLUMBERGER simétrico y distancia interelectródica final AB de 1440 m. Como fuente de corriente se utilizó un transmisor SCINTREX TSQ-3 (3 kW) con pulsos de duración 4 seg y electrodos de acero. El receptor, marca SCINTREX IPR-10 A, fue conectado a electrodos impolarizables de cobre.

Se define cargabilidad (m) como:

$$m = \frac{V_s \cdot 1000}{V_p}$$

Siendo V_s el potencial secundario y V_p el primario y expresándose m en -mv/v.

Se tiene, a su vez, V_s como:

$$V_s = \frac{1}{t_r} \int_{t_1}^{t_2} V_s dt + V_r$$

donde t_r es el período de integración ($t_2 - t_1$) y V_r el potencial residual.

Se tomaron las medidas de cargabilidad en seis ventanas con períodos de integración de 520 mseg desde 260 mseg a 3120 mseg. Las lecturas de resistividad se realizaron conjuntamente con las de cargabilidad

b) Tratamiento e interpretación

Los datos del SEDT fueron tratados, tanto en la interpretación preliminar como en la definitiva, por el programa ARRTI LAYERED EARTH INVERSION - para pasar de los datos de voltaje de la curva de descarga a un modelo -- adecuado de resistividades y espesores mediante inversión de alta resolución (Fig. 3).

En lo que respecta a la interpretación de los datos de resistividad aparente (ρ_a), se utilizó igualmente un procedimiento de cálculo automático interactivo para optimizar el ajuste a la curva ρ_a de campo. El aparato matemático se basa en la resolución de la ecuación:

$$\rho_a(r) = \rho_1 r^2 \int_0^{\infty} T(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda$$

siendo r la semidistancia interelectródica de emisión $T(\lambda)$ una transformada de la función núcleo y $J_1(\lambda r)$ la función de Bessel de primera especie y orden uno.

Para ello se realizará la convolución de espesores y resistividades, con

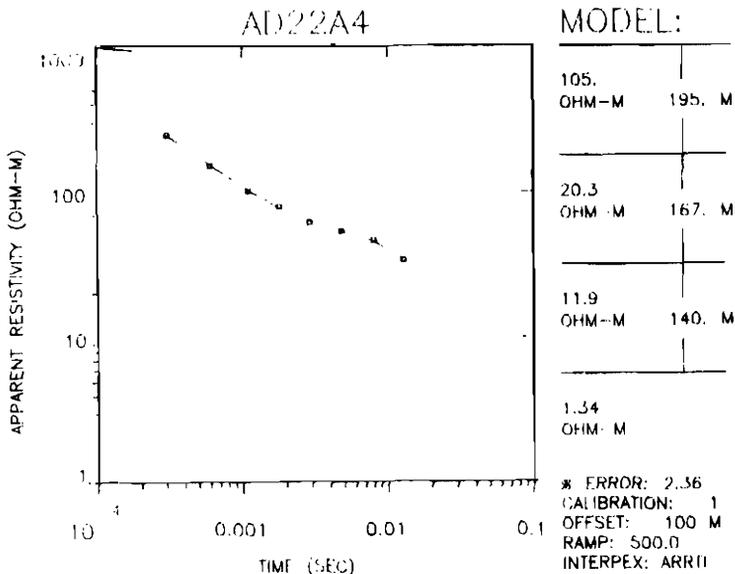


Fig. 3

el filtro de Ghosh (GHOSH, 1971).

En ambos casos los modelos fueron seleccionados en función de la semejanza con los datos geológicos y el mínimo error de ajuste.

El tratamiento de los datos de polarización inducida consistió en analizar la curva de descarga del medio al ser sometido a pulsos de carga (T) de 4 seg con cambios de polaridad. Para ello se ajustó la variación de potencial secundario con el tiempo a una suma de dos funciones exponenciales, donde la primera reflejara la superposición del acoplamiento electromagnético a la polarización inducida y la segunda únicamente la polarización del medio mas una componente residual.

$$V_s(t) = V_{s1} \cdot e^{-t/\tau_1} + V_{s2} \cdot e^{-t/\tau_2} + V_r$$

De esta forma se obtiene el valor del potencial secundario en el momento de desconectar el circuito de emisión sin efecto de acoplamiento electromagnético ("SKIN"), valor que nos permite calcular la polarizabilidad, d_e finida como:

$$P = \frac{V_0}{V_p}$$

donde V_0 es el potencial del campo secundario en $t = 0 +$ y V_p el potencial del campo primario.

De esta forma el parámetro P corregido en función del pulso de carga se presenta mucho más intrínseco de la roca que la propia m (DOMINGUEZ et al, 1988).

Para un medio estratificado, el valor de la polarizabilidad intrínseca P_i se convierte en polarizabilidad aparente P_a , la cual, basándonos en SEIGEL (1959) y con las modificaciones efectuadas por algunos autores (ROY y PODDAR, 1981), puede expresarse:

$$P_a(r) = \frac{\rho_a(r) (\rho_i + P_i \cdot \rho_i) - \rho_a(r) (\rho_i)}{\rho_a(r) (\rho_i)}$$

La Fig. 4 representa las curvas de ρ_a y P_a obtenidas en el SEV PI 1, y el modelo con ellas obtenido mediante interpretación automática. Obsérvese como la P_a señala espectacularmente la zona con intrusión marina, al contrario que la ρ_a .

CURVA DE RESISTIVIDAD Y POLARIZABILIDAD APARENTE

SE, E.V. y P.I. número AB. Dirección N70E

Error de aproximación: 1000

Capa	Resistividad (ohm m)	Espesor (m)	Polarizabilidad (mV/V)
1	641.01	7.6	6
2	252.10	15.5	5
3	466.04	20.0	20
4	105.92	22.0	3
5	46.49		40

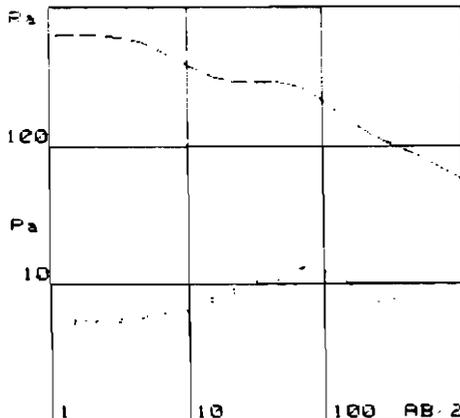


Fig. 4

c) Comparación de resultados

A partir de la comparación de los modelos resultantes se puede concluir - que el SEV presenta en estas zonas una gran determinación hasta una escasa profundidad y a partir de los cuales el SEDT le domina en resolución y penetración. El SPI, aunque presenta las mismas características que el -- SEV, reduce notablemente la ambigüedad a la hora de decidir la existencia o no de salinización del acuífero. La presencia de un mínimo de polarización tan característico (ROY y ELLIOT, 1980), así como elevados valores de constante de tiempo indican la aparición de dicho proceso.

De otro lado, dada la posibilidad de ajuste de modelos relativamente diferentes en las tres técnicas, no van a permitir la determinación exacta de la interfase agua dulce-agua salada, aunque siempre será más aproximada, por supuesto, la obtenida mediante SEDT.

MEDIDAS EN SONDEO

a) Instrumentación y toma de datos

Las medidas realizadas en el sondeo A-10, dentro de la localidad de Agua-dulce (Almería), se pueden agrupar en registros discretos y continuos. Para los primeros, se utilizó la misma instrumentación que en superficie, - aunque los dispositivos fueron diferentes. En el caso del registro discreto electromagnético en dominio de tiempo (REDT) la bobina receptora se sitúa en una sonda introducíble en el sondeo, realizándose las medidas de - 100 a 500 m, cada 10 m. El bucle emisor, concéntrico al sondeo, mantiene la misma geometría que en el SEDT.

Igualmente para el registro discreto de polarización inducida en dominio de tiempo (RPI) se utilizó un dispositivo en una sonda siguiendo una configuración tipo "guard-laterolog" diseñada por los autores para focalizar el campo eléctrico creado (Fig. 5). La toma de datos se realizó con la -- misma metodología que en superficie, con intervalos de medida cada 10 m, desde 190 a 350 m.

En lo que respecta a las medidas continuas, se utilizó un equipo MOUNT SO-PRIS 3000 NB, registrándose los parámetros físicos:

- Resistividad normal corta con AM = 0.4 m (R_{NC})
- Resistividad normal larga con AM = 1.6 m (R_{NL})
- Resistividad lateral con AO = 1.8 m (R_L)
- Resistencia monoelectrónica (R)
- Potencial Espontáneo (PE)
- Gamma natural (γ_n)
- Conductividad (σ) y Temperatura (T)
- Diámetro (ϕ)

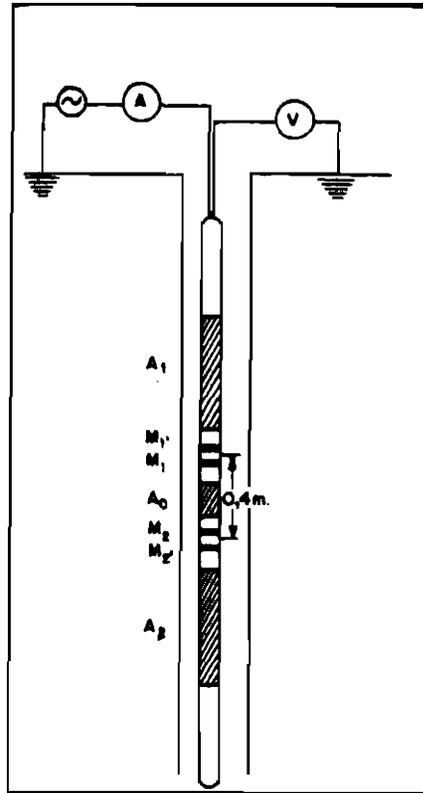


Fig. 5. Sonda de medidas discretas de polarizabilidad

Los dos últimos parámetros se registraron, tanto antes de desarrollar el sondeo, como después.

b) Tratamiento e interpretación

El tratamiento de los datos se realizó, en el caso de los registros discretos, de forma similar a los tomados en superficie, exceptuando el REDT cuyas medidas aparecen expresadas en unidades de campo magnético. En dicho parámetro se realizó un análisis de pendientes para obtener una mayor determinación en la situación de las posibles variaciones, apareciendo - en las Figuras 6 y 7, todos los registros corregidos, tanto discretos co

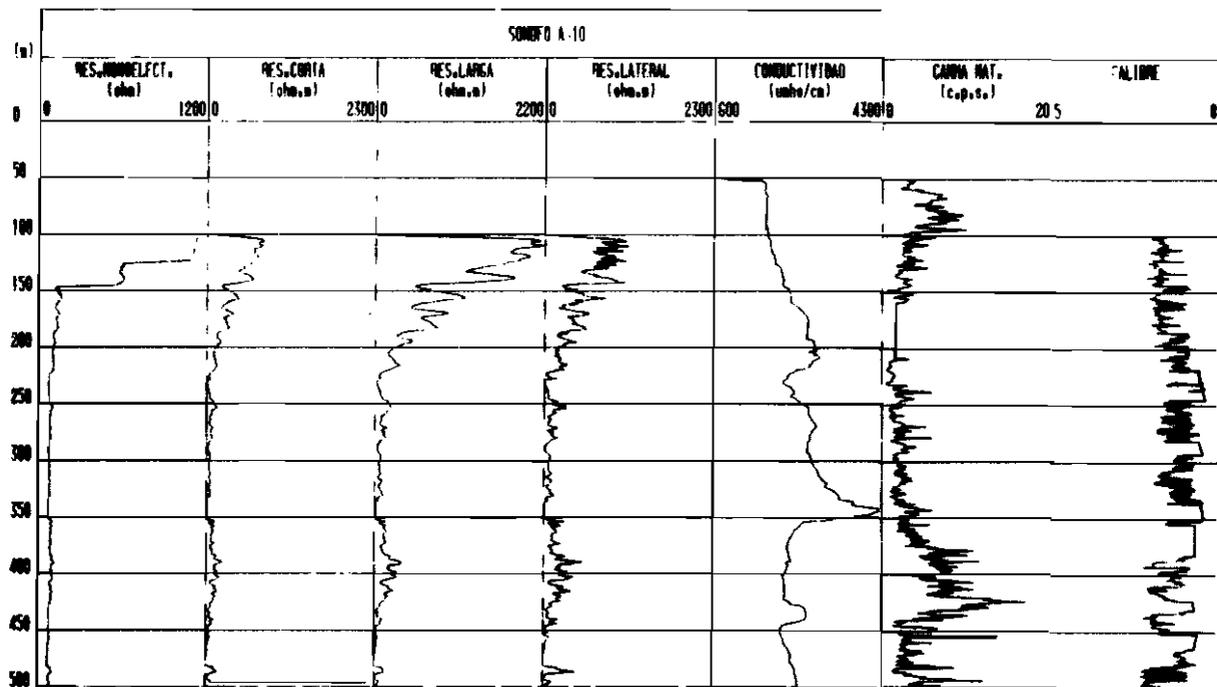


Fig. 6. Testificación geofísica en el sondeo A-10

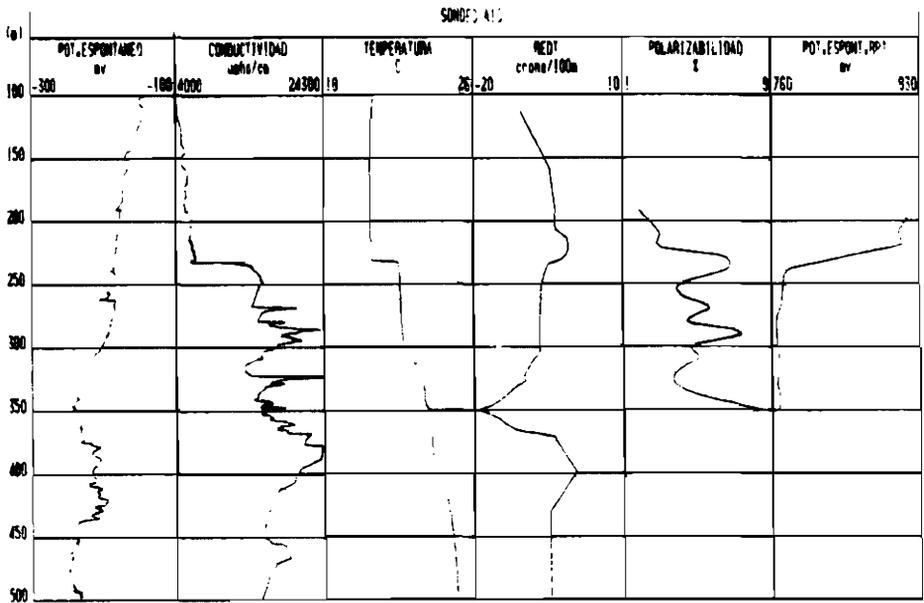


Fig. 7. Testificación geofísica en el sondeo A-10

mo contínuos, realizados en el sondeo A-10.

c) Comparación de resultados

Se puede observar la eficacia de la testificación geofísica, comprobándose como casi todos sus parámetros están afectados, de una u otra forma, - por el contraste de salinidades. Así, la relación de resistividad obtenida por dispositivos largos y cortos oscilará cerca de la unidad en la zona ya contaminada. El PE presenta desplazamientos de su base y efectos - "Sawtooth" (SEGESMAN y TIXIER, 1958) en la zona cercana a la interfase, - como consecuencia de importantes invasiones de lodo al aumentar la permeabilidad con la posible "descarbonatación" de la caliza (CUSTODIO, 1982), efecto observable también con el diámetro.

Los registros de conductividad, obtenidos con la sonda "Loreto" (NAVAS - et al, 1987), se muestran muy sensibles a los cambios de salinidad, tanto antes como después de la limpieza del sondeo, señalando las zonas de acceso referente al sondeo. En lo que respecta a la temperatura, queda demostrada la eficiencia de este parámetro para la determinación de la interfase agua dulce-agua salada en sondeo, tanto por su sensibilidad como por la carencia de mantenimiento y recalibrado que otros parámetros precisan.

Los registros discretos no resultan tan espectaculares. Así, el REDT, -- tras un tratamiento por gradiente, detecta un aumento progresivo de la -- conductividad, señalando la zona de interfase y otra entrada más profunda de agua salada. Este comportamiento es habitual cuando el sondeo corta la zona que provoca el contraste de resistividades. En lo que respecta al RPI parece ser, sobre todo, sensible a los niveles más arcillosos, presentando, en general, valores de polarizabilidad más altos.

En general, todos los registros apuntan a la situación de la interfase en 240 m, apareciendo otro posible acceso preferente de agua salada al sondeo a 340 m.

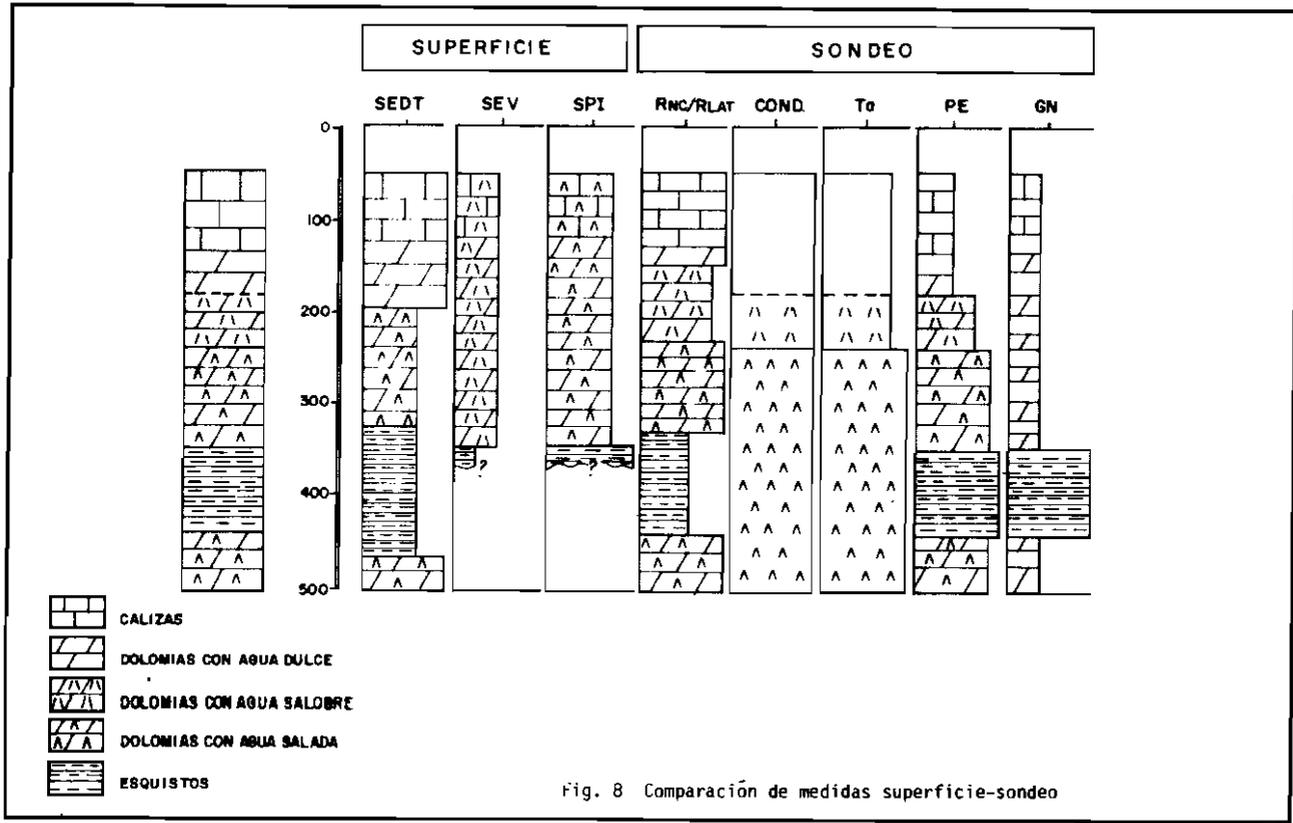
COMPARACION DE MEDIDAS SUPERFICIE-SONDEO

En la Fig. 8 se pretende reflejar la vulnerabilidad de cada una de las técnicas geofísicas utilizadas a los cambios litológicos e hidroquímicos más importantes. Para ello, y a partir de todos los datos recogidos, se ha construido una columna geológica simplificada, con la cual se comparan.

Señalaremos que para la interpretación de cada una de las técnicas se ha utilizado toda la información disponible, tanto del resto de ellas, como de datos geológicos y geofísicos previos. La finalidad era comprobar la resolución de cada parámetro en el límite de sus posibilidades de éxito.

CONCLUSIONES

En áreas donde, a pesar de las variaciones en litología y salinidad del acuífero, los contrastes de resistividades no son muy importantes se deberá, por un lado, utilizar técnicas auxiliares que faciliten los problemas de ambigüedad interpretativa (SPI, testificación geofísica). Por otra parte se intentarán establecer las leyes de variación de los parámetros físicos medidos en -



sondeo ("in situ") dada la necesidad de establecer continuos controles en -- sondeo al carecerse de exactitud en la determinación de la interfase agua - dulce-salada en estas áreas complejas desde superficie.

Se considera importante el análisis de la polarización inducida mediante el estudio de la curva de descarga, ya que permite obtener otros parámetros -- (constante de tiempo e influencia de la inducción electromagnética), relacionados también con la salinidad del acuífero.

Por último, se comprueba como parámetros sencillos y rápidos de medir, como la temperatura o el potencial espontáneo, pueden apoyar el seguimiento de -- los procesos de intrusión marina de forma cualitativa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Instituto Geológico y Minero de España -- (IGME) y a la Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras (ENADIMSA), tanto en sus delegaciones centrales como provinciales (Almería), su colaboración y ayuda en las investigaciones realizadas.

BIBLIOGRAFIA

CUSTODIO, E. (1982)

"Calidad del agua y protección de los acuíferos kársticos ante la contaminación". Reunión Monográfica sobre el karst. Larra 82.

DOMINGUEZ, S. et al. (1988)

"El Método de Polarización Inducida como técnica de apoyo al estudio de las intrusiones marinas. Aplicación a los acuíferos de Almuñecar y Castell de Ferro (Granada)". Simp. Internacional "TIAC'88" (Granada).

GHOSH, D.P. (1971)

"Inverse filter coefficient for the computation of apparent resistivity -- standard curves for horizontal stratified earth". Geoph. Prosp. 19, 769-775.

IGME (1982)

"Estudio hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería)".

NAVAS, J.J. et al. (1987)

"Aplicaciones y resultados obtenidos de la sonda de testificación "Loreto". Simp. Int. Rec. Hidr. Canarias Agua 2000.

ROY, K.K. y ELLIOT, H.M. (1980)

"Resistivity and IP survey for delineating saline water and fresh water zones". GeosExploration, 18. 145-162.

ROY, A. y PODDAR, M. (1981)

"A simple derivation of Seigel's time domain induced polarization formula".
Geoph. Prosp. 29. 432-437.

SEGESMAN, F. y TIXIER, M.P. (1959)

"Some effects of invasion on the SP curve". Jour. Petr. Tech. 19.

SEIGEL, H.O. (1959)

"Mathematical formulation and type curves for induced polarization". --
Geophysics, 24, 3; 547-565.