

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**Facultad de Ingeniería**



**El Problema de la Intrusión Salina en  
Acuíferos Costeros**

**T E S I S**

Que para obtener el título de :

**INGENIERO CIVIL**

**D r e s e n t a :**

**MANUEL ABRIL GASPAR**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



VINIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA

FACULTAD DE INGENIERIA  
EXAMENES PROFESIONALES  
60-1-117

Al Pasante señor MANUEL ABRIEL GASPAR,  
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Ing. Jaime A. Tinajero González, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero CIVIL.

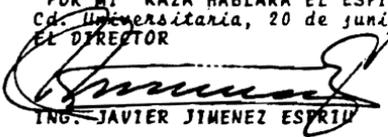
"EL PROBLEMA DE LA INTRUSION SALINA EN ACUIFEROS  
C O S T E R O S "

Introducción

- I. Conceptos generales y definiciones
- II. Planteamiento del aspecto técnico
- III. Aplicación de método geofísicos e hidrogeoquímicos para prospección
- IV. Explotación de acuíferos costeros y prevención de la intrusión salina
- V. Aplicación en el valle de Guaymas, Son.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, 20 de junio de 1979  
EL DIRECTOR

  
ING. JAVIER JIMENEZ ESPINOZA

  
SECRETARÍA

# EL PROBLEMA DE LA INTRUSION SALINA EN ACUIFEROS COSTEROS

## I N D I C E

INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
CONCEPTOS GENERALES Y DEFINICIONES	3
I.1. INTRODUCCION	
I.2. MECANISMO DE AVANCE DE LA INTRUSION SALINA Y CARACTERISTICAS FISICAS DE LA MISMA.	
I.3. TIPOS DE ACUIFEROS	
CAPITULO II	
PLANTEAMIENTO DEL ASPECTO TEORICO	15
II.1. POSICION DE LA INTERFASE SALINA EN AUSENCIA DE LA ZONA DE MEZCLA	
II.2. POSICION DE LA INTERFASE SALINA CON AGUA DUL CE Y AGUA SALADA EN MOVIMIENTO	
II.3. APLICACION DE LOS PRINCIPIOS EN ACUIFEROS -- CONFINADOS	
II.4. ZONA DE MEZCLA Y FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA - CON SALINIDAD VARIABLE	

**II.5. EFECTOS QUE INFLUYEN EN LA POSICION DE LA INTERFASE SALINA**

**CAPITULO III**

**APLICACION DE METODOS GEOFISICOS E HIDROGEOQUIMICOS PARA PROSPECCION**

58

**III.1. METODOS GEOFISICOS**

**III.2. APLICACION DE LA HIDROGEOQUIMICA**

**CAPITULO IV**

**EXPLOTACION DE ACUIFEROS COSTEROS Y PREVENCIÓN DE LA INTRUSION SALINA**

79

**IV.1. PRINCIPIOS GENERALES SOBRE LA EXPLOTACION DE ACUIFEROS COSTEROS**

**IV.2. EFECTOS PRODUCIDOS POR LA EXPLOTACION DE ACUIFEROS COSTEROS**

**VI.3. METODOS DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA INTRUSION SALINA**

**CAPITULO V**

**APLICACION EN EL VALLE DE GUAYMAS, SONORA**

108

**V.1. INTRODUCCION**

**V.2. CONSTRUCCION DE POZOS DE ESTUDIO EN LA COSTA DE GUAYMAS**

- V.3. **CONDICIONES GEHIDROLOGICAS EN LA ZONA COSTERA DEL VALLE**
  - V.4. **FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO DEL SISTEMA ACUIFERO**
  - V.5. **APLICACION DE MODELOS DE SIMULACION**
  - V.6. **RECOMENDACIONES**
- CONCLUSIONES GENERALES**

## **BIBLIOGRAFIA**

## INTRODUCCION

Dada la importante función que cumplen los acuíferos costeros - en el desarrollo de zonas áridas y semi-áridas, principalmente donde constituyen una fuente confiable de abastecimiento de agua, es necesario conocer las ventajas de su utilización, así como los --- riesgos y desventajas que supone la explotación indiscriminada de éstos.

Las ventajas de la explotación de acuíferos costeros se refieren principalmente, a la buena calidad del agua que se puede obtener; calidad por demás necesaria para el uso doméstico y muy especialmente para la agricultura. Una zona costera que cuenta con éste recurso, aunado a sus condiciones socioeconómicas particulares, puede -- impulsar su desarrollo rápidamente en todos los aspectos tanto agrícola, como turístico e industrial.

Para no ver truncadas las posibilidades de desarrollo, es necesario el uso racional del agua conforme a su disponibilidad; para ésto, - cabe tomar en cuenta las desventajas que con el tiempo trae consigo la sobreexplotación de un acuífero, refiriéndose éstas al agotamiento de las reservas del mismo, ya que no se logra establecer un equilibrio entre la recarga y extracción del agua subterránea.

Esta sobreexplotación da origen a un fenómeno característico de - los acuíferos en zonas costeras y que consiste en lo siguiente: al

verse abatidos considerablemente los niveles freáticos, el agua de mar, debido a su mayor carga hidráulica, avanza hacia la formación acuífera e invade las reservas de agua dulce; esta degradación del acuífero, provoca la contaminación de los pozos construidos para el abastecimiento de agua en la zona y la búsqueda de fuentes de abastecimiento más seguras.

Una vez contaminado el acuífero por el agua de mar, es un proceso difícil y lento el tratar de disminuir el avance de ésta, lo que hace necesario el establecimiento de reglamentos sobre la racionalización del recurso subterráneo, que informen al usuario del peligro que trae consigo una explotación desmedida del acuífero.

El objetivo de este trabajo es, básicamente, establecer los principios generales para detectar y delimitar el avance del agua salada hacia la formación acuífera, así como el tratamiento y métodos de control utilizados en tal fenómeno, denominado INTRUSION SALINA.

# CAPITULO I

## CONCEPTOS GENERALES Y DEFINICIONES

### 1.1. INTRODUCCION.

Los acuíferos costeros constituyen una importante fuente de agua dulce, especialmente en zonas áridas y semi-áridas que se encuentran colindando con el mar. En nuestro país se cuenta con una -- considerable extensión de costas a lo largo de las cuales se desarrollan diversas actividades económicas, tales como: la pesca, la agricultura, industria, etc., originándose con ello una importante extracción de agua subterránea y por consiguiente, una sustancial modificación de las relaciones entre el agua dulce y el agua salada.

Ademas de las extracciones, existen otras causas que producen modificaciones en dichas relaciones, como son la ejecución de ---- obras de ingeniería que aumentan el drenaje natural de los acuíferos o, provocan la penetración del agua de mar por ríos o canales.

La explotación de éstos acuíferos encara un gran riesgo denominado INTRUSION SALINA; en México, los acuíferos de muchas zonas -- costeras están siendo degradados por éste fenómeno, como resulta del exceso de bombeo principalmente.

Un aspecto importante en este tipo de acuíferos, es el estudio y la determinación de la posición de la "interfase salina" cuando ésta no los ha afectado nocivamente. La interfase salina es la línea que divide el agua dulce(acuífero) del agua salada(mar), variando en espesor según sean las condiciones existentes en ambos medios, formándose en el lugar una zona de mezcla de aguas. En la figura I.1 se muestra la posición natural de la interfase y de la formación acuífera, cuando no se ha presentado aún la -- afectación provocada por el fenómeno de la intrusión salina.

Dentro de los estudios necesarios para la determinación de la posición de la interfase, es esencial conocer la posición del nivel piezométrico y sus fluctuaciones con el tiempo, así como el registro de los incrementos de salinidad en los pozos.

Si se cuenta con éstos datos, puede conocerse la profundidad a la que se encuentra la interfase salina y su respectivo avance con el tiempo; de esta manera sabremos el grado de peligrosidad de la intrusión salina, planteando posteriormente las alternativas mas convenientes para su control.

## I.2. MECANISMO DE AVANCE DE LA INTRUSION SALINA Y CARACTERISTICAS FISICAS DE LA MISMA.

Para que una zona costera se vea afectada por éste fenómeno es necesario que se cumplan las dos siguientes condiciones:

\* Continuidad Hidráulica:

En muchas cuencas costeras de nuestro país existe continuidad -- hidráulica en los materiales que forman las planicies costeras, la cual se continúa hasta el mar cerca de la línea de costa, pre sentándose también capas de material permeable confinado hasta - cierta profundidad y mas allá de la costa.

Algunos acuíferos se encuentran cubiertos por lodos y otros materiales relativamente impermeables que impiden que el agua de mar los contamine, como es el caso de la costa de Hermosillo, en el estado de Sonora.

\* Inversión del gradiente hidráulico:

La inversión del gradiente hidráulico se genera cuando la carga hidráulica del mar es mayor que la del acuífero; ésto sucede si el nivel piezométrico del acuífero es abatido por diversas cau--sas, a profundidades bajo el nivel del mar.

Cuando el gradiente es hacia el mar, existe un flujo de agua hacia él y, en el caso de que dicho gradiente fuera hacia tierra - adentro se establecería un flujo de agua hacia el continente.

Existen varios mecanismos por los cuales el agua de mar puede intrusionar en un acuífero costero, los cuales están relacionados con las dos condiciones mencionadas en el párrafo anterior.

Uno de éstos mecanismos es el provocado cuando el agua subterránea es extraída por bombeo, en cantidades mayores que la recarga

POSICION NATURAL DE LA INTERFASE SALINA EN UN ACUFERO COSTERO

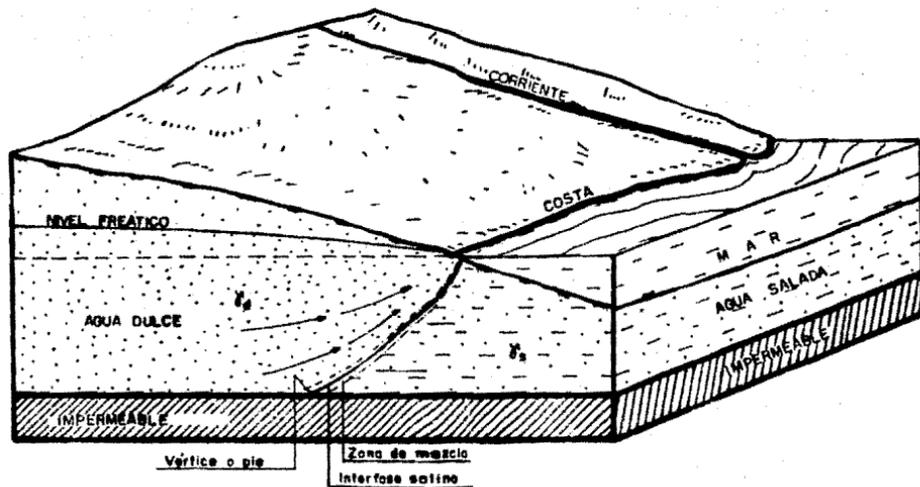


FIG. 1.1

del acuífero, de tal manera que esto genera la inversión del gra diente provocando que el flujo de la intrusión salina avance hacia tierra adentro, ocupando primero las zonas costeras y posteriormente la zona de explotación del valle.

### 1.3. TIPOS DE ACUIFEROS (clasificación)

Ya que el presente trabajo está enfocado al estudio de las forma ciones geológicas que pueden proporcionar agua en cantidades suficientes para satisfacer las necesidades humanas y muy especial mente a aquellas situadas en zonas costeras, a continuación se hace una clasificación de ellas y se mencionan algunos paráme--- tros esenciales de las mismas.

En la Hidrología subterránea se denomina acuífero a aquel estra to o formación geológica que permitiendo la circulación de agua por sus poros y grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para sus necesidades. La idea de un aprovechamiento económico del agua contenida en un acuífero sugiere el hecho de que, en realidad formaciones geoló- gicas que pueden considerarse como totalmente impermeables no -- existen, puesto que aún una capa de pizarras puede poseer un gra do de alteración superficial que permita una pequeña circulación de agua subterránea y por lo tanto constituya un acuífero, tal - vez muy pobre, pero que al no existir otra fuente de abastecimi-

ento, sea importante para la zona. Como ejemplo se pueden citar algunas areniscas poco cementadas, algunos tipos de rocas volcánicas o gravas y arenas con alto contenido de arcillas.

Por el contrario, un acuicludo se define como aquella formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación.

El término acuitardo hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que conteniendo apreciables cantidades de agua, la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptas para el establecimiento de captaciones, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos. Por ejemplo, una capa de arcillas limosas o arenosas puede comportarse como un acuitardo si está dispuesto encima o debajo de un acuífero más importante, al cual puede recargar e incluso recibir agua del mismo.

Finalmente se denomina acuífugo a aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como es el caso de un macizo granítico no alterado o rocas metamórficas sin meteorización ni fracturación.

No todas las formaciones geológicas o rocas en general, poseen la misma facilidad para transmitir y proporcionar agua.

Los acuíferos que se presentan con mayor frecuencia están formados por depósitos no consolidados de materiales sueltos, tales como la arena, gravas, mezclas de ambos, etc., pudiendo ser su origen geológico muy distinto: fluvial, como los que forman los materiales aluviales de los ríos o las terrazas de los mismos; deltaico, si se trata de depósitos acumulados en la desembocadura de los ríos; sedimentario, ocasionado por la acumulación de partículas transportadas por gravedad, viento hielo, etc.

Estas formaciones si se explotan convenientemente pueden dar notables caudales de agua, debido a sus buenas condiciones de recarga, a su permeabilidad y a la poca profundidad de su nivel piezométrico.

Entre las rocas sedimentarias consolidadas ( que encierran el 95% de las aguas subterráneas del globo terrestre) la más importante es la caliza, roca formada casi exclusivamente por carbonato de calcio, que varía enormemente en densidad, porosidad y permeabilidad, de acuerdo con el ambiente sedimentario existente en su formación y el desarrollo posterior de zonas permeables por disolución del carbonato, que pueden llegar a formar verdaderos ríos subterráneos. Sin embargo, éstas rocas si no están karstificadas (disolución del carbonato de calcio), suelen ser poco permeables.

En las rocas volcánicas es difícil establecer una clasificación de las mismas respecto a si constituyen o no buenos acuíferos, --

puesto que ésto depende de sus características físicas y químicas, grado de alteración, edad, etc. En este tipo de rocas si se presentan grandes intersticios interconectados, pueden constituir -- excelentes acuíferos, pero si es densa y compacta como algunas -- riolitas y basaltos, sus propiedades geohidrológicas serán muy pocas.

En las rocas ígneas y metamórficas las únicas posibilidades de -- formar buenos acuíferos, residen en la zona alterada superficial o en las regiones muy fracturadas por fallas y diaclasas que permiten una apreciable circulación de agua.

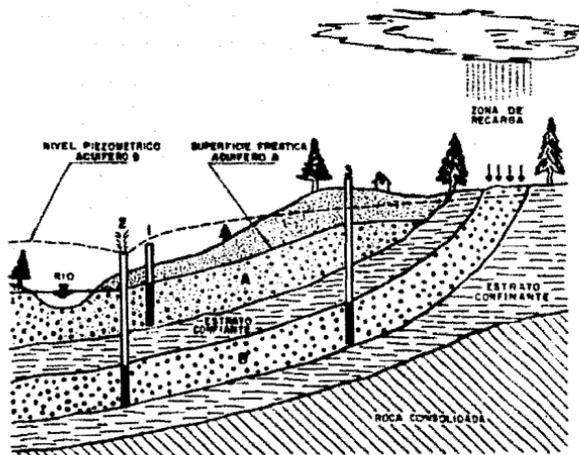
La clasificación que hasta aquí se ha hecho, ha sido respecto a -- sus características litológicas; una clasificación más importante es la que agrupa los acuíferos de acuerdo a la presión hidrostática del agua contenida en los mismos y que es la siguiente:

Se denomina acuífero libre no confinados o freáticos, a aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua que contienen y que se encuentra en contacto directo con la atmósfera, estando sujeta a la presión de ésta última. En la figura 1.2 el acuífero A representa un acuífero libre, cuya superficie piezométrica esta representada en planta por los niveles de los pozos perforados -- en él, que lo atraviesan parcial o totalmente. A dicha superficie se le denomina real o freática.

Por el contrario, en los acuíferos confinados o artesianos, el agua de los mismos está sometida a una cierta presión superior a la atmosférica que ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente. Por ello, durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición. De acuerdo con éste y la posición del nivel topográfico del brocal del pozo, se consideran pozos surgentes a aquellos en los cuales el nivel piezométrico está situado a una cota superior al brocal y, simplemente artesianos a los pozos en el mismo acuífero pero cuyo nivel piezométrico quede por debajo de la superficie topográfica en los alrededores del mismo (fig 1.2, acuífero B, pozos 2 y 3).

Una variedad de los acuíferos confinados la constituyen los acuíferos semiconfinados, en los que el basamento (parte inferior) y el techo (parte superior) entre los que se encuentran no sean totalmente impermeables sino un acuitardo, es decir un material que permita una filtración vertical del agua muy lenta que alimente al acuífero principal a partir de un acuífero localizado encima o debajo del mismo.

Considerando los acuíferos mencionados como sistemas físicos que poseen un cierto funcionamiento regulado por la recarga, extracciones, etc., se entiende que deben poseer unas ciertas caracterís



**CLASIFICACION DE ACUIFEROS DE ACUERDO A LA PRESION HIDROSTATICA EXISTENTE EN ELLOS**

- A Acuífero libre
- B Acuífero confinado
- 1 Pozo libre y freatico
- 2 Pozo artesiano surgente
- 3 Pozo artesiano

FIG. I.2

TESIS PROFESIONAL

F. I. unom.

M. Abril G.

ticas fundamentales, de las cuales depende aquel.

Estas características o parámetros permiten definir y en algunos casos predecir, el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a unas determinadas acciones exteriores. Dichos parámetros se enumeran a continuación:

\* Porosidad: esta expresada por la relación entre el volumen de su parte vacía ocupada por aire o agua y su volumen total.

\* Permeabilidad: éste parámetro esta representado por el coeficiente "  $k$  " y se define como el caudal que pasa por una sección unitaria del acuífero bajo un gradiente hidráulico también unitario, a una temperatura fija o determinada.

\* Transmisividad: concepto introducido por Theis, que se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno de ancho unitario y de altura igual al espesor de manto permeable saturado, bajo un gradiente unitario a una temperatura fija o determinada. Se expresa con el término "  $T = kb$  ", siendo  $k$  el coeficiente de permeabilidad y  $b$  el espesor del acuífero.

\* Coefficiente de Almacenamiento: ésta característica se representa con la letra  $S$ , definido como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a

la unidad y altura igual a la del acuffero saturado, si se por  
duce un descenso unitario del nivel piezométrico o de la carga  
hidráulica.

## CAPITULO II

### PLANTEAMIENTO DEL ASPECTO TEORICO

#### II.1. POSICION DE LA INTERFASE SALINA EN AUSENCIA DE ZONA DE --- MEZCLA.

a).- Principio de Ghyben-Herzberg.

Los primeros estudios sobre la relación agua dulce-agua salada en zonas costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon --- Ghyben y Herzberg en el año de 1889.

Este principio esta basado en las siguientes hipótesis:

- \* El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por lo tan to el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- \* No existe flujo de agua salada.
- \* La interfase salina es un plano, no existiendo zona de mezcla.

En éstas condiciones en un punto cualquiera A de la interfase - (fig.II.1), debe existir un equilibrio entre la presión del agua dulce y la presión del agua salada. De la ecuación que proporciona la hidrostática sobre la presión de un punto en un líquido en reposo,  $p = \delta \cdot z$  y estableciendo dicho equilibrio entre las dos --- aguas tendremos que:

$$(h_d + z) \delta_d = z \cdot \delta_s$$

siendo:

$hd$ , cota sobre el nivel del mar del agua dulce en la vertical del punto A .

$z$ , profundidad bajo el nivel del mar del punto A .

$\gamma_d$ , peso específico del agua dulce,  $1000 \text{ gr/cm}^3$

$\gamma_s$ , peso específico del agua salada, que varía generalmente entre  $1020$  y  $1030 \text{ gr/cm}^3$ , siendo un valor promedio el de  $1025 \text{ gr/cm}^3$ .

de ésta manera:

$$z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot hd = hd/\beta$$

siendo:

$$1/\beta = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d}$$

$1/\beta$ , varía entre 50 y 33 siendo un valor mas frecuentemente utilizado 40, ya que si utilizamos  $\gamma_s = 1025 \text{ gr/cm}^3$  y un valor de  $\gamma_d$  igual a  $1000 \text{ gr/cm}^3$  tendríamos que  $1/\beta = 40$ , siendo  $z = 40 \cdot hd$ .

Esto nos indica que la interfase salina se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar de 40 veces la cota del agua dulce sobre aquel nivel en el punto A, o sea, por cada metro que se eleve el nivel piezométrico del acuífero sobre el nivel del mar, existirán 40 metros de agua dulce bajo el mismo nivel de referencia.

La máxima penetración de la cuña de agua salada esta limitada por el fondo impermeable del acuífero (punto B de la fig II.1), que se produce cuando:

$$hd = z \cdot \beta$$

siendo  $z_0$  la profundidad de la base del acuífero bajo el nivel medio del mar.

b).- Corrección de Hubbert al principio de Ghyben-Herzberg.

La ley de Ghyben-Herzberg, describe correctamente la posición de la interfase salina si el ancho de la zona de mezcla es pequeño - comparado con el espesor del acuífero y si el flujo de agua dulce es prácticamente horizontal. Sin embargo, aún en ausencia de zona de mezcla dicha ley no describe correctamente la posición de la interfase cerca del afloramiento del acuífero en el mar, ya que - de existir un gradiente piezométrico en el agua dulce, debe haber circulación de ésta con velocidades crecientes y aparición de componentes verticales en la zona de la cuña de agua salada, debido a la cada vez menor sección de salida (fig II.2), la cual debe hacerse por una longitud finita y no por un punto.

El consiguiente aumento de velocidad del agua dulce en las proximidades de la costa provoca un aumento del gradiente, de modo que el nivel del agua en el acuífero tiene una cota superior a la que se obtendría al suponer que el flujo es completamente horizontal. Esto explica la existencia de afloramientos de agua dulce en playas y lugares costeros que se encuentran a una elevación ligeramente mayor a la del mar.

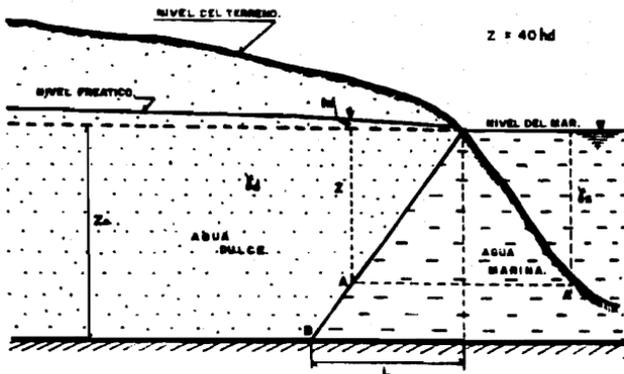


FIG. II.1

Equilibrio del agua dulce y el agua salada en una zona costera de acuerdo al principio de Ghyben-Herzberg.

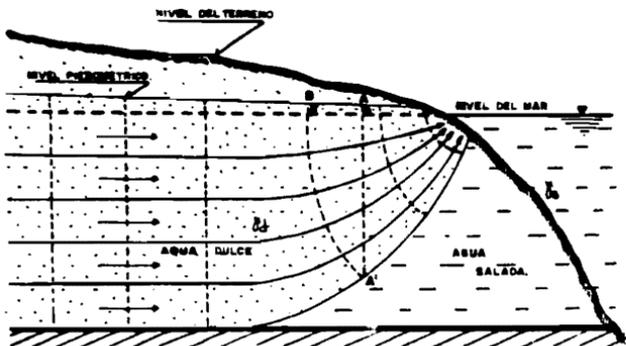


FIG. II.2

Red de flujo en un acuífero costero sin zona de mezcla.

TESIS PROFESIONAL

F. I. unom.

M. Abril 6.

Suponiendo que no existe zona de mezcla de aguas y que el agua salada esté estacionaria, es posible calcular la posición de la interfase en un punto, aplicando la ley de Ghyben-Herzberg, si se toma como cota del agua dulce para el cálculo, la que corresponde al potencial sobre ella, o sea, si se toma para el cálculo de la profundidad de la interfase en A, la cota en B, situado en la línea equipotencial que pasa por A'; siendo ésta la llamada corrección de Hubbert (fig II.2).

Dado que el potencial de la interfase sobre la línea A'B,  $h'$ , es mayor que la altura sobre el nivel del mar de la superficie freática en su vertical ( $h$ , fig II.2), se obtienen profundidades mayores de la interfase que las calculadas con la simple aplicación de la ley de Ghyben-Herzberg sin la corrección de Hubbert. Sin embargo, en el caso de que existiera una fuerte recarga vertical podría suceder que el potencial en la interfase fuese menor que el que corresponde al nivel del agua en el punto A (fig II.3), por lo que la profundidad calculada de la interfase sería menor que la que obtendríamos al aplicar tan solo la ley de Ghyben-Herzberg.

### c).- Inclinación de la Interfase Salina.

Consideremos la fig II.4 como una sección vertical según el sentido del flujo. La condición de que la interfase sea estacionaria, exige que la velocidad del agua dulce " $v_d$ " y del agua salada " $v_s$ "

junto a la interfase sean paralelas a ella.

Según la Ley de Darcy tenemos que:

$$v_d = -k_d \frac{dh_d}{ds} \dots\dots\dots (ec.II.1)$$

$$v_s = -k_s \frac{dh_s}{ds} \dots\dots\dots (ec.II.2)$$

siendo  $h_d$  y  $h_s$ , los potenciales sobre la interfase;  $k_d$  y  $k_s$ , las permeabilidades del terreno para el agua dulce y el agua salada respectivamente.

Como en cualquier punto de la interfase la presión de ambas aguas debe equilibrarse, entonces:

$$(z + h_d) \gamma_d = (z + h_s) \gamma_s \dots\dots\dots (ec.II.3)$$

o sea:

$$h_d = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot z + \frac{\gamma_s}{\gamma_d} h_s \dots\dots\dots (ec.II.4)$$

que derivando con respecto a  $s$  :

$$\frac{dh_d}{ds} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot \frac{dz}{ds} + \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \cdot \frac{dh_s}{ds} \dots\dots\dots (ec.II.5)$$

sustituyendo la ec.II.1 y la ec.II.2 en la ec.II.5, tendremos que:

$$\frac{v_d}{k_d} - \frac{v_s}{k_s} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_d} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot \frac{dz}{ds} \dots\dots\dots (ec.II.6)$$

Si el agua dulce y el agua salada están en reposo ( $v_d = v_s = 0$ ) entonces  $dz/ds = 0$ , o sea que la interfase salina debe ser horizontal.

Si el agua dulce está en movimiento y el agua salada en reposo ( $v_s = 0$ ), entonces:

$$v_d = k_d \cdot \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot \frac{dz}{ds}$$

o sea:

$$\frac{dz}{ds} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{dh_d}{ds}$$

que es la fórmula diferencial de la ley de Ghyben-Herzberg.

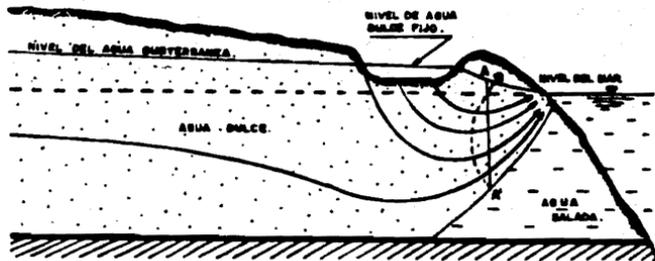
La inclinación de la interfase salina está dada por la ecuación II.6 o las que de ella se derivan por:

$$\frac{dz}{ds} = \text{sen } \alpha'$$

Si  $dh_d/ds$  la tomamos igual a  $\text{sen } \alpha$  (fig.II.4) se tiene que:

$$\frac{\text{sen } \alpha'}{\text{sen } \alpha} = \frac{1}{\beta}$$

$\alpha$  y  $\alpha'$ , son respectivamente las pendientes del nivel freático o piezométrico y de la interfase, en puntos correspondientes a una misma equipotencial del agua dulce.



Recarga de un acuífero en las proximidades de la costa.

FIG. II. 3

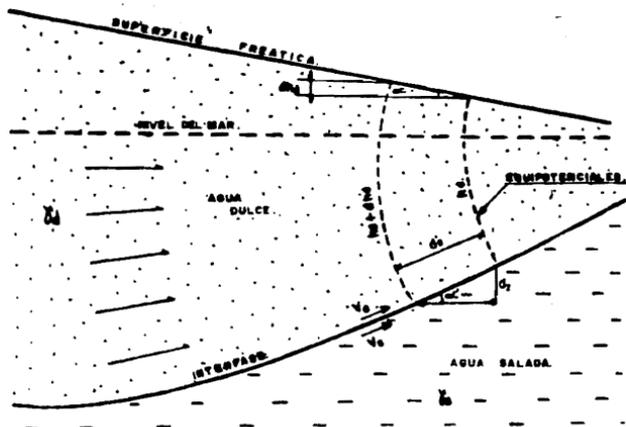


FIG. II. 4

Esquema para determinar la ubicación de la interfase.

TESIS PROFESIONAL

F. I. UNOM. M. Abril 6.

## II.2. POSICION DE LA INTERFASE SALINA CON AGUA DULCE Y AGUA SALADA EN MOVIMIENTO.

### a).- Justificación de la existencia de una interfase dinámica.

En la zona de contacto entre el agua dulce y el agua salada se tiene una difusión de la una en la otra, a la que se agrega la dispersión hidrodinámica originada por el movimiento del agua -- normalmente y a lo largo de la interfase. Esta zona de mezcla se encuentra en movimiento con velocidad paralela al plano central provocando un transporte del agua salobre del acuífero hacia el mar; dicho movimiento limita el espesor de la zona, que disminuye conforme aumenta el flujo y menores son los movimientos en la interfase. Si no existiese tal flujo de agua hacia el mar, el ancho de la zona de mezcla aunque de manera muy lenta, crecería indefinidamente con el tiempo.

La posición y el movimiento del agua en la zona de mezcla, es inducida por el movimiento del agua dulce; éste mismo movimiento provoca un flujo de agua salada hacia el interior de la formación acuífera (fig.II.5), dicho flujo para poder llevarse a cabo requiere de un gradiente y es por eso que el nivel piezométrico -- del agua salada en el terreno, es ligeramente menor que el del agua libre del mar. El movimiento de las aguas en las proximidades de la interfase, es tanto más rápido cuanto más próximo se -

este del área de afloramiento; por el contrario, cerca del pie de la cuña de agua salada el arrastre es menor.

Son muchas las evidencias de la existencia de la zona de mezcla y su movimiento, no siendo extraño encontrar en las costas afloramientos de agua salobre a elevaciones ligeramente superiores al nivel medio del mar, que ponen de manifiesto el movimiento de dicha zona.

Si existe intrusión salina, habrá un mayor movimiento de agua salada hacia el interior de la formación y por lo tanto el valor de  $h_s$  (potencial del agua salada sobre la interfase) es aún más negativo, la interfase es más profunda y más inclinada y el espesor de la zona de mezcla es menor. Si por el contrario, es el agua dulce la que desplaza el agua salada, el movimiento del agua de mar hacia éste, provoca que  $h_s$  sea positivo y la interfase salina más alta, siendo su pendiente mucho menor y el ancho de la zona de mezcla considerable, no solo por el movimiento sino también por el menor lavado de sales.

Este lavado de sales, que no es más que el movimiento del agua salada en las proximidades de la interfase, tiene influencia en la inflexión del pie o vértice de la cuña salina. En el caso de existir una interfase salina estacionaria, dicho vértice tendería a ser paralelo al fondo impermeable del acuífero ya que no existiría movimiento o lavado de sales; por el contrario, en el

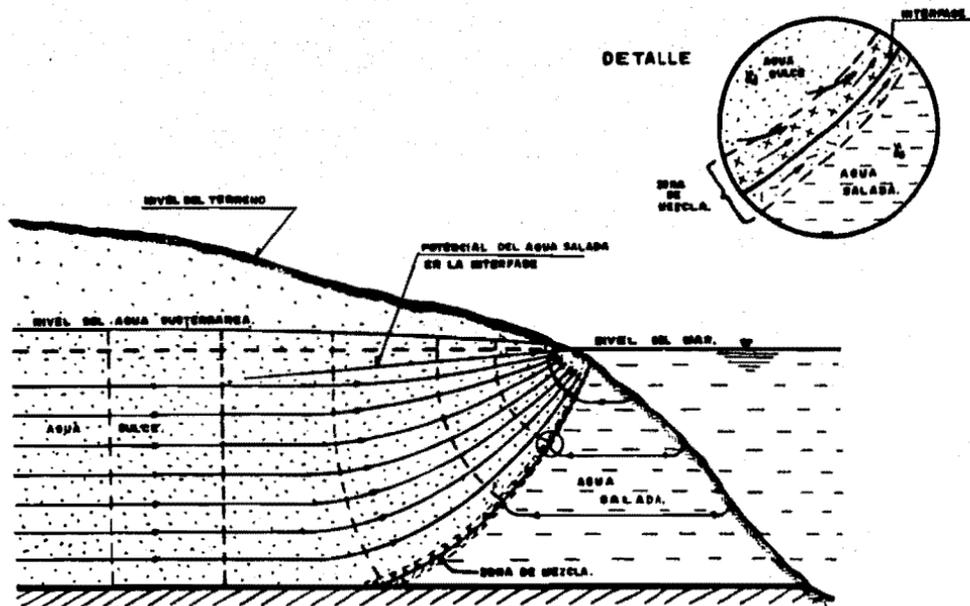


FIG. II. 5

FLUJO DEL AGUA DULCE Y DEL AGUA SALADA EN LA ZONA DE CONTACTO DE UN ACUÍFERO COSTERO.

TESIS PROFESIONAL

F. I. unom.

M. Abril 8

caso de una interfase dinámica, el pie de la cuña sería perpendicular a la base del acuífero debido al movimiento y al lavado de sales existente en la zona de mezcla.

b).- Fórmula de Hubbert

Si a pesar de la existencia de la zona de mezcla, la transición de la zona de agua salada a la de agua dulce es muy rápida, no se comete mucho error al suponer una interfase de espesor nulo. Para la obtención de la fórmula de Hubbert se parte de lo siguiente:

Suponiendo que en cierto lugar se tienen dos piezómetros dentro de un acuífero, uno abierto justamente por encima de la interfase y lleno de agua dulce y el otro abierto justo por debajo de la interfase y lleno de agua salada. En el primero (piezómetro A de la fig.II.6) se observa un nivel de agua dulce  $h_d$  sobre el nivel del mar, en el segundo un nivel de agua salada  $h_s$ , generalmente negativo. La profundidad  $z$  de la interfase salina estará dada por el equilibrio de ambas columnas de agua.

Independientemente del signo que puede adoptar el nivel del agua salada, el equilibrio está dado por:

$$(z + h_d) \gamma_d = (z + h_s) \gamma_s \quad \dots\dots\dots (\text{ec.II.7})$$

de donde:

$$z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h_d - \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} h_s = \frac{1}{\beta} h_d - (1 + 1/\beta) h_s \quad (\text{ec.II.8})$$

que es la llamada fórmula de Hubbert.

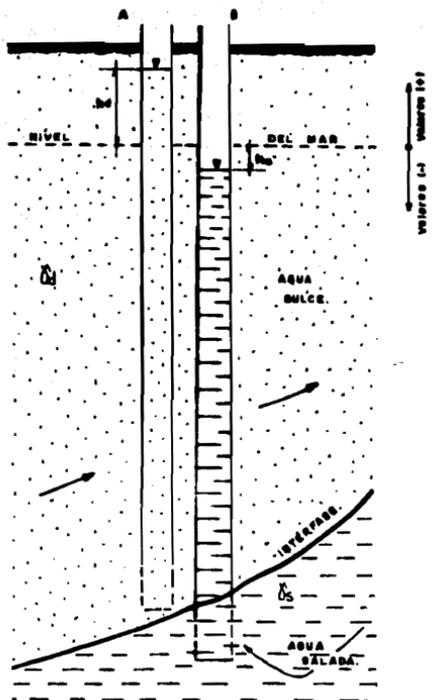
El primer miembro corresponde a la ley de Ghyben-Herzberg y el segundo es la corrección a realizar a causa del flujo de agua salada.

Como  $h_s$  es generalmente negativo, la profundidad  $z$  de la interfase calculada de ésta manera es mayor que la que se obtendría con la simple aplicación de la fórmula de Ghyben-Herzberg.

Si se conoce el potencial de agua dulce y de agua salada en una misma vertical en puntos algo separados, puede admitirse que -- esos potenciales serán similares a los existentes en la interfase, pudiéndose calcular el valor de  $z$  aproximadamente en el supuesto de que la zona de mezcla sea poco espesa.

Un ejemplo comparativo de la aplicación de la fórmula de Hubbert y la de Ghyben-Herzberg se da a continuación:

\* En un acuífero de una zona costera en el que se está produciendo intrusión salina se dispone de dos piezómetros muy próximos, uno abierto en el agua dulce a una profundidad de 100 m y el otro abierto en una zona de agua salada de densidad  $1018 \text{ gr/cm}^3$  a una profundidad de 160 m, estando ambos llenos con el agua existente en sus zonas ranuradas. Los niveles del agua con respecto al nivel medio del mar son respectivamente 0.81 m y -1.80 m. Los datos de perforación indican que la interfase salina se sitúa a una profundidad de 140 m aproximadamente.



ESQUEMA PARA EL CALCULO DE LA FORMULA DE HUBBERT:

FIG. II. 6

Tenemos que:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{.1}{1018 - 1000} = 55.60$$

$$z = (55.60 \cdot 0.81) + (56.60 \cdot 1.8) \quad ; \quad z = 146.90 \text{ m}$$

Si se hubiese calculado  $z$  únicamente con la fórmula de Ghyben-Herzberg, tendríamos que :

$$z = \frac{1}{\beta} hd = 55.60 (0.81) = 45.00 \text{ m}$$

que es un valor notablemente diferente.

El valor encontrado experimentalmente difiere solo ligeramente del calculado con la fórmula de Hubbert; no obstante ésta gran diferencia de valores de  $z$  solo se presenta cerca de la costa. Cuando se trata de zonas alejadas de la costa, si la zona de mezcla es reducida y el acuífero es razonablemente homogéneo la ley de Ghyben-Herzberg da resultados satisfactorios.

### II.3. APLICACION DE LOS PRINCIPIOS EN ACUIFEROS CONFINADOS.

a).- Acuíferos confinados.

La ley de Ghyben-Herzberg y las demás consideraciones hechas anteriormente son válidas para acuíferos confinados y semiconfinados, sin más que considerar en los cálculos niveles piezométricos en vez de niveles freáticos.

En la fig.II.7 se representan varios casos posibles; en el caso A el potencial del agua dulce en la zona de contacto con el mar es suficiente para contrarrestar el peso de las columnas de agua salina sobre la primera, de ésta manera se produce el escape de agua dulce al mar formándose una pequeña cuña de agua salada.

Si  $z$  es la profundidad de la parte más alta de la zona de contacto con el mar, para que se pueda establecer el flujo de agua dulce es preciso que el nivel piezométrico de esa agua en la zona de contacto  $hd$  valga:

$$(hd + z) \gamma_d \geq z \cdot \gamma_s$$

$$hd \geq \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot z = \beta \cdot z$$

Si el valor es menor (valor de  $hd$ ) no podrá producirse salida de agua dulce al mar (caso C de la fig.II.7), por lo que la interfase salina tiende a ser horizontal y la zona de mezcla será espesa por no existir expulsión de agua salobre, el acuífero se encuentra lleno y la posible recarga es rechazada o bien se fuga a través del acuífero en zonas poco profundas, manteniendo así una zona superior de agua dulce en movimiento.

Si  $z'$  es la profundidad del punto más bajo de la zona de contacto y se cumple que :

$$hd \geq \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \cdot z' = \beta \cdot z'$$

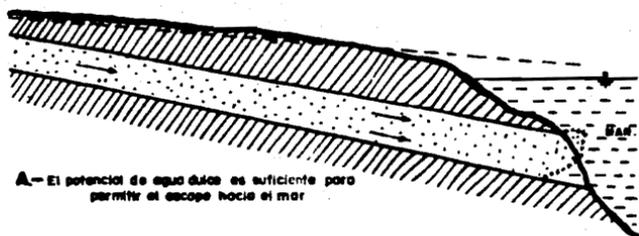
entonces no podrá formarse cuña de agua salada y el acuífero actuará como una tubería inyectando agua dulce a presión dentro -- del mar (caso B de la fig.II.7).

A veces el contacto entre un acuífero y el mar no es homogéneo y el agua tiende a escaparse por lugares preferentes, en cantidad y con presión suficiente como para ser su movimiento perceptible, originando surgencias submarinas de agua dulce, algunas de ellas muy conocidas por pescadores y marinos.

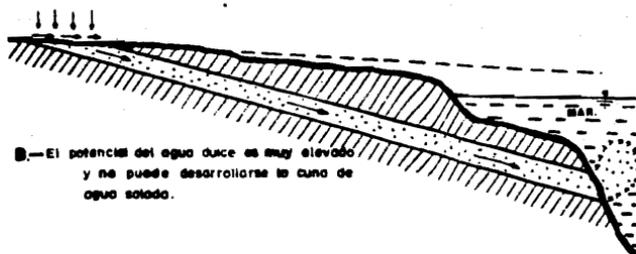
En los casos A y B puede verse que el acuífero con agua dulce se extiende bajo el mar, e incluso puede suceder también en el caso C, si en la parte alta del acuífero se producen pequeñas fugas - que mantengan un mínimo de renovación.

En el caso c, si el techo del acuífero presentase grietas o estu viese perforado, pueden aparecer afloramientos de agua salobre - si se sitúan aquellas sobre la zona de mezcla.

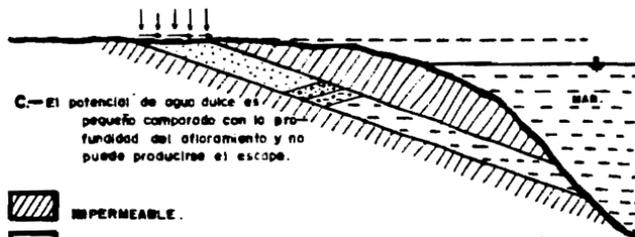
Si existen varios acuíferos superpuestos, cada uno de ellos con una altura piezométrica diferente (fig.II.8), se establecen dife rentes estados de equilibrio y en la costa puede encontrarse --- acuíferos de agua dulce y acuíferos de agua salada o salobre en la misma vertical.



A.—El potencial de agua dulce es suficiente para permitir el escape hacia el mar



B.—El potencial del agua dulce es muy elevado y no puede desarrollarse la cuna de agua salada.



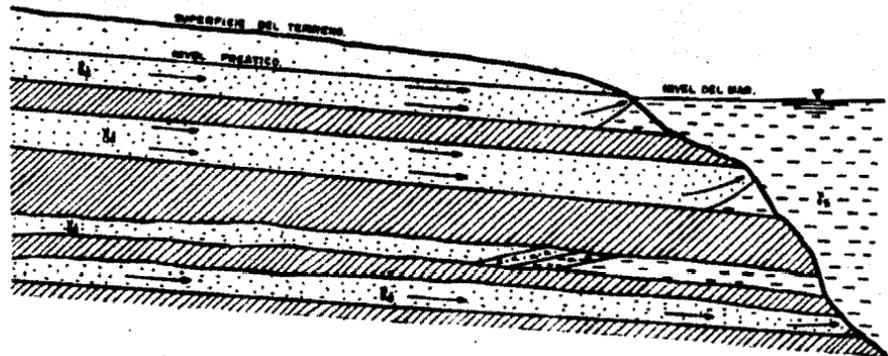
C.—El potencial de agua dulce es pequeño comparado con la profundidad del afloramiento y no puede producirse el escape.

-  IMPERMEABLE.
-  ACUIFERO CON AGUA DULCE,  $\delta_1$
-  AGUA SALADA Y ACUIFERO CON AGUA SALADA,  $\delta_2$
-  ZONA DE MEZCLA DE AGUAS
-  ---- NIVEL PIEZOMETRICO

FIG. II. 7.

TESIS PROFESIONAL

F. I. univ.    III. Abril 6.



 IMPERMEABLE O SEMI IMPERMEABLE

 ACUIFERO CON AGUA SALADA O AGUA DE MAR.

 ACUIFERO CON AGUA DULCE.

 ZONA DE MEZCLAS DE AGUA.

Superposición de varias acuíferas costeras.

FIG. II. 8

TESIS PROFESIONAL

F. I. unam. 22. Abril 8.

b).- Acuíferos semiconfinados.

En éstos acuíferos, todo o parte del escape de agua dulce al mar puede hacerse a través del techo semipermeable. La fig.II.9 nos muestra el funcionamiento hidráulico supuesto de un perfil, antes de iniciarse el bombeo. El agua del acuífero profundo circula hacia el mar a través del techo semiconfinante, aflorando directamente o bien a través del acuífero superior, después de desplazar al agua contenida en el nivel semipermeable. Bastará que el potencial del agua dulce en la superficie submarina de los limos o su recubrimiento sea suficiente para permitir la salida del agua.

Es posible que las arcillas y los limos de los acuitardos puedan actuar como membrana osmótica y faciliten la salida del agua dulce; en caso de existir intrusión salina actuarían en sentido contrario, limitando la penetración del agua salada. En realidad las formaciones semipermeables distan mucho de ser una membrana osmótica y solo es de esperar que el fenómeno se desarrolle con débil eficacia.

En muchos acuíferos reales existe una alternancia de capas permeables y semipermeables, estableciéndose en cada una su propia interfase salina de acuerdo con los niveles piezométricos que se presenten.

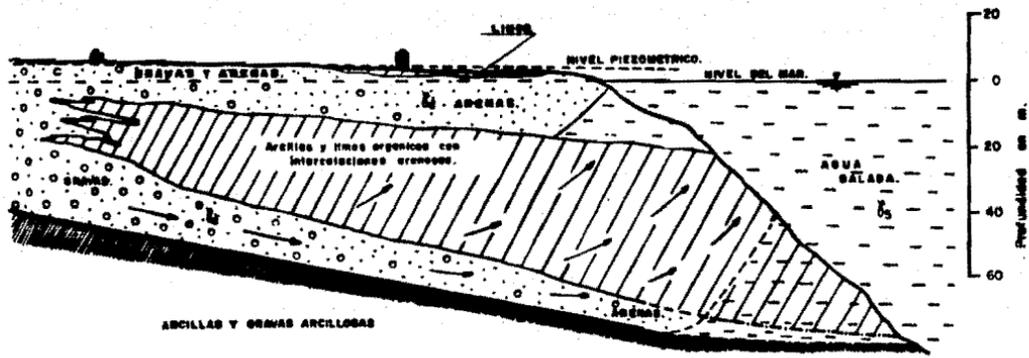


FIG. II. 9

Perfil perpendicular al mar que muestra las condiciones hidráulicas de un acuífero semiconfinado (profundo) antes de iniciar el bombeo.

#### II.4. ZONA DE MEZCLA Y FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA CON SALINIDAD - VARIABLE.

a).- Potencial de agua puntual, agua dulce y agua ambiental.

El potencial de agua puntual es aquel que se define como el nivel de agua en un piezómetro, lleno de la misma agua existente en su zona ranurada. Este potencial es el que se mide generalmente en pozos y piezómetros, salvo que por diversas causas se encuentre el tubo lleno de agua diferente.

Cometeríamos un error si quisieramos establecer la dirección y el sentido del flujo de agua, con los niveles piezométricos medidos en pozos y piezómetros con agua de diferente salinidad; éste --- error puede ser significativo si las diferencias de densidad del agua son notables, por lo que conviene transformar todas las mediciones hechas en las que se hubiesen obtenido si los tubos estuviesen llenos de agua de la misma salinidad y temperatura.

Para la obtención del potencial de agua dulce tenemos lo siguiente: si se cuenta con un piezómetro ranurado a una profundidad "z" bajo el nivel del mar en agua salada y lleno de un agua de densidad puntual  $\delta_p$ , el correspondiente potencial de agua dulce se deduce del equilibrio de presiones en la zona ranurada. La convención de signos que se toma h y z se miden a partir del nivel medio del mar, siendo h positivo hacia arriba y z positivo hacia abajo.

estableciendo el equilibrio tenemos que:

$$(z + h_d) \delta_d = (z + h_p) \delta_p$$

$$h_d = \frac{\delta_p - \delta_d}{\delta_d} \cdot z + \frac{\delta_p}{\delta_d} h_p \quad \dots\dots\dots (\text{ec.II.9})$$

siendo  $h_d$  la cota del agua dulce correspondiente al potencial de agua dulce y  $h_p$  la cota medida del agua salada o mezclada en el tubo (potencial puntual de agua salada).

Es importante hacer notar que en la zona de agua dulce el potencial de agua dulce es igual al potencial puntual, en cambio en la zona de agua salada, aún siendo estacionaria, el potencial de -- agua dulce crece de forma importante al aumentar la profundidad del piezómetro, ya que cada vez se sustituye una columna de agua salada por agua dulce.

El potencial de agua ambiental o local, ha, se puede determinar midiendo el nivel del agua en un piezómetro, si éste se encuentra lleno de agua de diferentes densidades de modo que su distribución sea parecida a la existente en el terreno.

Supongamos que la zona de difusión (mezcla) se extiende entre --  $z_1$  y  $z_2$ , siendo agua salada sin mezcla la que se extiende entre las profundidades  $z_2$  y  $z_3$  ( $z_3$  es la profundidad del piezómetro) y agua dulce por encima de  $z_1$ . El balance de presiones -- con el agua salada de potencial  $h_s$  respecto al nivel del mar en  $z_3$ , establece que si ha es el potencial ambiental (fig.II.10) --

entonces:

$$(h_s + z_3) \delta_s = (h_a + z_1) \delta_d + \int_{z_1}^{z_2} \delta(l) dl + (z_3 - z_2) \delta_s$$

de la que puede deducirse  $h_s$ .

$\delta(l)$ , es el peso específico del agua mezcla a profundidad  $l$  y es función de " $z$ ".

Si  $z_1'$  es un punto dentro del agua dulce (entre  $h_a$  y  $z_1$ ) y  $h_p$  es el potencial puntual a profundidad  $z$ :

$$(h_p + z) \delta_p = (h_a + z_1) \delta_d + \int_{z_1'}^z \delta(l) dl$$

El nivel del agua ambiental no tiene porque coincidir con el nivel freático, pudiendo ser algo superior o menor; solo lo igualará en un sistema de flujo totalmente horizontal. Este nivel no se puede medir directamente por lo que se debe de calcular, para lo que debemos tomar en cuenta la influencia de la temperatura sobre la densidad. Los valores de  $\delta(l)$  en función de  $l$  se pueden determinar por muestreo o indirectamente a partir de mediciones de conductividad del agua o del terreno, así como de la temperatura. Es posible calcular un valor medio del peso específico de acuerdo a la profundidad,  $\delta'_a$ :

$$\delta'_a = \frac{1}{z - z_1'} \int_{z_1'}^z \delta(l) dl$$

Si se conocen  $h_p$  y  $\delta'a$ , correspondientes a la profundidad "z", - es sencillo encontrar  $h_a$  pues:

$$\delta_d \cdot h_a = \delta_p \cdot h_p + (\delta_p - \delta'a)z + (\delta'a - \delta_d)z_1$$

Una vez calculada  $h_a$ , se puede escribir lo siguiente tomando  $z_1$  como  $z_1$  :

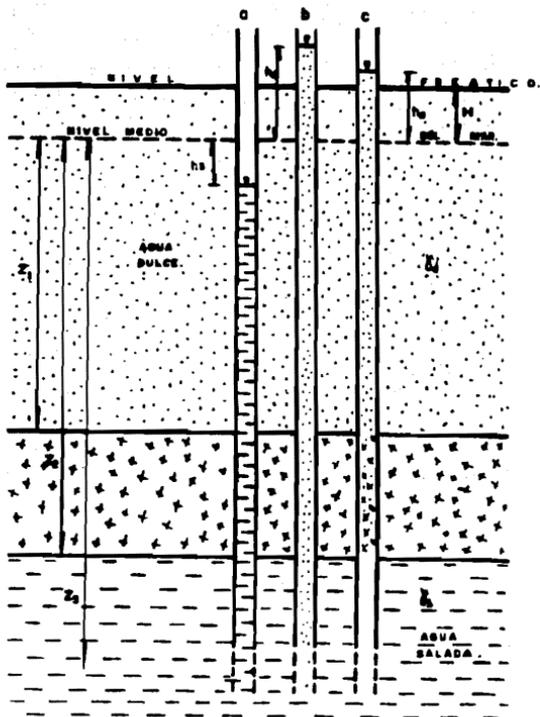
$$\delta_d \cdot h_a = \delta_p \cdot h_p + (\delta_p - \delta'a)z + (\delta'a - \delta_d)z_1 \quad (\text{ec. II.10})$$

siendo:

$$\delta'a = \frac{1}{z - z_1} \int_{z_1}^z \delta(1)dl \quad \dots\dots\dots (\text{ec. II.11})$$

La única incógnita es  $z_1$ , puesto que  $\delta'a$  depende de ella, por lo que se puede determinar esa profundidad por medio de iteraciones. Podríamos conocer  $z_1$  automáticamente, si conociésemos  $\delta(1)$  sin la necesidad de efectuar el cálculo; pero si solo se conoce  $\delta$  en -- dos o tres puntos, es posible establecer una cierta distribu--- ción  $\delta(1)$  y con ella calcular  $z_1$ . Para ésto es preciso disponer por lo menos de dos piezómetros, uno abierto en el agua dulce y otro en el agua salada, siendo recomendable tener un tercero --- abierto en la zona de mezcla.

DeWeist introdujo el concepto de nivel de agua ambiental verdadera, que es el que se observaría en un piezómetro ranurado en todo el espesor del acuífero, el cual es ligeramente inferior al - nivel freático y cuenta con la ventaja de que puede medirse direc--- tamente.



- a.—Nivel de agua puntual o salado,  $h_1$   
 b.—Nivel de agua dulce,  $h_2$   
 c.—Nivel de agua ambiental o local,  $h_3$ .

FIG. II.10

TESIS PROFESIONAL.

F. I. UMB. M. Abril 6.

$$h a^* = z + \frac{p}{\gamma_a}$$

siendo  $\gamma_a$  la densidad media del fluido entre la profundidad  $z$  del punto considerado y el nivel  $h a^*$  :

$$\gamma_a = \frac{1}{h a^* - z} \int_z^{h a^*} \gamma(x, y, l) dl$$

en la que  $l$  es una variable de integración a lo largo de una vertical. Generalmente  $h a \neq h a^*$ .

b).- Fórmula de Lusczynski y comparación con las de Hubbert y de Ghyben-Herzberg.

Suponiendo que en un cierto lugar existe un acuífero con agua dulce en la parte superior y agua salada en la parte inferior, existiendo entre las profundidades  $z_1$  y  $z_2$  agua mezcla, la ec.II.10 establece:

$$(\gamma_a - \gamma_d) z_1 = \gamma_d \cdot h_a - \gamma_p \cdot h_p - (\gamma_p - \gamma_a) z \quad \text{..(ec.II.12)}$$

que es una relación general aplicable a un medio poroso con un fluido de densidad variable. Esta ecuación llamada fórmula de Lusczynski es muy útil pues nos permite comparar las diferencias entre tomar en cuenta o no, la existencia de la zona de mezcla.

- En ausencia de zona de mezcla si  $z_1 = z_2$ ,  $\delta a = \gamma_s$  y  $h_p = h_s$  :

$$z_1 = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} [-\gamma_s h_s + \gamma_d h_a]$$

que es igual a la fórmula de Hubbert (ec.II.8) si tomamos  $h_a = h_d$ , lo que equivale a suponer flujo horizontal, además de la ausencia de mezcla.

- Si se supone que el agua salada es estacionaria, con el nivel medio del mar  $h_s = 0$  :

$$z_1 = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} \gamma_d h_a = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h_d$$

que es la fórmula de Ghyben-Herzberg.

Ahora bien, si la única restricción es que el flujo sea horizontal, tendremos que  $h_a = h_d$  y la fórmula de Lusczynski nos quedará simplificada a lo siguiente:

$$z_1 = \frac{1}{\gamma_a - \gamma_d} [-\gamma_p h_p - z(\gamma_p - \gamma_a) + \gamma_d h_d] \quad \dots \dots \text{(ec.II.13)}$$

siendo ésta mas aceptable, pues incluye la existencia de la zona de mezcla.

Es muy importante considerar que la fórmula de Ghyben-Herzberg supone que el agua salada tiene el nivel medio del mar y se toma como cero, por lo que se necesita conocerlo de antemano; en cambio, como las otras fórmulas determinan el nivel del agua salada, la -

referencia altimétrica puede ser cualquiera.

c).- Profundidad de la Interfase Salina.

El cálculo de la profundidad a la cual empieza el agua contaminada por el agua de mar, es un problema muy importante en la explotación de acuíferos costeros.

La forma directa de hacerlo es midiendo la variación de la salinidad en profundidad pero, como ésto es engorroso, puede determinarse dicha profundidad a partir de medidas piezométricas.

El modo más sencillo consiste en disponer de:

- un piezómetro justamente penetrando el acuífero.
- medir el nivel del agua en el piezómetro respectivo con respecto al nivel medio del mar,  $h_d$  y tener el valor de la densidad del agua dulce en su zona ranurada  $\delta_d$ .
- conocer la densidad del agua marina en el acuífero,  $\delta_s$ .

Existen tres maneras de calcular la profundidad de la interfase salina las cuales están basadas respectivamente en las leyes que se han enunciado antes, y que se utilizan en el estudio de la Intrusión Salina.

La primera de ellas es la que se basa en el principio de Ghyben-Herzberg, siendo de la siguiente manera:

$$z = \frac{\delta_d}{\delta_s - \delta_d} \cdot hd = hd/\beta$$

que como se ha dicho supone de una manera implícita un flujo perfectamente horizontal, agua salada estacionaria y total ausencia de zona de mezcla.

El valor calculado de la profundidad de la interfase con ésta fórmula es por lo general menor que el real en ausencia de zona de mezcla, pero mucho mayor que el del comienzo de ella, cuando es espesa. Por otro lado existe el inconveniente de tener que determinar la posición del nivel medio del mar y no siempre se tiene seguridad de que sea el nivel más ideal de referencia para sistemas dinámicos, de ahí que en muchos casos no se utilice esta fórmula por conducir a resultados absurdos en zonas de elevada mezcla.

La segunda forma y con la cuál puede mejorarse el cálculo de la profundidad de la interfase es con la fórmula de Hubbert, pero es necesario contar con un segundo piezómetro abierto en el agua salada, en el que se debe medir el nivel y la densidad de esa agua. La fórmula de Hubbert para el cálculo sería la siguiente:

$$z = \frac{\delta_d}{\delta_s - \delta_d} hd - \frac{\delta_s}{\delta_s - \delta_d} hs$$

que nos proporciona una posición intermedia de la zona de mezcla

en ausencia de flujo vertical importante. Sucede lo mismo con ---  
 Ésta fórmula que con la de Ghyben-Herzberg, que en zonas donde la  
 zona de mezcla es espesa, no nos da resultados convenientes; pero  
 tiene la ventaja de que no es necesaria la determinación del ni--  
 vel medio del mar para su aplicación.

Por último, es posible lograr aún más mejora utilizando la fórmu-  
 la de Lusczynski, utilizando dos piezómetros como los descritos -  
 en los párrafos anteriores, los cuales permiten determinar  $\delta d$ ,  $\delta p$ ,  
 $h_d$ ,  $h_p$ ; pero no  $\delta a$  y  $h_a$  ( $z$  es la profundidad de apertura del pie-  
 zómetro que llega al agua salada).

El procedimiento de cálculo de los valores no conocidos es el mis-  
 mo que se expuso en el apartado a).; el valor de  $h_a$  solo coincide  
 con el de  $h_a^*$  determinado en un piezómetro totalmente ranurado y  
 si el flujo es perfectamente horizontal, en cuyo caso se puede --  
 aplicar para el cálculo de la profundidad la ecuación II.13.

d).- Velocidad de flujo del agua subterránea.

En una zona con agua dulce, agua mezcla y agua salada, no puede -  
 determinarse directamente las líneas de flujo del agua ya que el  
 fluido es de densidad variable.

El resultado de varias investigaciones realizadas por diferentes  
 especialistas, arroja los siguientes resultados:

1).- La velocidad de flujo horizontal viene determinada por los potenciales de agua dulce medidos sobre el mismo plano (no a otras profundidades). Si en un plano horizontal se representan las líneas equipotenciales de agua dulce y el medio es homogéneo e isótropo en sentido horizontal; las líneas de flujo serán perpendiculares a las primeras.

2).- La velocidad de flujo vertical ésta determinada por el gradiente de potenciales de agua ambiental verdaderos en la vertical considerada.

No debe de caerse en el error de suponer que, cuando todos los niveles del agua se han convertido a niveles de agua dulce se puede aplicar las leyes de las redes de flujo, ya que el sistema se ha transformado en uno de agua homogénea; eso solo es cierto sobre planos horizontales pero no cuando se manejan resultados a profundidades diferentes.

## II.5. EFECTOS QUE INFLUYEN EN LA POSICION DE LA INTERFASE SALINA.

a).- Efecto de cambios en el nivel del agua dulce.

Si cambia el potencial de agua dulce, debe cambiar el del agua salada para que se establezca una nueva situación de equilibrio; sin embargo, la interfase se mueve muy lentamente ya que supone -

el desplazamiento de grandes volúmenes de agua; ésa velocidad es del orden de la del movimiento del agua subterránea.

Sabemos que el equilibrio de la interfase está dado por la ecuación siguiente:

$$(z + h_d) \gamma_d = (z + h_s) \gamma_s \quad \dots\dots(\text{ec.II.14})$$

ahora bien, si en los primeros momentos se produce un incremento rápido de potencial de agua dulce  $\Delta h_d$ , apenas cambiará la posición de la interfase de manera que:

$$(z + h_d + \Delta h_d) \gamma_d = (z + h_s + \Delta h_s) \gamma_s$$

siendo  $\Delta h_s$  el cambio de potencial del agua salada correspondiente; restándole la ec.II.14 a la anterior, queda ésta de la siguiente manera:

$$\Delta h_d = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \Delta h_s$$

la cual se puede expresar en forma diferencial derivándola a lo largo de la interfase salina:

$$\frac{d \Delta h_d}{ds} = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \frac{d \Delta h_s}{ds}$$

las velocidades del agua dulce y del agua salada a lo largo de la interfase son:

$$v_d = - k_e \frac{\gamma_d}{\mu_d} \frac{dh_d}{ds} \quad ; \quad v_s = - k_o \frac{\gamma_s}{\mu_s} \frac{dh_s}{ds}$$

y si tomáramos  $\mu_s = \mu_d =$  viscosidad del fluido, para las variaciones de velocidad tendríamos que:

$$\Delta v_d = \Delta v_s$$

sobre la interfase.

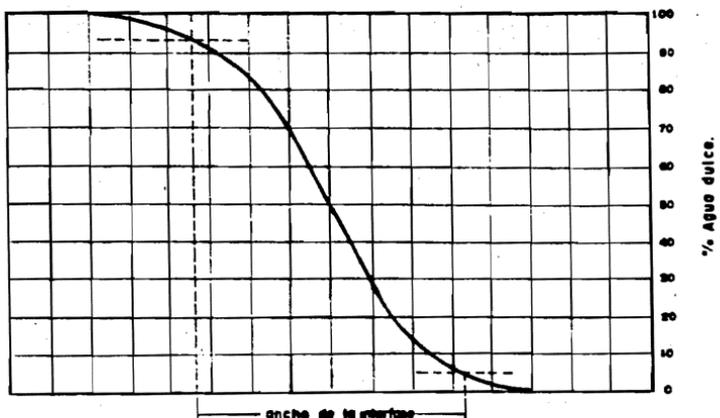
Por lo tanto, siendo las velocidades normales a la interfase iguales y también las paralelas a ella, resulta que toda el agua del acuífero reacciona como un bloque a estímulos externos, por lo menos en los primeros instantes. A largo plazo la forma de la interfase se modifica para adaptarse a las nuevas condiciones de equilibrio.

b).- Anchura de la zona de mezcla y efecto de las mareas.

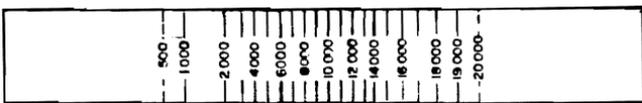
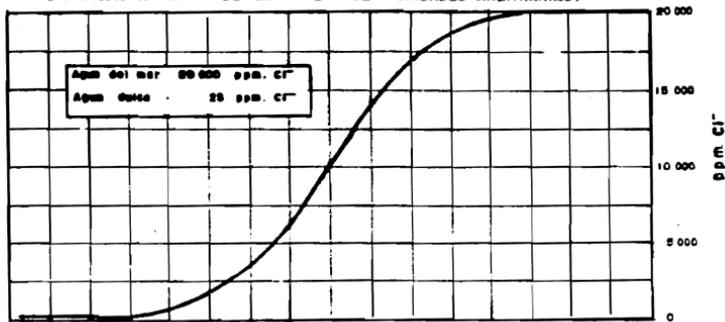
Puede definirse el ancho de la zona de mezcla como la distancia entre las superficies que indican mezclas del  $\epsilon$  ( % de agua dulce ) y del  $1 - \epsilon$ , por ejemplo de 5% y de 95% respectivamente (fig.II.11).

En realidad la interfase salina no es completamente simétrica en cuanto a concentraciones, debido a la circulación de fluido a lo largo de la misma, siendo más intensa ésta circulación en la zona de agua dulce que en la de agua salada.

El espesor de la zona de mezcla medida en un sondeo es mayor que el espesor real, ya que en general el sondeo es oblicuo a la interfase; sin embargo, dado que las dimensiones horizontales son -



DISTANCIAS A PARTIR DE LA INTERFASE. UNIDADES ARBITRARIAS.



DISTRIBUCION DE LINEAS DE ISOCORUROS.

Distribución teórica de agua dulce y de cloruros en la zona de mezcla.

FIG II. II.

TESIS PROFESIONAL

F. I. unam. M. Abril G.

mucho mayores que las verticales, ésta diferencia es con frecuencia pequeña, salvo cerca del área de descarga.

En la práctica se toma el límite del agua salada cuando la reducción de salinidad es de poco porcentaje, por ejemplo de 5 a 10% y el límite de agua dulce cuando el aumento de salinidad es ya notable, por ejemplo de 100 a 200%. Es importante considerar que un 2% de agua marina mezclada con agua dulce, hace que rebase los límites aconsejables de ión Cl y que un 3% ya produce un cierto sabor salino.

Si al dibujar las líneas de isocloruros el intervalo entre ellas no se mantiene regular, el aspecto de la zona de mezcla se deforma.

Las fluctuaciones periódicas de la marea originan un movimiento de vaivén sobre la interfase, originando una dispersión hidrodinámica del agua salada en el agua dulce. Admitiendo que el coeficiente de dispersión "D" es proporcional a la velocidad media intersticial "v", tenemos que  $D = D_0 v$ , siendo  $D_0$  una constante característica del medio (dispersividad intrínseca).

En el caso de movimiento provocado por la marea puede escribirse lo siguiente:

$$D = D_0 \frac{4A}{t_0}$$

siendo "A" la semiamplitud de la oscilación y "t<sub>0</sub>" el periodo de la marea, puesto que en un t<sub>0</sub> se recorre 4 veces A.

La oscilación piezométrica en un punto del acuífero esta dada por:

$$h = h_0 \cdot \exp \left( -x \sqrt{\frac{\pi S}{toT}} \right) \cdot \sin \left( \frac{2\pi t}{to} - x \sqrt{\frac{\pi S}{toT}} \right)$$

El gradiente que produce el desplazamiento será:

$$\frac{dh}{dx} = -h_0 \sqrt{\frac{\pi S}{toT}} \cdot \exp \left( -x \sqrt{\frac{\pi S}{toT}} \right) \cdot (\sin U + \cos U)$$

siendo:

$$U = \frac{2\pi t}{to} - x \sqrt{\frac{\pi S}{toT}}$$

La semiamplitud del desplazamiento horizontal " a " será:

$$a = \frac{k}{n} \int_{U = -\pi/4}^{U = \pi/4} \frac{dh}{dx} dt = \frac{k h_0}{n} \sqrt{\frac{toS}{2\pi T}} \cdot \exp \left( -x \sqrt{\frac{\pi S}{toT}} \right) \quad (\text{ec. II.15})$$

La integración de ésta ecuación se extiende desde la marea baja a la marea alta siguiente, que en este caso corresponde a valores de  $U = -\pi/4$  y  $\pi/4$  respectivamente. En dicha ecuación:

$k$  : permeabilidad del medio

$n$  : porosidad efectiva

$h$  : oscilación alrededor del punto medio del nivel piezométrico.

$h_0$  : semiamplitud de oscilación de la marea.

$to$  : periodo de la marea = 12 hr 25 min = 0.52 días.

S : coeficiente de almacenamiento del acuffero.

T : transmisividad del acuffero.

x : distancia a la línea de costa o al afloramiento del acuffero en el mar.

En realidad la marea produce desplazamientos horizontales y en la parte de la interfase en que ésta no puede suponerse como horizontal, aparecen componentes dispersivos normales y tangenciales.

A continuación se cita un ejemplo donde tienen aplicación los conceptos anteriores:

\* En un cierto lugar, la amplitud de la oscilación de la marea es de 130 cm. Calcular la amplitud de oscilación de la interfase a - varias distancias de la línea de costa, si el acuffero tiene una permeabilidad de 300 m/día, un coeficiente de almacenamiento igual a 0.25, una porosidad efectiva de 0.30 y un espesor de 30 m.

Aplicando la ec.III5 con  $t_0 = 0.52$  días, siendo  $a'$  la amplitud -- total tenemos que:

$$a' = \frac{300 \cdot 1.30}{0.30} \sqrt{\frac{0.52 \cdot 0.25}{2 \cdot \pi \cdot 300 \cdot 30}} \cdot \exp\left(-x \sqrt{\frac{x \cdot 0.25}{0.52 \cdot 300 \cdot 30}}\right)$$

$$a' = 1.97 \exp(-0.013 x)$$

estando  $a'$  y  $x$ , expresados en metros, con la aplicación de la - última expresión se obtendrían los valores de  $a'$ , suponiendo las distancias  $x$  a la línea de costa. Dichos resultados están tabulados en la tabla que se presenta en la siguiente página.

x (m)	a' (m)
0	1.97
10	1.72
25	1.42
50	1.03
100	0.54
250	0.08
500	0.00

El resultado final depende del flujo de agua dulce, que es el que provoca el arrastre de sales hacia el mar. Tal como ya se ha dicho, cerca de la costa la dispersividad es grande pero el lavado de sales es intenso, mientras que cerca del pie de la cuña salina la dispersividad es pequeña, pero el lavado de sales es muy poco efectivo. El resultado depende del tiempo y de las oscilaciones piezométricas, así como de la amplitud de la marea; por lo que el planteamiento matemático del problema y su solución se vuelven su mamente difíciles.

En áreas con notables oscilaciones de marea, su efecto es dominan te y hace que la interfase aumente de espesor hacia la costa, --- mientras que en mareas tranquilas sucede lo contrario; por otro - lado es preciso considerar que las tormentas pueden tener efectos importantes si producen cambios anormales en el nivel del mar o, permiten que el agua salada trasponga el cordón litoral, inundando áreas interiores, en cuyo caso acaba produciéndose una espesa zona de mezcla, incluso con inversiones de salinidad temporales

que se van reduciendo lentamente por lavado, hasta la llegada de una nueva tormenta suficientemente intensa.

Lo anterior es válido para un acuífero homogéneo e isótropo; sin embargo, en la realidad es frecuente encontrar una estratificación de manera que algunas capas sean más permeables que otras. Si se parte de una interfase brusca y se produce una subida de marea, la interfase se desplazará más en las capas de mayor permeabilidad y el flujo de agua dulce al mar arrastrará las penetraciones diferentes, produciendo una zona de mezcla aproximadamente del ancho correspondiente a la diferencia de desplazamientos, entre el nivel más permeable y el que lo es menos.

De ésta manera, el ancho de la zona de mezcla puede variar desde unos cuantos metros, hasta algunos centenares dependiendo de la permeabilidad y heterogeneidad del medio acuífero, del flujo de agua dulce, del espesor del acuífero y de la magnitud de las fluctuaciones piezométricas. En arenas dunares o fluviales la interfase se puede tener un ancho de solo escasos metros, mientras que en calizas o materiales volcánicos puede rebasar los 300 m.

Luszczynski y Swarzeski encontraron un espesor de interfase en materiales no consolidados de Long Island, Estados Unidos de 90 m para 10 km de penetración y lo atribuyen a pequeñas variaciones en el nivel del mar, el cual ha ascendido 15 cm desde los principios de siglo a la actualidad.

En acuíferos consolidados, en los que la permeabilidad de fracturación juega un papel muy importante, el grado de heterogeneidad es muy elevado y por lo tanto la interfase es grande en espesor, por lo que la fórmula de Ghyben-Herzberg suele tener muy poco --- valor. En ciertos casos, la permeabilidad disminuye con la profundidad, de modo que en zonas montañosas costeras con muy escasa -- franja litoral, la superficie freática se eleva muy rápidamente -- formando una interfase en principio poco inclinada, pero cada vez con mas pendiente al alejarse de la costa, al contrario de lo que se ha indicado anteriormente.

c).- Efectos de cambios en la posición del mar o climáticos.

Si la posición del nivel medio del mar varía en relación con el -- continente, ya sea por cambios relacionados con las glaciaciones o por movimientos de la masa continental, deben producirse gran-- des salidas de agua dulce ( descenso del mar o emersión del conti-- nente ) o una invasión de agua salada ( ascenso del mar ó immer-- sión del continente ). En ambos casos los movimientos de agua son muy importantes y si la pendiente del terreno es muy pequeña así como la permeabilidad y/o la recarga es muy escasa, puede tardar se mucho tiempo en lograrse el equilibrio o incluso no alcanzarse si el movimiento que induce éstos fenómenos es relativamente -- más rápido.

De ésta manera, si se tiene un acuífero poco permeable, confinado, invadido inicialmente por agua salada, con una  $k = 0.20 \text{ m/día}$  y porosidad de 0.10, sometido a un gradiente de 0.001, el agua y en primera instancia la interfase, se mueven horizontalmente a -- una velocidad de 0.73 m/año. Si el terreno tiene una pendiente de 1% y la velocidad de emersión relativa del continente es de 1 mm por año, la velocidad de retroceso de la costa será de 1.0 m/año, que es mayor que el retroceso de la interfase.

Este hecho explica porque acuíferos de formación marina o invadidos por el agua de mar, aunque actualmente sean continentales, -- conservan aún agua salobre (el movimiento crea una gran dispersividad y por eso el agua suele ser salobre en lugar de salada).

Si el movimiento consiste en un hundimiento relativo del mar, pueden mantenerse acuíferos profundos con salinidades inferiores a -- las que serían de esperar.

Los cambios climáticos pueden afectar de manera similar aunque -- son muy lentos. Mucho más importantes son los cambios en la recarga producidos como consecuencia del establecimiento de regadíos, drenajes generales, saneamientos, pavimentación, etc.

En zonas deltáicas, en terrenos ganados rápidamente al mar por sedimentación fluvial, se encuentran frecuentemente aguas salobres que son consecuencia del escaso gradiente del agua dulce y que a su vez son mantenidas por la invasión de agua salada que se pro--

duce en épocas de tormenta o viento, ya sea directamente o a través de los cursos de agua que los surcan.

Las afectaciones a los acuíferos costeros libres son sencillas, pudiendo ser algo más complicadas en los acuíferos confinados con desagüe al mar. Si la recarga es suficiente aunque aumente el nivel del mar puede no producirse intrusión salina, pero si el mar llega a inundar la zona de recarga, éste tiende a penetrar en el acuífero expulsando toda el agua dulce; sin embargo, si la diferencia de cotas entre los afloramientos de entrada y salida es -- pequeña puede mantenerse mucho tiempo el agua dulce, aún estando el acuífero sumergido, retardándose el avance de la intrusión --- Salina.

## CAPITULO III

### APLICACION DE METODOS GEOFISICOS E HIDROGEOQUIMICOS PARA PROSPECCION

#### III.1. METODOS GEOFISICOS

a).- Aspectos generales de la prospección geofísica.

La prospección geofísica básicamente consiste en la realización de mediciones desde la superficie del suelo, encaminadas a suministrar información acerca de las propiedades físicas de los materiales del subsuelo. Esta información interpretada de forma adecuada puede utilizarse para localizar estructuras geológicas favorables donde se encuentre agua, hidrocarburos o minerales útiles. La geofísica de exploración aparece en ésta forma como un sustituto parcial con ventajas económicas sobre la observación directa, siendo ésta la razón principal de su aplicación.

b).- Clasificación de los métodos geofísicos.

Existe una clasificación según que las propiedades físicas se manifiesten mediante la existencia de un campo de fuerzas naturales como el campo gravitatorio terrestre, el campo magnético y las corrientes telúricas; o bien, mediante la creación de un campo artificial como una perturbación elástica o un campo eléctrico generado desde la superficie.

Los métodos que utilizan fuerzas naturales son:

- \* Método Magnetométrico.
- \* Método Gravimétrico.

Los métodos que utilizan excitación artificial son:

- \* Método Eléctrico.
- \* Método Sísmico.

c).- Métodos geofísicos utilizados en la prospección para agua -- subterránea.

Para el aprovechamiento racional del agua subterránea es necesario efectuar estudios que nos permitan conocer las características físicas y químicas, así como el comportamiento de las formaciones que se encuentran en el subsuelo.

Los objetivos de una prospección geofísica encaminada al estudio y exploración del agua subterránea son los siguientes:

- \* Trazar la geometría del sistema acuífero.
- \* Determinar los sitios y profundidades más favorables para la perforación de pozos.
- \* En zonas costeras, delimitar la INTERFASE SALINA.
- \* Ayudar a determinar en forma cualitativa la calidad del agua.

Antes de efectuar un determinado estudio se hace una selección de

Los métodos geofísicos, esto es, se relacionan las características y propiedades de cada uno con el objetivo a alcanzar y se deduce de acuerdo con la geología del área en estudio, cuál o cuales son los más convenientes para aplicar.

Tomando en cuenta lo anterior y con base en experiencias, se puede decir que los métodos considerados para la prospección del agua subterránea en orden de resolución para el objetivo, son:

- \* Método Eléctrico Resistivo.
- \* Método Sísmico de Refracción.
- \* Método Gravimétrico.

Por supuesto, esto no excluye la posibilidad de utilizar otros métodos en problemas geohidrológicos específicos, lo cual es importante hacer notar, ya que en muchas ocasiones se limita la exploración geohidrológica a los dos primeros métodos señalados arriba y se olvidan de los demás.

Por otra parte, hay que tomar en cuenta que los métodos geofísicos tienen sus posibilidades y limitaciones, por lo que muchas veces es necesario combinarlos para obtener resultados satisfactorios.

d).- Breve exposición de los métodos geofísicos utilizados en la prospección y exploración del agua subterránea.

Método Eléctrico: La aplicación de este método se basa en los ---

contrastes de las propiedades eléctricas que presentan las rocas y que determinan la distribución de los elementos del campo electromagnético. Los principales parámetros que intervienen en la -- distribución de dichos elementos son la resistividad, la constante dieléctrica, la permeabilidad magnética y la polarización de -- las rocas o minerales.

Las características de las rocas en distintas regiones determinan las diferencias en la distribución de los elementos del campo --- electromagnético. Estudiando ésta distribución obtenemos suficientes conocimientos para emitir un juicio sobre la estructura geológica de dichas regiones.

De todos los métodos de prospección geofísica, la exploración --- eléctrica es la que posee mayor variedad de técnicas y métodos. - De éstos hay los que aprovechan los campos de fuerzas existentes en el globo terrestre, como el método de potencial natural. Otros requieren de la excitación del subsuelo por medio de campos de -- fuerzas artificiales, que a su vez pueden ser creados:

\* Galvanicamente, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del terreno mediante electrodos conectados a tierra; tal es el caso del método de resistividad, el de relación de caída de potencial y el de polarización inducida.

\* Inductivamente, cuando las corrientes en la tierra se crean por un campo magnético variable producido por una corriente alterna.

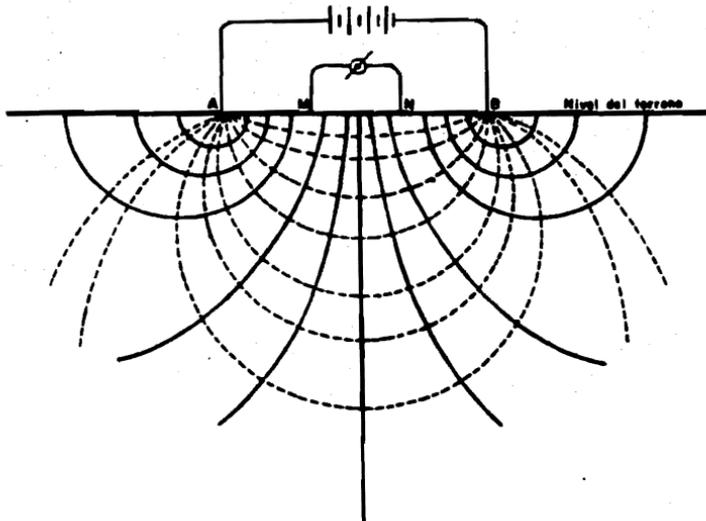
En realidad cada una de las formas presentadas implican varios mé todos (resistividad, potencial espontáneo, polarización inducida, caídas de potencial), de los cuales se describe de una manera bre ve a continuación el método eléctrico resistivo, de mayor interés en cuanto a prospección en aguas subterráneas se refiere.

El método de resistividad se basa en medir desde la superficie -- del terreno, los cambios de resistividad de los diferentes estratos que constituyen el subsuelo, en función de sus espesores y re sistividades verdaderas.

La resistividad de un cierto material se define como la resistencia de un cubo de 1.0 m de lado de dicho material, cuando hacemos pasar a través de él una corriente perpendicular a una de sus caras.

Las diferentes rocas tienen grandes diferencias en cuanto a resis tividad y en la gran mayoría de ellas, una variación en su litoló gía, contenido y calidad del agua, viene acompañada por una apreciable variación en su resistencia eléctrica.

La característica general del método, consiste en enviar corriente al terreno mediante dos electrodos A y B, que se clavan en el suelo. Una vez establecido así un campo eléctrico artificial, se investigan sus condiciones con otros dos electrodos adicionales M y N, también clavados en el terreno y cuyas distancias se varían convenientemente ( fig III.1).



----- LINEAS DE CORRIENTE  
 ————— LINEAS EQUIPOTENCIALES

**METODO ELECTRICO-RESISTIVO**  
 Dispositivo para el cálculo de Resistividades en el terreno

FIG. III.1

TESIS PROFESIONAL

F. I. unam M. Abril G.

Se puede determinar de este modo la resistividad aparente del terreno, que es función del cociente entre la diferencia de potencial medida entre los electrodos de investigación (M y N) y la intensidad de corriente con que se alimenta el terreno. En la función interviene un coeficiente que depende a su vez, de la disposición de los electrodos. Este coeficiente es lo que se conoce como factor de penetración por ser el que controla la profundidad de investigación a la que se esta operando.

De esta forma suministra una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo, con lo que podremos determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad.

Cuando el objeto del estudio sea la delimitación de la Interfase Salina de un acuífero costero, se hará de la siguiente manera: una vez conocidos la posición del acuífero y su nivel freático, se harán mediciones de resistividades a diferentes profundidades, de la línea de costa hacia tierra adentro. La localización de la Interfase Salina se puede obtener graficando las distintas resistividades obtenidas y señalando en esa gráfica los cambios bruscos de ellas. Estos cambios de resistividad los podemos encontrar si contamos de antemano con una tabla o lista donde esten especificados las resistividades de diferentes materiales, incluyendo en ella la de materiales saturados, así como la del agua con diferentes contenidos de cloruro sódico.

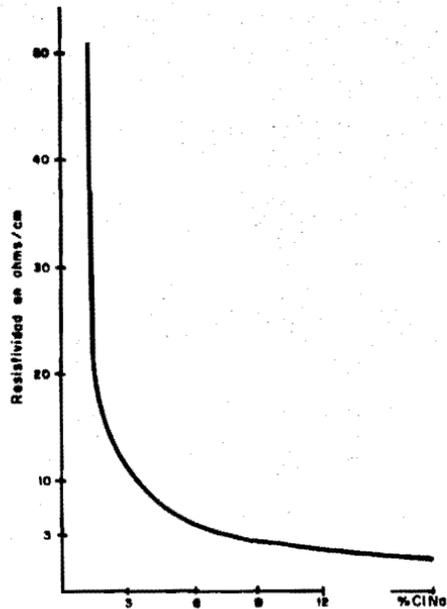
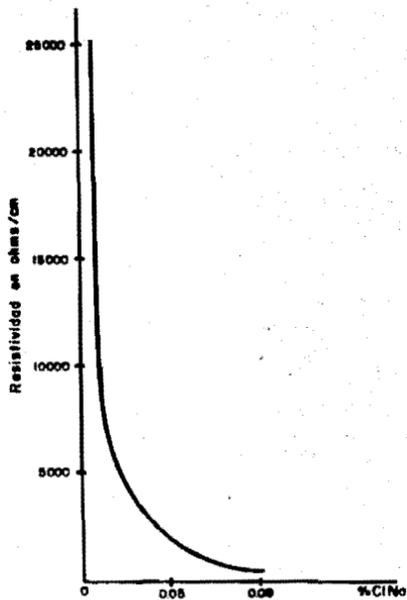
Para esto sabemos de antemano, que la resistividad disminuye conforme aumenta el porcentaje de sales que contenga.

En la fig. III.2 se puede ver como varía la resistividad del agua en función del contenido de cloruro sódico, que es el que con mas frecuencia se encuentra en las formaciones geológicas. Asimismo - en la tabla III.1 se indican valores comparativos y rangos de resistividades del agua salada con respecto a otras formaciones.

Método Sísmico: Los métodos sísmicos de prospección se basan en - los contrastes de las propiedades elásticas de las rocas, de ésta manera la velocidad de las ondas elásticas es distinta para diferentes rocas o formaciones.

Este método consiste en producir un pequeño sismo artificial por medio, generalmente, de una carga explosiva enterrada en el suelo y medir los tiempos de llegada de las ondas producidas en unos de tactores o geófonos convenientemente situados en la superficie -- del suelo. Conocida la ley de propagación de la velocidad de las ondas sísmicas en el subsuelo se llega, en función de los tiempos y distancias medidos, a la posición de los estratos y formaciones en profundidad.

Las ondas producidas por la explosión se propagan en todas direcciones y cuando cambian las condiciones del medio, es decir, cuando la onda sísmica en su recorrido en profundidad encuentra un me dio de propagación distinto del anterior, parte de la energía se refleja, volviendo a la superficie, y parte se refracta siguiendo su viaje en profundidad.



RELACION CLORURO SODICO - RESISTIVIDAD

FIG. III. 2

TESIS PROFESIONAL

F.I. unom.

M. Abril G.

### TABLA DE VALORES DE RESISTIVIDAD PARA DIFERENTES MATERIALES

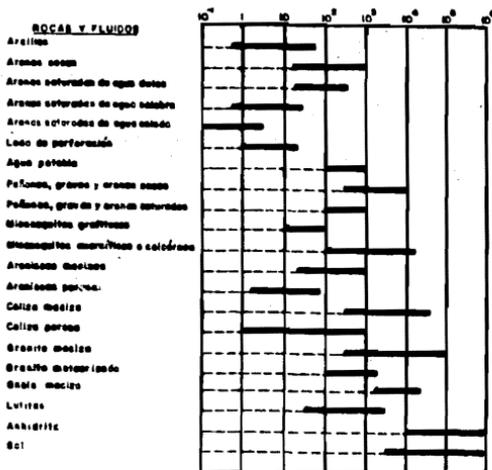


TABLA III. 1

TESIS PROFESIONAL

F.I. unom.

M. Abril G.

Dentro de la energía refractada hay una parte que experimenta la refracción total, propagándose entonces a lo largo del contacto - entre los diferentes medios y volviendo asimismo a la superficie. Si detectamos en la superficie los tiempos de llegada de las ondas sísmicas reflejadas en los diversos contactos del terreno, es taremos aplicando el método sísmico de reflexión.

En cambio si detectamos en la superficie los tiempos de llegada - de las ondas sísmicas refractadas, llevaremos a cabo el método -- sísmico de refracción.

Método Gravimétrico: Este método se basa en la medida, en la superficie del suelo, de las pequeñas variaciones de la componente vertical del campo gravífico terrestre. Estas variaciones son debidas a una distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades, por lo que conociendo aquellas se puede llegar a una interpretación más o menos probable de la situación de los estratos en el subsuelo, dependiendo del conocimiento geológico y de la distribución de densidades en profundidad.

Muchas estructuras geológicas dan lugar a deformaciones en la distribución normal de la densidad en el interior del suelo, que originan a su vez anomalías en el campo gravífico terrestre que pueden servir de diagnóstico; éstas anomalías son muy pequeñas en -- comparación con la atracción total de la tierra y en algunos casos son menores que una diezmillonésima. Por ésta razón, los instrumentos de medición empleados deben ser extremadamente sensibles.

Los diferentes tipos de rocas y por lo tanto formaciones, tienen densidades distintas y las más densas ejercen mayor atracción gravitacional; de esta manera si las rocas más densas están arqueadas hacia arriba, formando una elevación estructural, tal como un anticlinal (fig III.3.a), el campo gravitatorio terrestre será mayor sobre el eje de la estructura que a lo largo de sus flancos. Por otro lado, un domo salino (fig III.3.b), que es menos denso que las rocas en que esta intrusionado, puede ser descubierto gracias a los bajos valores de gravedad que normalmente son registrados sobre el mismo.

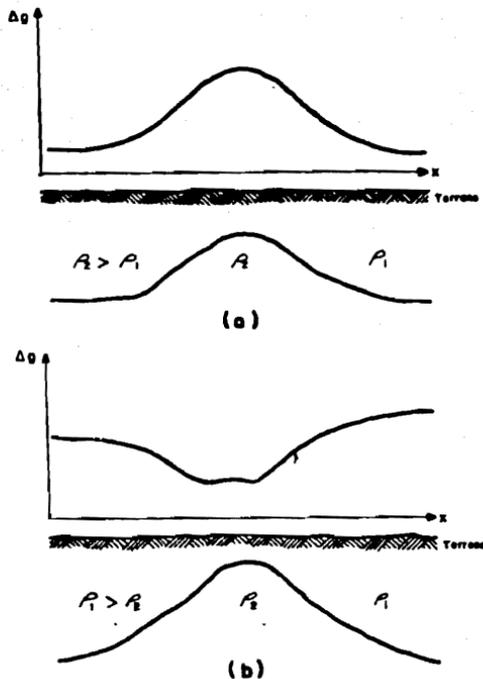


FIG. III. 3.

### III.2. APLICACION DE LA HIDROGEOQUIMICA.

#### a).- Introducción.

El estudio hidrogeoquímico junto con algunos de los métodos geofísicos de prospección son los que se utilizan para la exploración - en aguas subterráneas y muy en especial en el fenómeno provocado - por la Intrusión Salina. Es por eso que se presentan a continua--- ción los pasos que se siguen al llevar a cabo un estudio de este - tipo; primero, de una manera general estableciendo las bases de su aplicación y más adelante enfocado al estudio en zonas costeras.

La manera de realizar dicho estudio consiste en tomar muestras de agua de diferentes fuentes, las cuales son analizadas químicamente con el fin de observar los cambios de calidad química.

En la hidrogeoquímica se presentan varios procesos naturales por - medio de los cuales cambia la calidad química del agua. Entre és-- tos procesos, se cuentan los propuestos por Hanshaw y Back y son:

- \* El viento sobre los océanos lleva tierra adentro sodio, cloruros y otras sustancias.
- \* El agua al condensarse disuelve nitrógeno, oxígeno y bióxido de carbono de la atmósfera, elementos que llegan al suelo cuando -- llueve o neva.
- \* Cuando el agua se infiltra a través de suelos ricos en materia - orgánica, disuelve cantidades adicionales de  $CO_2$  .

- \* El agua infiltrada en su recorrido, disuelve minerales y libera aniones y cationes; oxida minerales sulfurosos para producir sulfatos y otros constituyentes; los cationes en solución son intercambiados con los existentes en suelos y rocas, etc.
- \* Por evaporación y transpiración, el agua retorna a la atmósfera dejando productos químicos, otra parte regresa al océano como escurrimiento superficial o por descarga subterránea, arrastrando en ambos casos sólidos disueltos.

A los procesos hasta aquí mencionados, cabe agregar el referente - al avance de la interfase salina hacia la formación acuífera, invadiendo con agua salada la zona de agua dulce.

Basándonos en lo anterior podemos apreciar que los estudios de hidrogeoquímica implican la necesidad de considerar un gran número - de factores, los cuales tienen influencia en los cambios de calidad química del agua.

Es evidente que además de ciertos factores "naturales", deberán tomarse durante la realización de un estudio precauciones para no -- agregar efectos no cuantificables.

b).- Estudio hidrogeoquímico.

\* Muestreo:

En esos estudios como en cualquier otro, es necesario cumplir con normas establecidas para el muestreo, las cuales tienen como fina-

lidad obtener información del área en estudio y evitar diferencias debidas al proceso de muestreo.

La elección de los sitios de muestreo así como la forma de realizarlos, deben decidirse de acuerdo con los lineamientos siguientes, los cuales se consideran determinantes en la calidad de las muestras, así como en los resultados que se obtengan:

1.- El muestreo debe ser representativo de toda la zona en estudio; el número de muestras y la distribución de las mismas deberán escogerse de tal manera que la información que se obtenga, sea suficiente y de buena calidad como para llegar a conclusiones confiables.

2.- Cada muestra obtenida deberá tomarse con los cuidados siguientes:

- El frasco donde se coloque la muestra deberá enjuagarse con agua de la fuente que se muestrea.
- El volumen de la muestra deberá ser suficiente para un análisis químico completo.
- En el caso de que la fuente de muestreo sea un pozo, es necesario que el tiempo transcurrido entre el inicio del bombeo y el momento de tomar la muestra, mínimo sea de dos horas, evitando posibles influencias de agua de retorno de riego, etc.

3.- Las determinaciones de pH y temperatura deberán realizarse en el campo, inmediatamente después de haberse tomado la muestra.

4.- Debe llevarse un registro de cada muestra tomada y cada frasco se debe identificar fijando una etiqueta debidamente rotulada, con el fin de poder identificar la muestra rápido y en cualquier momento.

5.- Las estaciones de muestreo deben ser fácilmente localizadas, - tanto en el campo como en el gabinete.

6.- Una vez obtenidas las muestras deberán enviarse al laboratorio para su análisis químico, procurando que el tiempo que transcurra entre la toma de la muestra y el análisis sea mínimo, evitándose - así cambios en la calidad de la muestra.

\* Análisis químico de las muestras de agua y forma de expresar los resultados.

Los análisis de las muestras deben ser completos e incluir las siguientes determinaciones:

- Temperatura
- Color y olor
- Sólidos totales disueltos
- pH
- Dureza y alcalinidad
- Calcio, magnesio, potasio, sulfatos, cloruros, carbonatos, nitratos, bicarbonatos, amonio ( $\text{NH}_4$ ), fosfatos y sílice.

Es recomendable incluir la determinación del boro, zinc, litio y - en algunos casos plomo.

El primer grupo de los iones señalados, cuya concentración es necesario conocer, dan al agua la mayor parte de su salinidad; no obstante los incluidos en el párrafo anterior proporcionan información especial que permite inferir algunas relaciones existentes entre la geología regional, funcionamiento geohidrológico y calidad del agua.

Todas las determinaciones señaladas; además de ser de utilidad e - indispensables en estudios de hidrogeoquímica, permiten conocer la calidad del agua y saber que problemas puede implicar su utilización.

\* Criterios básicos para la interpretación de los resultados.

El procesamiento e interpretación de la información disponible se puede realizar valiéndose de diferentes técnicas, entre las que se encuentran las que se enumeran a continuación:

- 1.- Mediante clasificaciones propuestas por diferentes autores, las cuales se basan en sumas y cálculos de relaciones iónicas, cuyos resultados permiten agrupar, diferenciar y atribuir ciertos efectos a las muestras de agua analizadas.
- 2.- La elaboración de gráficas o diagramas se utiliza con el fin -

de comparar la calidad del agua de diferentes fuentes, de agrupar aquellas que tengan calidad química semejante, de observar cambios de calidad de agua con el tiempo y de representar en forma objetiva las características químicas más importantes de una fuente o fuentes de agua.

3.- Elaboración de planos con curvas de igual concentración iónica. En un plano donde se muestra la localización de las fuentes muestreadas se vacía parte de la información obtenida al analizar químicamente las muestras de agua. Con el apoyo de éstos valores, es posible configurar curvas de igual valor, las cuales permiten identificar áreas con calidad de agua semejante, así como observar la dirección en la cual se incrementan las sales disueltas y tener una idea de las zonas donde el uso de agua en relación con su calidad química no representa problema.

Una aplicación de éstas configuraciones es la facilidad que ofrecen para representar la evolución de la concentración de sales, - punto por demás importante en áreas donde existe el peligro de -- contaminación por Intrusión Salina.

c).- Aplicación en acuíferos costeros.

Con el fin de delimitar las zonas con diferentes tipos de agua, - definir el funcionamiento de los acuíferos en las zonas costeras,

conocer su relación con el agua de mar y la calidad del líquido, deben obtenerse un número suficiente de muestras de agua, representativas de la zona de estudio.

Después de un análisis químico de las muestras, éstas se deben agrupar según las características químicas que contengan, elaborándose las familias de aguas a que pertenece cada muestra. Es de esperarse que en zonas costeras se obtengan tres principales familias de agua y que son: agua contaminada por el agua de mar, con alto contenido de sales (sódico-clorurada); agua mixta, que nos define una zona de transición y por último, una familia de agua que será de acuerdo a los materiales del subsuelo que forman el estrato acuífero.

Entre otros de los aspectos dentro del estudio hidrogeoquímico, y que puede considerarse como el más importante ya que nos muestra la evolución de la concentración de sales con el tiempo, es la elaboración de planos de igual concentración o relación iónica, y que nos da una idea del avance de la interfase salina con respecto al tiempo.

Es conveniente también, para corroborar resultados obtenidos de la elaboración de configuraciones y familias de agua, formar los perfiles hidrogeoquímicos de la zona costera en estudio. Estos perfiles pueden formarse midiendo conductividades eléctricas en pozos a diferentes profundidades y distancias de la costa; podremos

conocer las variaciones en cuanto a espesor de las diferentes capas de agua subterránea existentes en la zona (dulce, salobre, salada, fig. III.3).

Con las mismas mediciones puede elaborarse un sección hidrogeoquímica, tomando en cuenta la forma y profundidad de la Intrusión Salina a partir del nivel freático conocido (fig. III.4).

Con la información obtenida y considerando correctamente todos los factores que tienen influencia en la calidad química del agua, podremos llevar a cabo una interpretación de ella, dándonos una --- idea del comportamiento del acuífero costero, la manera de avance de la intrusión salina y una delimitación aproximada de la interfase salina del lugar.

## PERFIL HIDROGEOQUIMICO

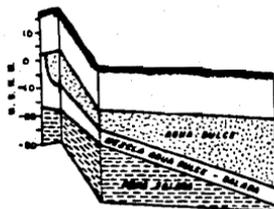


FIG. III. 3.

## SECCION HIDROGEOQUIMICA

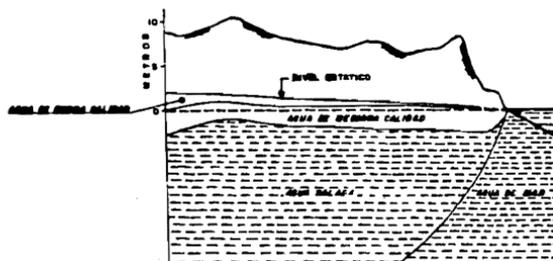


FIG. III. 4.

## CAPITULO IV

### EXPLORACION DE ACUIFEROS COSTEROS Y PREVENCION DE LA INTRUSION SALINA

#### IV.1. PRINCIPIOS GENERALES SOBRE LA EXPLORACION DE ACUIFEROS ---- COSTEROS.

##### a).- Introducción.

El equilibrio agua dulce-agua salada en los acuíferos costeros es función del caudal de agua dulce vertido al mar; de ésta manera, al establecer captaciones de agua se reduce este flujo, por lo -- que la interfase salina cambia de posición provocando una mayor - penetración del agua salada hacia la formación acuífera.

Si las extracciones de agua dulce superan la recarga del acuífero, no es posible establecer un equilibrio y el agua de mar penetra - lenta pero continuamente hasta alcanzar las captaciones (pozos); ahora bien, si éstas captaciones se establecen sobre masas de --- agua salada, se producirán ascensiones de sal formándose conos sa linos como se muestra en la fig. IV.4, siendo necesario establecer las condiciones de explotación de las captaciones, para que di--- chas ascensiones no las afecten.

La penetración del agua de mar al acuífero puede limitarse mediante barreras físicas, hidráulicas o reubicando las captaciones. --

Todas éstas medidas son sumamente costosas pero algunas veces son necesarias para un mejor aprovechamiento y administración de los recursos disponibles de agua subterránea.

b).- Reducción del flujo de agua dulce al mar.

En un acuífero costero sin explotación el agua dulce se vierte al mar, ya sea a través de corrientes de aguas superficiales o bien subterráneamente; ésta fuga de agua subterránea mantiene una posición de la interfase salina pero se pierde sin más utilidad.

Si se ubicasen bombes para recuperar ésta agua, sería en detrimento del flujo y se tendría que establecer un nuevo equilibrio con el agua de mar, ocasionando con ello una mayor penetración de la cuña salina. Por lo tanto, si se quiere mantener limitada la intrusión salina debe dejarse un cierto flujo de agua dulce al mar, necesario para establecer un equilibrio entre las dos aguas. De ésta manera el aumento de la explotación de cualquier acuífero que sea costero, trae consigo una intrusión, la cual puede permitirse hasta cierto límite, fijado por las afectaciones que se tengan en campos de bombes cuando el agua salada se extienda por debajo de ellos.

Si solo se construyen pozos que tomen agua de la parte superior del acuífero (parcialmente penetrantes), puede permitirse una pro

funda intrusión salina a cambio de recuperar gran parte del flujo de agua dulce vertido al mar; sin embargo, es una forma costosa - por necesitar un cambio en el sistema de captaciones y conducciones.

c).- Utilización de la reserva de una vez.

Si extraemos un caudal "Q" por uno o varios pozos, con la consiguiente reducción en la misma cantidad del flujo de agua dulce al mar, la interfase avanza tierra adentro (fig.IV.1), se producirá - de ésta manera una disminución en las reservas del acuífero cuyo volumen será igual al existente entre la posición inicial y final de la interfase salina. Este volumen es el conocido como "reserva de una vez", por equivaler a una reducción en las reservas iniciales del acuífero.

Esta reserva de una vez puede calcularse aproximadamente de la siguiente manera:

$$V_r = (1/2) b \cdot l \cdot n \cdot d$$

siendo:

$V_r$  : reserva de una vez, en  $m^3$ .

$b$  : espesor del acuífero, en m.

$l$  : avance del pie de la cuña salina, en m.

$n$  : porosidad efectiva de la formación acuífera.

$d$  : longitud de costa (generalmente 1.0 km), en m.

El volumen obtenido de la reserva de una vez puede ser considerable, al grado de que en un acuífero de espesor igual a 50 m, una porosidad efectiva de 0.20 y una avance del pie de la cuña salina de 1000 m, nos dará por cada km de costa un  $V_r = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

La necesidad de desplazar éstos grandes volúmenes de agua provoca que el avance de la interfase sea muy lento, del orden de la velocidad del agua subterránea; todo éste volumen se consume en vertido al mar, si no se establece un método de recuperación del mismo.

La manera de recuperar parte de la reserva de una vez es mediante la construcción de pozos temporales cerca de la costa, pudiéndose hacer también incrementando el bombeo lejos de la costa, incluso deprimiendo fuertemente el nivel de agua subterránea. Estos incrementos en el bombeo deben interrumpirse cuando se haya extraído un exceso de agua, equivalente a la parte recuperable de la reserva de una vez. En todos los casos debe de controlarse cuidadosamente el avance de la interfase salina, con una red adecuada de piezómetros de observación.

En la práctica no es recuperable toda la reserva de una vez ya -- que al iniciarse el bombeo, el flujo de agua hacia el mar se reduce en la cantidad bombeada; sin embargo, en la misma costa apenas varía la posición del nivel piezométrico y de la interfase, lo -- que supone un vertido al mar de una cantidad igual a la inicial. La diferencia entre éste volumen vertido y el volumen que circula

hacia el mar desde el interior, es compensado tomando agua de la reserva de una vez. Al irse desplazando la interfase salina hacia la nueva posición de equilibrio se necesita cada vez tomar menos agua de ésa reserva; éste hecho nos lleva a una disminución notable de la misma. Además, la porción de agua dulce existente bajo el mar (en la zona de la interfase) es irrecuperable.

Enseguida se muestra un ejemplo del cálculo de la reserva de una vez y de la máxima velocidad de avance de la interfase salina:

\* En un acuífero libre costero de 100 m de espesor y porosidad -- efectiva de 0.24, se vierten al mar  $2.0 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  de agua por cada kilómetro de costa. Se establecen a suficiente distancia del mar un sistema de pozos que extraen un caudal en conjunto de ---  $0.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  por km de costa. Calcular de manera aproximada la máxima velocidad de avance de la interfase:

suponiendo un desplazamiento de 1.0 m en la interfase en un movimiento hacia la nueva posición de equilibrio, debe verse al -- mar un volumen de reserva de una vez igual a:

$$V_r = (1/2) \cdot 100 \cdot 1.0 \cdot 0.24 \cdot 1000 = 1.2 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{km de costa}$$

Como inicialmente el caudal vertido al mar se mantiene igual al -- inicial y existe un déficit de aportación de:

$$0.80 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año por km de costa.}$$

el tiempo en consumir la reserva de una vez del primer metro de -

avance será de :

$$t = \frac{V_r}{V_v - V_e} = \frac{1.2 \cdot 10^4}{2.0 \cdot 10^6 - 0.8 \cdot 10^6} = 0.010$$

$V_r$  : reserva de una vez calculada.

$V_v$  : volumen de agua vertido al mar por km de costa.

$V_e$  : volumen de extracción de los pozos por km de costa.

La velocidad inicial de avance de la interfase salina, que es la mayor, es:

$$v = \frac{1.0 \text{ m}}{0.010 \text{ años}} = 100 \text{ m/año}$$

.....

El movimiento de la interfase tierra adentro crea una notable dispersión, la cual junto con el menor arrastre de sales a lo largo de la interfase por su mayor longitud y menor flujo de agua, origina una contaminación salina de parte de la reserva de una vez. Si no se toma ninguna precaución especial, solo será prácticamente recuperable un 25% como promedio de la reserva, aunque los --- cálculos teóricos pueden dar volúmenes mayores (Santing, 1963). En los acuíferos en que la zona de transición es muy espesa, se dificulta realizar los cálculos por no existir una interfase salina bien definida.

d).- Captación en la costa del agua que fluye al mar.

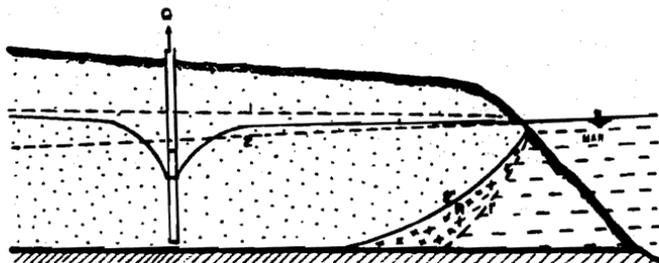
El agua necesaria para mantener una cierta posición de la interfase puede captarse cerca de la costa una vez que ha cumplido su función.

Como éstas captaciones deben establecerse sobre agua salada, deben proyectarse con mucho cuidado para evitar la subida de sal por formación de conos. Generalmente dichas captaciones se realizan por medio de colectores (drenes) o sistemas de pozos puntuales que producen un descenso pequeño del nivel piezométrico y cuyo caudal unitario es también reducido.

Estos colectores no solo permiten aumentar el caudal de seguridad de un acuífero sin producir una apreciable intrusión salina, sino que también pueden servir para forzar la utilización de la reserva de una vez, extrayendo con ellos una gran cantidad de agua en los primeros momentos.

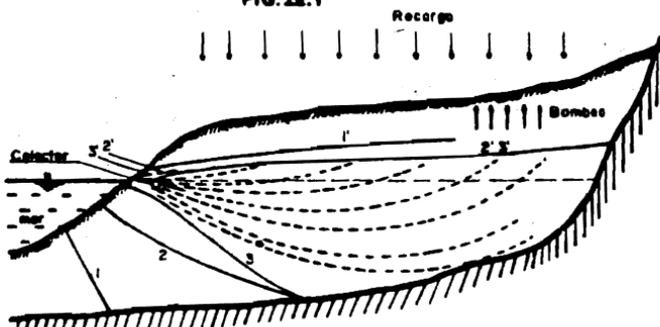
En realidad el colector eleva la posición de la interfase cerca de la costa, pero no su penetración en el acuífero que es lo que se busca (fig.IV.2, niveles 3 y 3').

Las experiencias en un modelo viscoso, obtenidas por Kahana en 1963, muestran que es posible interceptar hasta un 88% del agua vertida al mar, pero él mismo nos dice que en situaciones reales probablemente no se podría rebasar el 50%, sobre todo teniendo en cuenta la contaminación del agua del colector por la interferencia con la zona de dispersión.



1 y 1' Nivel piezométrico e interfase inicial  
 2 y 2' " " " " final, con una explotación Q  
 R, reserva de una vez

FIG. IV.1



Colector para captar las aguas fluyentes al mar en la costa.  
 1 y 1' interfase y nivel freático antes del establecimiento de bombas.  
 2 y 2' " " " " con establecimiento de bombas.  
 3 y 3' " " " " con la instalación adicional del colector costero

FIG. IV.2

TESIS PROFESIONAL

F. I. unan

m. obril g.

#### IV.2. EFECTOS PRODUCIDOS POR LA EXPLOTACION DE ACUIFEROS COSTEROS.

##### a).- Efectos sobre el espesor de la zona de mezcla .

Sabemos que las extracciones de un acuífero costero aumentan el espesor de la zona de transición (mezcla); las causas son las siguientes:

- \* La mayor penetración del agua salada crea un contacto mas largo con un menor caudal de salida de agua dulce.
- \* El desplazamiento de la interfase salina, desde la posición inicial a la final produce una fuerte dispersión.
- \* Las variaciones en el régimen de bombeo producen cambios en la posición de la interfase, que aceleran el proceso de dispersión.
- \* Los pozos situados sobre la cuña de agua salada, producen ascensos salinos que ayudan a la dispersión.

Un ejemplo de lo anterior, son los estudios realizados en Honolulu Hawaii en 1971 por Todd y Meyer, los cuales muestran que, antes de iniciarse la explotación, el acuífero tenía ya una zona de mezcla de 30 a 60 m de espesor; el bombeo prácticamente no ha modificado la posición del límite del agua marina, pero si ha incrementado el espesor de la zona de mezcla que se expande y contrae de acuerdo con los aumentos o disminuciones del gasto extraído.

Frecuentemente los acuíferos tienen heterogeneidades y el avance

de la interfase salina es irregular; siendo más rápido por los estratos más permeables y más explotados, pudiendo dejar capas intercaladas o áreas que conserven agua dulce. Un caso como el anterior ha sido analizado en la parte fuertemente contaminada por agua salada del delta del río Besós (España), donde aún es posible encontrar capas de agua dulce, las cuales se salinizan al cabo de un cierto tiempo de bombeo; también se tienen pozos muy próximos que extraen agua de salinidad diferente, dependiendo de la ubicación de la zona filtrante y la distribución de la heterogeneidad local. Un caso parecido y que se comenta en el capítulo siguiente es el del Valle de Guaymas, Sonora.

En acuíferos fracturados el problema es aún más agudo; en el caso de un acuífero en calizas la presencia de diaclasas normales a la costa conduce a que, mientras que algunos pozos se salinizan al poco tiempo de iniciarse el bombeo otros que no intersectan dichas fisuras no tienen síntomas salinos sino hasta después de un bombeo prolongado.

En acuíferos basálticos suceden fenómenos similares, ya que debido a las fisuras algunos pozos tienen salinizaciones importantes y es posible que otros tengan entradas de agua dulce y agua salada a diferentes niveles entremezclados dependiendo de la heterogeneidad del lugar, del grado de conexión con el mar y del ritmo de explotación del área, siendo difícil predecir de ésta manera los

comportamientos locales. En éstas circunstancias la fórmula de -- Ghyben-Herzberg tiene un valor nulo.

En áreas con un débil espesor de agua dulce, se deben construir - pozos parcialmente penetrantes, de escaso caudal, bien distribuidos y de ser posible con drenes o galerías horizontales, normales al flujo de su base. Asimismo, es recomendable no descender por - debajo del nivel del mar, aunque ello no impide necesariamente -- que las aguas mezcladas, menos densas, asciendan hasta el pozo.

En muchos casos se consiguen resultados aceptables con pozos que descenden por debajo del nivel del mar; ésta diferencia se debe a los diferentes valores de los recursos disponibles de agua subterránea, ocasionados por la variación de caudales extraídos y de la permeabilidad de los estratos.

b).- Efectos sobre acuíferos semiconfinados.

La explotación de acuíferos costeros semiconfinados puede origi-- nar una infiltración de aguas salinas a través de los niveles --- semipermeables, combinada con un posible desplazamiento del agua dulce directamente dentro del acuífero. El desplazamiento del --- agua salada por los niveles semiconfinantes, es un fenómeno muy - lento y permite explotar el acuífero con niveles por debajo del - nivel del mar durante mucho tiempo sin que se produzca contamina-- ción apreciable.

c).- Formación de conos de agua salada debajo de las captaciones.

Si en un acuífero existe un nivel de agua salada inferior, al establecerse el bombeo en un pozo que penetra la parte superior, se establece un flujo horizontal en todo el espesor del acuífero pero la mayor densidad del agua salada dificulta la ascensión hacia el pozo; el agua salada alcanzará o no al pozo según sea el descenso producido y la penetración del mismo en el acuífero ( fig.- IV.3 ), en cambio el agua salobre de la zona de mezcla al tener menor densidad que el agua salada puede ascender con mayor facilidad y contaminar el agua que se está bombeando.

El fenómeno de la formación del cono salino requiere de un cierto tiempo, durante el cual se obtiene solo agua dulce; el fenómeno se producirá con mayor rapidez e intensidad, entre mayor sea el caudal de bombeo.

Existe un ascenso crítico, de modo que una vez alcanzado por la interfase salina, la subida de sal al pozo es brusca, de ésta forma puede establecerse un caudal crítico de tal manera que los bombeos a caudal menor no produzcan subida de sal en los pozos.

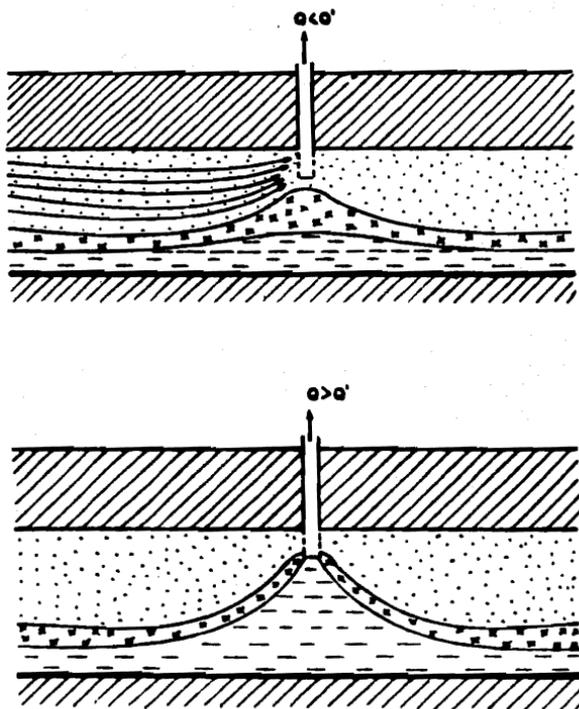
En general el aumento de salinidad en el agua bombeada a caudal constante es aproximadamente logarítmico, de modo que representándose gráficamente la salinidad en función del logaritmo del tiempo, obtendremos una recta.

Si el agua salada existente debajo de los pozos o drenes es la correspondiente a una cuña de agua salada costera, el movimiento de

la zona de mezcla limita su crecimiento en espesor; sin embargo, si el bombeo provoca una elevación de la interfase de tal manera que debajo del pozo se produce un punto de gradiente horizontal nulo de la interfase, o punto de estancamiento (fig.IV.4), el arrastre de sales hacia el mar no puede continuar por lo que se acumulan en ése punto, produciéndose con facilidad la subida de agua salada.

El descenso y penetración del pozo puede ser superior o inferior al nivel del mar para no tener contaminación importante; dependiendo del flujo de agua dulce al mar, de las condiciones de la interfase salina y de forma muy importante de la estratificación del terreno. Si la permeabilidad vertical es notablemente menor que la horizontal, la subida de sal se ve impedida y aún más si existen intercalaciones y lentes de materiales muy poco permeables.

Cuando un pozo se ha salinizado por ascenso de sal y se le deja en reposo un tiempo, después puede volver a extraer agua dulce; en parte el cono de agua salada se ha hundido, pero otra parte, en especial la formada por agua salobre, se desplaza horizontalmente de acuerdo con el flujo de agua subterránea. Este cono de salino puede llegar a interferir con otros pozos situados en la dirección del flujo.



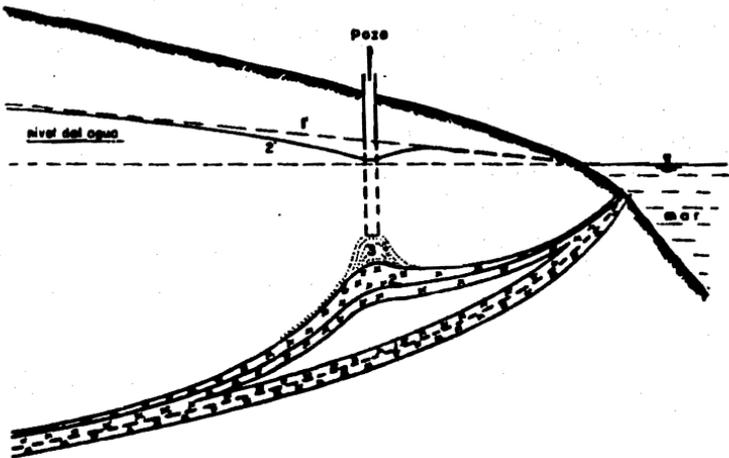
Formación de conos de agua salada y sobre.  $Q_c$  = gasto crítico

FIG. IV. 3

TESIS PROFESIONAL

F. I. unam

m. abril 9.



Subida de sal debajo de un pozo

1 posición inicial de la interfase y su zona de mezcla

f nivel del agua subterránea inicial.

2 posición de la interfase y su zona de mezcla después de iniciado un bombeo cuyo

nivel de agua subterránea es Z.

3 formación del cono salino.

FIG. IX. 4

TESIS PROFESIONAL

F. I. unom

m. abril 8.

El ascenso de agua salada de las maneras hasta aquí citadas, puede evitarse disminuyendo el potencial de aquella; la disminución de éste potencial puede hacerse explotando dos pozos próximos, -- uno ranurado en el agua dulce y otro en el agua salada o bien, -- colocando dos bombas en el mismo pozo, la inferior extrayendo el agua salobre o salada que penetra por el fondo; sin embargo, el sistema es costoso en cuanto a instalación se refiere y se necesita de un equipo generalmente de costo elevado, para evacuar al mar el agua salada o salobre de tal manera que no se infiltre o perjudique otras actividades como lo es a la agricultura. Además el control y regulación de los bombeos es delicado, pues un sobre bombeo en la bomba inferior puede originar un desperdicio de agua dulce y un subbombeo no evitaría la contaminación del agua extraída. El caudal de ambas bombas debe establecerse de manera que la división de las aguas que van a cada pozo, esté por encima de la interfase salina.

d).- Efectos producidos por la construcción de obras de Ingeniería.

Las obras de ingeniería que requieren extracciones de agua mediante pozos o drenes temporales o permanentes, alteran el equilibrio de la interfase salina provocando una mayor penetración de ella o bien la formación de conos salinos. Entre algunas de esas obras - podemos citar los drenajes para excavaciones, las obras de sanea-

miento, las excavaciones de zanjas profundas para la evacuación de aguas de tormentas o el drenaje de túneles, galerías o sótanos, el acondicionamiento de las desembocaduras de los ríos y canales para navegación. Un ejemplo clásico es la contaminación marina provocada por el ahondamiento de canales de evacuación de aguas de tormenta y el establecimiento de canales de navegación deportiva en Miami, Florida, E.U.A.

Las obras de ingeniería o trabajos que provocan una disminución de la recarga del acuífero, tales como pavimentaciones, establecimiento de embalses de superficie et., disminuyen el flujo de agua dulce al mar y por lo tanto permiten una mayor penetración del agua salada; en cambio, otro tipo de obras pueden ocasionar una mayor recarga, como el establecimiento de cultivos regados por canales, con el consecuente mantenimiento de una escasa penetración de la interfase salina.

El abandono de pozos salinizados puede provocar una recuperación de niveles del agua subterránea, creando problemas de estabilidad en edificios y estructuras construidas en épocas en que los niveles fueron bajos y no existían problemas de agua en las cimentaciones.

En los procesos de salinización de acuíferos confinados, la propia construcción del pozo puede tener un papel muy importante si

por un defecto de acabado o por no tomarse las debidas precauciones, el agua salada de otros acuíferos a mayor potencial o durante el bombeo, pasa entre la pared del pozo y el tubo o penetra a través de poros o puntos de corrosión

#### IV.3. METODOS DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA INTRUSION SALINA.

Existen varios métodos para prevenir o controlar el avance de la interfase salina, cada uno de ellos con sus características funcionales y apropiado para unas condiciones determinadas. A continuación se describen cada uno brevemente, enumerando los inconvenientes de cada método y haciendo un análisis comparativo entre los mismos. Finalmente se establecen algunas alternativas para la recuperación del agua dulce vertida al mar, así como para la explotación de acuíferos costeros, basadas en éstos métodos.

##### a).- Disminución del bombeo.

Si la explotación es superior a la recarga o bien, aún cuando no lo sea, produce una penetración indeseable de la interfase salina, puede procederse a reducir el bombeo hasta que la posición de equilibrio sea la deseada. Este procedimiento tiene los inconvenientes siguientes:

\* Se pierde al mar agua dulce necesaria para mantener la posición

deseada de la interfase salina. Puede recuperarse parte de esa agua con colectores costeros, pero es complicado y costoso en su construcción y no siempre efectivo.

- \* Si la interfase ha rebasado por sobrebombeo el límite máximo - admisible de penetración, el retroceso es tan lento como el mismo avance.
- \* La reducción del bombeo supone encontrar un nuevo abastecimiento de agua a costo accesible.
- \* No siempre es fácil establecer las herramientas legales, precisas para controlar y reducir los bombeos.

b).- Reubicación de los centros de bombeo.

Si la intrusión es debida a una excesiva concentración del bombeo en unos pocos lugares próximos a la costa o, a la explotación de pozos sobre la interfase, se puede proceder a reubicar dichos pozos o distribuirlos mejor. Los inconvenientes de éste método son:

- \* El paro de algunos pozos para construir y operar otros nuevos es costoso.
- \* La reubicación puede traer consigo, el establecimiento de nuevas conducciones.
- \* No se consigue reducir con esto el flujo de agua dulce vertido al mar.

c).- Recarga artificial.

Suponiendo una adecuada distribución de las captaciones puede -- compensarse el sobrebombeo mediante recarga artificial en los lugares apropiados. El método tiene como inconvenientes:

- \* Es preciso disponer de agua a bajo costo para la recarga.
- \* El establecimiento de la recarga es caro y no siempre es posible realizarla en la forma deseada.
- \* No se consigue reducir el vertido de agua dulce al mar.

Si se dispone de agua de recarga y ésta es de calidad adecuada y se recibe a un caudal regulado, en general es más fácil y barato distribuirla directamente y reducir el bombeo.

El control de la intrusión salina por recarga artificial cuando el agua de recarga necesita ser tratada y regulada, es conveniente solo cuando dicho tratamiento y regulación se puede conseguir económicamente por infiltración y almacenamiento en el terreno.

El agua de recarga puede proceder de:

- Retención de aguas de avenidas en ríos. Si procede de ésta manera, se necesita de un sistema que permita infiltrarlas rápidamente, como lo es la recarga por extensión.
- Agua traída por canal desde otras cuencas. Solo es apta para recarga, la diferencia entre el caudal máximo y la demanda; la recarga se puede hacer por medio de pozos o bien por extensión.

La conducción del agua desde los lugares de recarga a los puntos

de bombeo, puede hacerse a través del propio acuífero si éste -- es suficientemente permeable; en caso contrario, la recarga debe hacerse cerca de los lugares de bombeo y con un régimen similar.

d).- Establecimiento de barreras físicas.

Si en la costa se establece una barrera impermeable que afecte - los acuíferos, se producirá un aislamiento de éstos con el mar y por lo tanto no se producirá la intrusión salina, pudiéndose utilizar al máximo los recursos de agua subterránea. Los principa-- les inconvenientes de éste método son:

- \* Los costos de construcción son muy elevados.
- \* Es difícil que sea totalmente efectivo.
- \* Su mantenimiento en general es muy barato, pero puede volverse caro en zonas en que existen movimientos del terreno o sismos -- frecuentes; asimismo, el aumento de la explotación del agua sub-- terránea o el progresivo incremento de la presión del mar al descender los niveles de agua dulce pueden también afectar a la ba-- rrrera.
- \* Solo pueden establecerse en acuíferos de escasa profundidad y escaso potencial.

Estas barreras pueden consistir en el establecimiento de tables-- tacas, relleno de zanjas con arcilla, cemento o asfalto, o inyecciones a presión de cemento, bentonita, sustancias bituminosas -

u otras sustancias químicas como el gel de sílice, a través de -  
sondeos colocados juntos uno del otro y a lo largo de la costa;-  
pudiéndose inyectar también aire a presión.

El aire inyectado a presión en el terreno y a lo largo de una -  
línea de pozos, reduce la permeabilidad del medio para la circu-  
lación del agua; éste aire puede tomarse "in situ" eliminándose  
así la necesidad de conducciones, siendo su manejo barato. La --  
técnica es conocida a través de los trabajos de explotación pe-  
trolífera y almacenamiento de gas en el terreno, pero la aplica-  
ción para el control de la intrusión salina ha sido solo utiliza-  
da en laboratorios.

El establecimiento de barreras físicas, permite una intensa uti-  
lización del acuífero como embalse subterráneo.

#### e).- Barrera hidráulica de inyección.

Si a lo largo de la costa se establece una recarga de tal manera  
que en cualquier punto se tenga una elevación piezométrica supe-  
rior al potencial de agua dulce preciso para evitar el flujo de  
agua salada hacia el interior, se tiene un efectivo control de -  
la intrusión salina. Como el potencial de agua dulce en agua sala-  
da crece con la profundidad, cuanto más profundo sea el acuífero  
mayor tendrá que ser la elevación piezométrica que debiera crearse.

En acuíferos libres la barrera hidráulica puede establecerse me-  
diante un canal, zanja o campos de recarga paralelos a la costa,

o bien mediante una línea de pozos próximos. (fig. IV.5).

En el caso de acuíferos confinados cuyo techo sea profundo, la barrera debe establecerse mediante una línea de pozos próximos - uno de otro; la separación de los pozos está ligada al costo de construcción, mantenimiento y el mayor consumo de agua necesario para mantener un nivel mínimo entre ellos, que será tanto mayor cuanto más separados se encuentren.

Es frecuente que el nivel del agua en los pozos sea superior al del terreno, en cuyo caso es necesaria una buena cementación exterior a fin de evitar que el agua fluya entre el tubo y el terreno; si tales fugas existiesen, no solo no sería efectiva la barrera sino que también se podrían producir daños a estructuras, edificios, etc., por la anegación de terrenos.

Los inconvenientes del método son los siguientes:

- \* Si la barrera es de pozos, el costo es muy elevado.
- \* El agua de inyección es costosa, en especial si debe introducirse mediante pozos, siendo preciso disponer de ella en cantidades suficientes.
- \* El mantenimiento de los pozos es caro y complicado; reduciéndose se mediante zanjas y aún más con campos de extensión.
- \* Puede ser muy difícil establecer campos de extensión o canales en una zona poblada al no disponerse de espacio, por ser los terrenos caros o por no ser estéticamente deseable. El establecimiento de pozos presenta menos problemas, sin embargo la eva

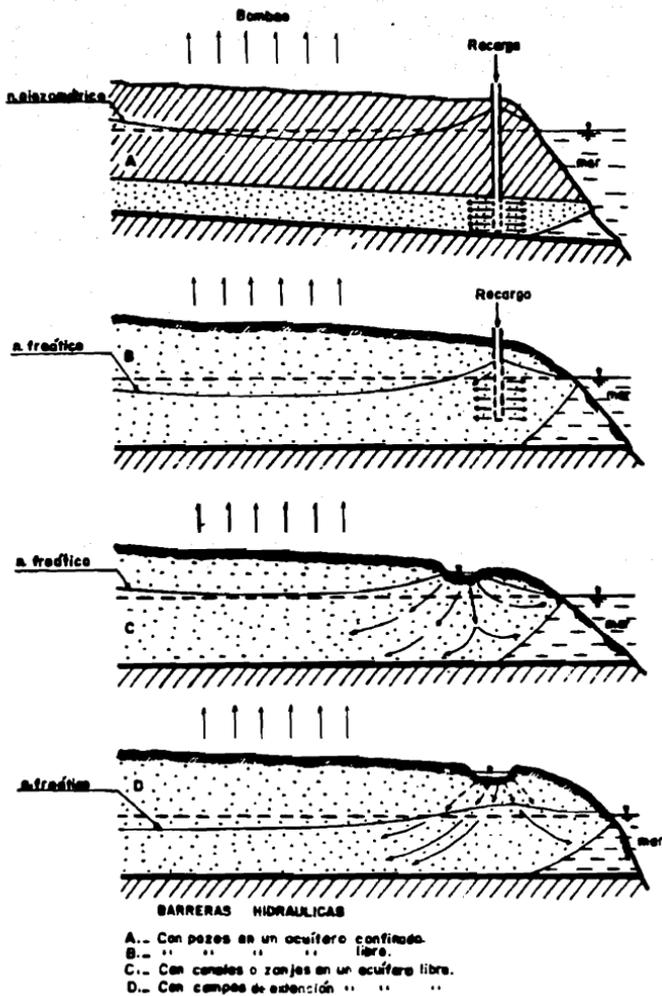


FIG. IV. 5

TESIS PROFESIONAL

F. I. unam

M. abril 9.

cuación de las aguas extraídas en las limpiezas periódicas necesarias para mantener la capacidad de inyección, puede ser un problema molesto.

- \* El costo de conducciones en caso de inyección con pozos, es en general muy elevado.

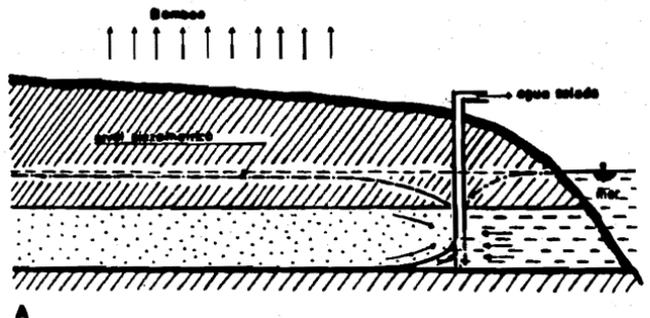
La barrera hidráulica tiene como ventajas que no necesita de una limitación en el bombeo y se puede utilizar la máxima capacidad de almacenamiento del acuífero; el flujo de agua dulce al mar es nulo, excepto una pequeña parte del agua inyectada cuya recuperación puede no tener interés si su calidad es mediocre, como sucede en el caso de la costa de Los Angeles, Calif., E.U.

f).- Depresión del bombeo.

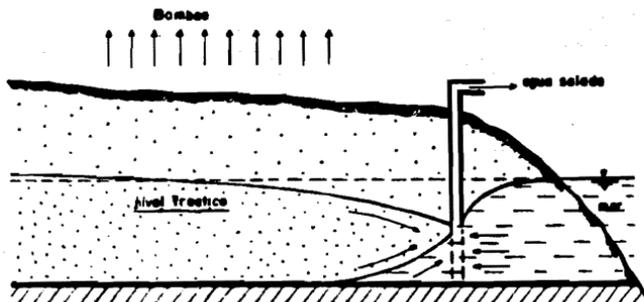
La limitación de la penetración del agua salada también puede lograrse estableciendo una línea de bombeo dentro de la interfase salina a lo largo de la costa, de tal manera que intercepte todo el flujo de agua salada hacia el interior del continente.

Es necesario que la depresión producida en cualquier punto sea inferior a los niveles piezométricos del agua dulce (fig.IV.6).

La penetración masiva de agua salada queda limitada a la línea de pozos de bombeo, pero detrás de ella aún existe una cuña de agua salada cuya penetración tiene que ser limitada permitiendo un cierto flujo de agua dulce hacia la depresión de bombeo.



A



B

Establecimiento de una depresión de bombeo en: A acuífero confinado  
B acuífero libre

FIG. IV. 6

TESIS PROFESIONAL	
F. I. unam	M. abril 9.

Los inconvenientes principales de éste método son:

- \* La barrera es cara en construcción y mantenimiento.
- \* El agua salada bombeada debe enviarse al mar sin que produzca contaminaciones. El costo de éstas conducciones es elevado.
- \* Se pierde agua dulce al mar a través de los pozos de bombeo.
- \* Al tener que estar los pozos de bombeo de agua salada a cierta distancia de la costa, se pierde volúmen útil del acuífero al ser grande la parte invadida por el agua salada, en especial en zonas muy llanas.
- \* Es necesario reducir extracciones si se quiere mantener estable la cuña salina situada detrás de la barrera de pozos; por lo menos la extracción de agua dulce debe ser inferior a la recarga.

La instalación de depresiones de bombeo puede estar justificada en casos en que se pretenda reducir una intrusión salina ya existente, pero al cabo de cierto tiempo debe usarse otro método de control. También puede estar justificado su uso cuando sea necesario mantener un flujo de agua dulce al mar, para mantener el balance de sales en el agua dulce

g).- Alternativas para la recuperación del agua dulce vertida al mar y la explotación de acuíferos costeros.

La recuperación del agua vertida al mar en los acuíferos costeros es importante. Las posibles alternativas para poder llevar a

cabo esa recuperación son las siguientes:

- Incrementar el bombeo permitiendo una mayor penetración de la interfase salina, reubicando si es necesario las captaciones. De ésta manera no se reduce completamente el flujo de agua dulce al mar, aunque puede lograrse una mayor reducción mediante colectores costeros.
- Establecer barreras de inyección costeras con agua propia (de reuso) o bien con agua traída de otros lugares.
- Establecer depresiones de bombeo, combinadas o no con barreras de inyección, dejando fluir cierta cantidad de agua dulce al mar o a los pozos de extracción de agua salada.
- Establecer barreras físicas, aunque este procedimiento aparece técnica o económicamente inviable en muchos casos.
- Recarga artificial de agua traída de otros lugares o de aguas de reuso con diferentes esquemas de recarga y bombeo.
- Permitir una profunda intrusión salina, extrayendo el agua dulce con numerosas captaciones de escasa profundidad y pequeño caudal. Con ésto se consigue reducir mucho el vertido de agua dulce al mar y es posible, con una política adecuada de explotación, aprovechar gran parte del almacenamiento de agua dulce. Con éste método se pierde gran capacidad de regulación y es preciso establecer embalses de superficie ya que el acuífero no soporta sobreexplotaciones temporales en épocas de sequía sin que se produzcan salinizaciones.
- Combinación de las anteriores alternativas.

En todo análisis de alternativas de éste tipo, es necesario considerar no solo la cantidad de agua disponible, sino también su calidad y evolución con el tiempo ya que toda reducción de flujo de agua dulce al mar implica una modificación del balance de sales, con incremento de salinidad. Su consideración es especialmente importante cuando existe recarga con aguas residuales o -- excedentes de riego, o bien en el caso de que se espere una gran dispersión en la zona de la interfase salina.

En ciertos casos puede recurrirse a una optimización de las alternativas, pero esto requiere de un buen conocimiento del acuífero mediante modelos de simulación y sobre todo con datos económicos.

## CAPITULO V

### APLICACION EN EL VALLE DE GUAYMAS, SONORA. (\*)

#### V.1. INTRODUCCION

Varias de las zonas de irrigación de nuestro país, situadas en -- planicies costeras de zonas áridas y semi-áridas, cuentan con un problema provocado principalmente por la sobreexplotación a que -- se encuentran sometidos los acuíferos del lugar.

Esto ha sido causa de diversos problemas entre los que podemos -- mencionar, la disminución considerable de los recursos disponi--- bles de agua subterránea y el daño de carácter irreversible causa do por el fenómeno de la Intrusión Salina.

Un ejemplo de éste fenómeno es el que se presenta en el Valle de Guaymas, Son., siendo este el que se muestra a manera de ejemplo de aplicación de los conceptos enunciados en los anteriores capítulos (Planos 1 y 2).

El agua subterránea que se localiza en este valle, así como en -- los de San José y Cruz de Piedra, en los actuales municipios de -- Guaymas y Empalme, constituyó la base para la rápida expansión del mismo el punto de apoyo para la instalación de servicios y activi dades relacionadas principalmente con la agricultura y la pesca.

El gran crecimiento de la agricultura, motivó que las medidas ---

(\*) Capítulo desarrollado en base a los estudios que esta elabo--- rando la Subdirección de Promoción y Programas de Grande Irri gación de la S A R H.

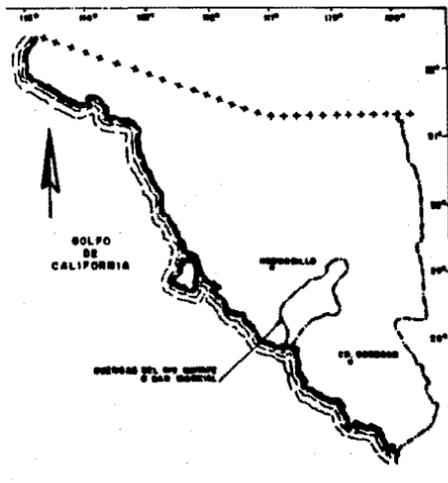
para racionalizar la explotación del recurso subterráneo, no en--  
contrasen respuesta y que las previsiones para conocer el compor--  
tamiento del acuífero, fuesen rebasadas por su virtual agotamien--  
to y contaminación a la que se vió sometido. Así, el poco apego -  
de los usuarios a los reglamentos, junto a otros problemas de ca--  
rácter económico, forman la problemática de la región, apoyada --  
básicamente en la sobreexplotación del acuífero con los efectos -  
causados por ella como son, el pronunciado abatimiento del nivel  
freático que nos lleva a una inversión del gradiente hidráulico,-  
propiciando así la entrada del agua marina hacia las reservas de  
agua subterránea.

Para la investigación del problema que se presenta en éste Valle,  
la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, decidió per--  
forar pozos de estudio (pozos testigo), cuya información propor--  
cionada por ellos, aunada a información geohidrológica adicional,  
sirvió para la implementación de modelos de simulación para pre--  
decir el comportamiento de los niveles piezométricos y el avance  
del agua salada hacia la formación acuífera.

Enseguida se presenta de manera breve, el proceso que se siguió -  
en la perforación de éstos pozos de estudio, así como la manera -  
en que se interpretaron los resultados obtenidos de los modelos -  
de simulación.

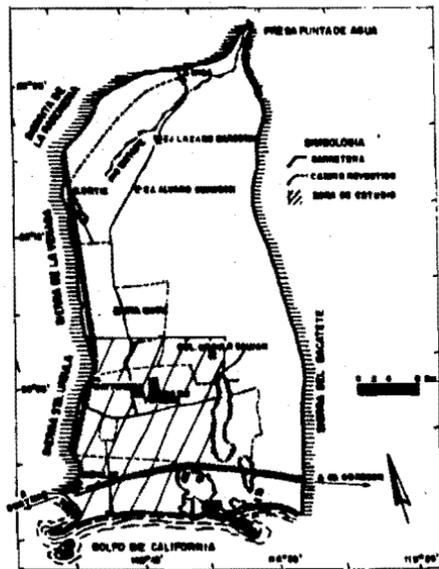


LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO



PLANO No. 1

VALLE DE GUAYMAS, SON.



PLANO No. 2

## V.2. CONSTRUCCION DE POZOS DE ESTUDIO EN LA COSTA DE GUAYMAS

La interpretación de los cortes litológicos y registros eléctricos de los pozos en explotación dentro del Valle, así como la historia piezométrica y geoquímica de los mismos, indicaron la complejidad geohidrológica de la porción costera del acuífero del valle, viéndose la necesidad de hacer exploraciones directas en la franja costera, que permitieran definir claramente la estratigrafía subterránea, las diferentes cargas piezométricas y los contenidos salinos en cada una de las formaciones acuíferas, así como la observación periódica de la calidad del agua subterránea.

La construcción de pozos de estudio o pozos testigo para éstos fines, constituye un buen ejemplo de su funcionamiento para nuestro caso. La terminación de proyecto y la que se dió finalmente a dos de ellos se muestran en la figs. V.1 y V.2 y la ubicación de los ocho pozos perforados con los mismos fines se muestran en el Plano 3. En éstos cortes técnicos se puede observar la instalación de piezómetros a diferentes profundidades, ubicados en estratos acuíferos con diferentes características geohidrológicas y aislados entre sí dentro del pozo mediante la colocación de capas de materiales finos.

La construcción de éstos pozos se realizó en forma general de la siguiente manera:

- \* Equipo: máquina rotatoria directa.
- \* El diámetro de perforación fue de 8" (203.2mm).
- \* La profundidad fue variable entre 200 y 250 m aproximadamente, hasta que se penetró dentro de la formación Arcilla Azul, quedando plenamente confirmada su presencia mediante muestreo.
- \* Muestreo: se tomaron muestras de canal a intervalos de 5 m de profundidad y cada vez que se notó un cambio en el tipo de material perforado.
- \* Análisis químicos de lodos de perforación: durante el proceso de perforación se tomaron muestras del lodo de perforación en la salida del pozo y en la succión en la fosa de lodos a intervalos de cada metro.
- \* Clasificación de muestras: de los dos tipos de muestras que se tomaron en cada intervalo de 5 m y las intermedias que se obtuvieron en la salida del pozo para las determinaciones químicas, se hizo una clasificación megascópica durante la perforación, con el objeto de estar en posibilidades de detectar cualquier cambio.
- \* Registro de las observaciones: se llevó un registro escrito y gráfico en el pozo, que indica la litología y las características químicas de los filtrados en la succión y en la salida del pozo.
- \* Registro eléctrico: una vez confirmado por el muestreo, la presencia de la arcilla azul en un tramo mínimo de 10 m, se circuló el lodo dentro del pozo, con el objeto de eliminar en lo --

posible los cortes, corriéndose un registro eléctrico de potencial natural y de resistividad con electrodos múltiples. Igualmente se midió la temperatura máxima en el fondo del pozo, la resistividad y temperatura del lodo en la fosa de lodos.

- \* Entubación y limpieza del pozo: una vez concluida la toma de -- registro eléctrico, se entubo el pozo con ademe de 6" (152.4mm). Después de terminada la entubación del pozo se procedió a su -- limpieza, primero mediante la circulación con agua limpia y después con aire.
- \* Instalación de tubos piezométricos: durante las maniobras de entubación y limpieza del pozo, se revisó toda la información obtenida con anterioridad para decidir sobre la instalación de -- piezómetros, así como su cantidad y posición. Se requirió aislar cuando menos tres tramos dentro de los pozos, lo cuál se logró mediante la instalación de un tubo de 2" (50.8mm) de diámetro ranurado en su extremo inferior, el cual se colocó dentro del ademe empacado en un colchón de grava para filtro. El primer tramo por aislar se separó por medio de una capa de arena seguida de un tramo de lechada de cemento. Posteriormente se rellenó el pozo con suelo cemento hasta la base del siguiente tramo por aislar. La instalación del siguiente tubo se hizo de acuerdo con la misma secuela ya descrita para el primero. -- Solo en los primeros pozos se aplicó la lechada de cemento, dejando en todos los demás solo el suelo cemento.



### V.3. CONDICIONES GEOHIDROLOGICAS EN LA ZONA COSTERA DEL VALLE.

La perforación de estos pozos de estudio, la interpretación de exploraciones indirectas e información existente, permitió determinar que entre el litoral del Golfo de California y los ejidos de "Maytorena" y "Mi Patria es Primero" (fig.V.3), el sistema acuífero conocido como superior, está constituido por dos estratos acuíferos que descansan sobre una formación de Arcilla Azul.

El primer estrato acuífero denominado "superior" se encuentra en los primeros 60 m de profundidad, bajo éste se encuentra una formación arcillosa café con un espesor aproximado de 30 m; por debajo de la arcilla café se encuentra un segundo estrato acuífero denominado "intermedio" y que tiene un espesor promedio de 50 m.

En la parte superior de la arcilla azul se encuentra un estrato permeable lenticular formado por fósiles marinos, el cual se le llama "inferior" no siendo de mucho espesor, sin embargo contiene agua de buena calidad.

Cabe aclarar que en base a exploraciones anteriores, se encontró un acuífero por debajo de la arcilla azul, el cual por su geología y profundidad no se consideró.

El cuerpo acuífero superior se encuentra directamente conectado con el mar en la línea de costa y ha sido intrusionado aproximadamente hasta el ejido Maytorena, donde se encuentra totalmente drenado sobre la arcilla café.

El acuífero intermedio se encuentra conectado con el superior a -

través de la arcilla café semipermeable, teniendo una permeabilidad menor que la del acuffero superior a lo largo de la línea de costa, lo que lo aísla en parte del mar. El acuffero inferior parece estar conectado con el intermedio a través de la formación semipermeable de arcilla azul, pero sin comunicación aparente con el mar. Este último acuffero ha sido identificado cerca de la carretera costera presentando buena calidad de agua, aunque su extensión llega más al norte de Maytorena y Mi Patria es Primero.

Estos tres cuerpos acufferos presentan cargas piezométricas diferentes, siendo mayor la del acuffero superior que la del intermedio, pero en algunos sitios donde se conoce la piezometría del acuffero inferior, ésta es mayor que la del superior.

Debido al efecto de la sobreexplotación, en 1974 se tenía ya una elevación piezométrica mínima de 40 m.b.n.m. en el acuffero intermedio, localizada en los alrededores del ejido Maytorena ( ver -- Plano 4 ). El acuffero superior presenta también una depresión en el lugar anterior, aunque en el centro del cono éste acuffero ya se encuentra completamente drenado.

Finalmente, la piezometría del estrato acuffero localizado dentro de la arcilla azul no pudo ser definida debido a que se tienen únicamente unos cuantos pozos los cuales no están completamente aislados.

SECCION ESQUEMATICA

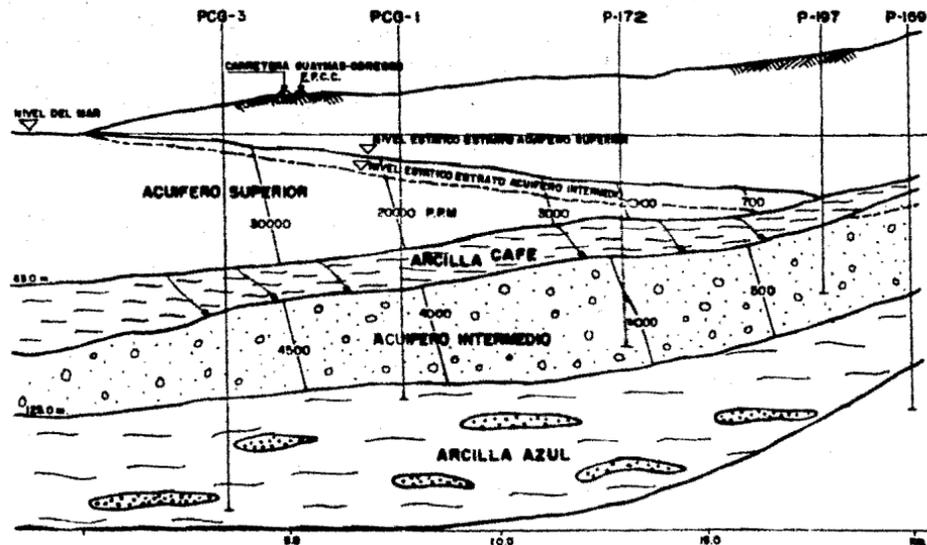
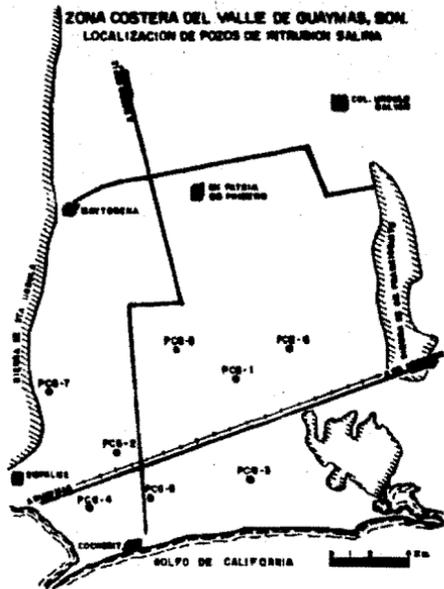
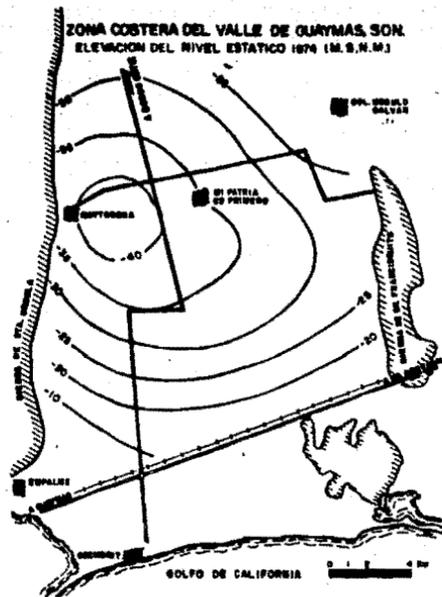


FIG. X. 3



**PLANO No. 3**



**PLANO No. 4**

#### V.4. FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO DEL SISTEMA ACUIFERO.

El funcionamiento hidráulico del valle para cada uno de los estratos acuíferos, de acuerdo a la interpretación de la información procesada es el siguiente:

La explotación inicial se llevó a cabo en el acuífero superior - provocando con el tiempo una depresión piezométrica que dió lugar a la inversión de los gradientes hidráulicos, propiciando de ésta manera la invasión del agua salada tierra adentro. Durante éste tiempo, las elevaciones piezométricas, mayores en el acuífero intermedio que en el superior, hicieron que parte del agua extraída de éste último proviniera del almacenamiento del intermedio.

Al empezar a sentirse los efectos de la salinización del acuífero superior, los pozos cercanos a la costa fueron profundizados, captando el acuífero intermedio con agua de mejor calidad. Sin embargo, la sobreexplotación volvió a propiciar una depresión piezométrica de tal manera que los niveles de éste acuífero intermedio - llegaron a ser menores que los del acuífero superior, dando lugar a que la sal que se encontraba en éste último empezara a filtrarse en forma vertical descendente, invadiendo el segundo estrato acuífero independientemente de la contaminación que recibía directamente del mar.

Por lo que toca al estrato acuífero inferior, la calidad del agua

es buena por encontrarse intercalado en la formación arcilla azul, no presentándose índices de intrusión salina; sin embargo, su potencialidad es reducida por estar confinado y ser de bajas dimensiones.

#### V.5. APLICACION DE MODELOS DE SIMULACION

De acuerdo al funcionamiento hidráulico se implantaron dos modelos; el primero, es el modelo de simulación del comportamiento de los niveles estáticos, llevándose a cabo para una área comprendida entre el Bordo Ortiz y el Golfo de California, en su parte norte y sur respectivamente y lateralmente por las formaciones impermeables de Sierra de Santa Ursula y La Venada, así como de San -- Francisquito; el segundo modelo es el de simulación del avance del agua salada en el acuífero, aplicándose en un área menor y que se muestra en el Plano 2.

Para el primer modelo se llevaron a cabo varias corridas de predicción de los niveles estáticos, con diferentes políticas de extracción (Planos 5, 6, 7, 8). Las que se consideraron más representativas para la franja costera, fueron las siguientes:

\* Mantener una extracción similar a la del período 1974-1975, hasta el año de 1985.

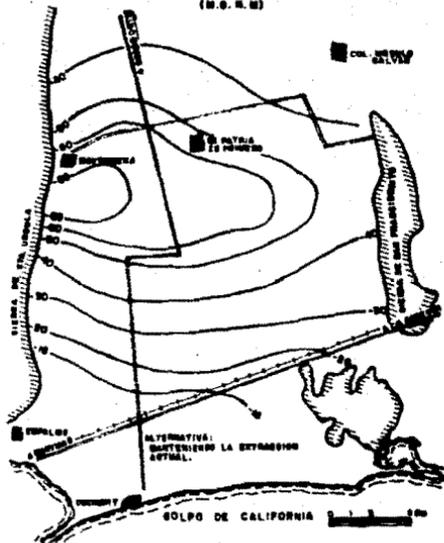
- \* Suspender en forma inmediata y total la extracción en una franja costera de 14 km, manteniendo la extracción actual en el resto del valle.
- \* Suspender en forma total e inmediata el bombeo en todo el valle.
- \* Disminuir la extracción en un 60% en una franja costera de 14 kilómetros, manteniendo la extracción actual en el resto del valle. Esta disminución se haría en forma escalonada en un lapso de 5 años.

Tomando en el cálculo las diferentes opciones de extracción, los pronósticos obtenidos para cada una de ellas son los siguientes:

De acuerdo a la primera política, el volumen de extracción fue de 190 millones de  $m^3$  al año, teniéndose para el año de 1985 elevaciones del nivel estático, del orden de los 55 m.b.n.m., con valores mínimos de 60 m.b.n.m. (Plano 5) y profundidades del mismo superiores a los 100 m con respecto al brocal de los pozos, en algunas zonas.

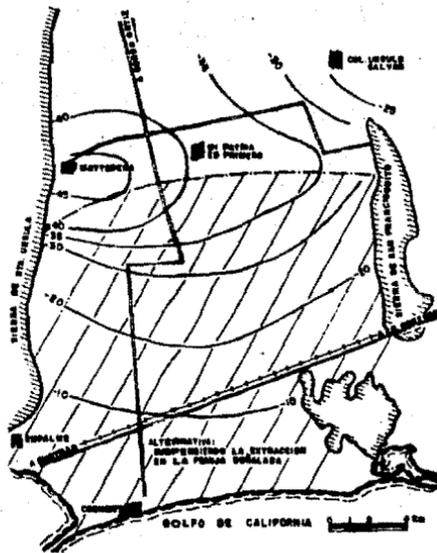
En la segunda política, el volumen de extracción fue de 120 millones de  $m^3$ , teniéndose para 1985 la elevación del nivel estático, en su parte más crítica, del orden de los 47 m.b.n.m. (Plano 6), correspondiendo a una profundidad de 80 m con respecto al brocal de los pozos.

ZONA COSTERA DEL VALLE DE GUAYMAS, SON.  
ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO PARA 1986  
(M.S.N.M.)



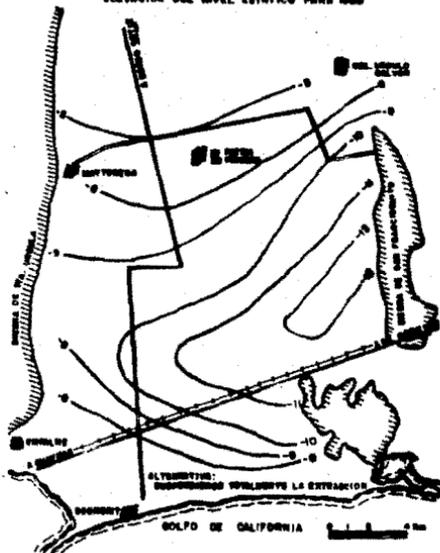
PLANO No. 5

ZONA COSTERA DEL VALLE DE GUAYMAS, SON.  
ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO PARA 1986 (M.S.N.M.)



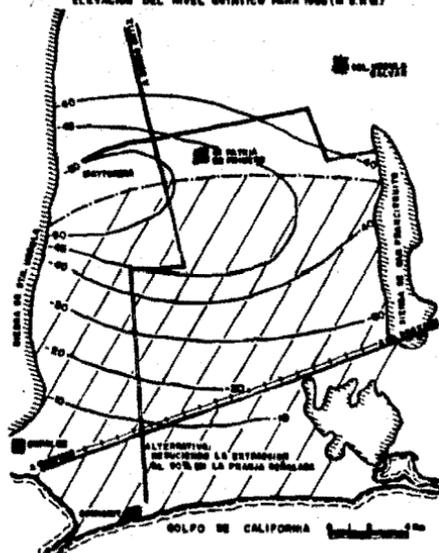
PLANO No. 6

ZONA COSTERA DEL VALLE DE GUAYMAS, SON.  
ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO PARA 1980



PLANO No. 7

ZONA COSTERA DEL VALLE DE GUAYMAS SON.  
ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO PARA 1990 (M S.N.M.)



PLANO No. 8

En la tercera opción, donde se consideró que la extracción se sus-  
pende totalmente en el valle, los niveles estáticos para 1985 se  
encontrarían todavía en 15 m.b.n.m. solo que en diferente posición  
a la actual (Plano 7).

Para la cuarta alternativa, se obtuvieron volúmenes de extracción  
de 160 millones de  $m^3$  por año, teniéndose para el año de 1985 ele-  
vaciones del nivel estático de 52 m.b.n.m., en su punto más críti-  
co (Plano 8)

Por lo que respecta al segundo modelo, el de simulación del avan-  
ce de agua salada dentro del acuífero, una vez calibrado se defi-  
nió lo siguiente:

El coeficiente de transmisibilidad del acuífero intermedio tiene  
valores aproximados del orden de  $5 \cdot 10^{-3} m^2/seg.$  en la franja --  
costera y el coeficiente de dispersión varía entre  $5 \cdot 10^{-6}$  y --  
 $5 \cdot 10^{-1} m^2/seg.$  Esta variación del coeficiente de dispersión se  
debe a que no todo el frente costero del valle corresponde a una  
zona de intrusión salina, ya que la parte central costera tiene -  
los mayores coeficientes de dispersión y los bordes oriental y --  
occidental los menores. De ésta manera se define un camino prefe-  
rente de la intrusión, que va de sur a norte hasta la carretera -  
costera y posteriormente del sureste hasta el centro de la depre-  
sión piezométrica.

Con este modelo se procesaron las primeras cuatro alternativas -- previamente analizadas con el modelo anterior.

En la primera, el resultado obtenido fue que para 1985 se tendría un avance de la interfase salina de 6 km tierra adentro, considerando la curva de 3000 ppm de sólidos totales disueltos respecto a su posición en 1974 como curva de invasión, por ser éstas concentraciones o mayores las que marcan en forma significativa la evolución de éste fenómeno.

En la segunda opción, la que corresponde a una suspensión total -- del bombeo en una franja costera de 14 km de ancho, se obtiene para 1985 una invasión de agua salada de 14 km.

La tercera alternativa, se refiere a una total suspensión del bombeo en el valle entero, obteniéndose en 1985 una invasión un poco menor a la obtenida en la segunda opción.

Finalmente la cuarta opción, con una disminución de un 60% del -- bombeo actual, en una franja costera de 14 km, define una curva -- de invasión un poco mayor a los 4 km.

La curva a la que se refiere es la de 3000 ppm, y el avance es -- con respecto a la posición que tiene en 1974.

Dentro de estas cuatro alternativas, se consideró que quedaban -- cubiertos los extremos en cuanto a política de extracción. Si se

observan las alternativas que se analizaron, se verá que la tercera es totalmente irreal, pues es imposible suspender el bombeo en todo el distrito de riego; el motivo, fue tener un criterio en cuanto a la disminución del avance de la intrusión salina. Cualquier otra alternativa que se consideré quedará dentro de éstas - cuatro y por lo tanto podrá conocerse.

Se concluye que para 1985, las condiciones de invasión de agua salada continuarán con la misma velocidad actual si se mantiene la misma extracción y con velocidad mínima correspondiente a una invasión de 3 km en 10 años, si se suspende totalmente el bombeo en la totalidad del distrito.

Estos resultados se deben a que en el lapso señalado aún no desaparece la depresión piezométrica del valle. La sal que actualmente se encuentra en el acuífero, continuará su efecto de dispersión en el mismo, invadiendo áreas cada vez mayores y seguirá -- existiendo una diferencia de presiones hidrostáticas, con la consecuente contaminación de agua de mar. Sin embargo, es probable que para periodos mayores de tiempo, con suspensiones adecuadas - del bombeo se pueda disminuir éste avance del agua salada.

El avance de la interfase salina, se refirió a la curva correspondiente a un contenido de sólidos totales disueltos de 3000 ppm, - debido a que las curvas con valores menores, son muy susceptibles

a errores, perdiendo por consiguiente su confiabilidad. Esta sensibilidad está ligada asimismo a la pobre historia que se tiene acerca de la fluctuación de éstos contenidos; los análisis químicos de muchos de los pozos se suspenden en el momento en que se reponen, muestreándose en su lugar el nuevo pozo, el cual es terminado en un estrato acífero diferente, razón por la que la calidad química del agua muestreada es diferente. Como resultado de esto, es la importancia que tiene la perforación de éstos pozos con el fin de estudiar éste fenómeno, ya que si se muestrean con regularidad se podrá conocer con más detalle el comportamiento de la interfase salina en los diversos estratos acíferos, así como su interrelación de acuerdo al análisis geoquímico y piezométrico de las observaciones hechas en ellos. Se puede realizar además -- una recalibración del modelo, para tener con mayor detalle el comportamiento del frente salino con valores menores de 3000 ppm de sólidos totales disueltos.

Los resultados de los análisis químicos de las muestras obtenidas por sifoneo en dos de los pozos, a partir de la fecha de la terminación de éstos, se muestran en las figuras V.4 y V.5. Con la utilización de éstos resultados obtenidos hasta 1980, se podrá calibrar nuevamente el modelo de simulación, para predecir el comportamiento de la " INTRUSION SALINA ", de acuerdo a diferentes políticas de extracción, siendo posible ampliar el periodo de predicción y reafirmar las conclusiones obtenidas.

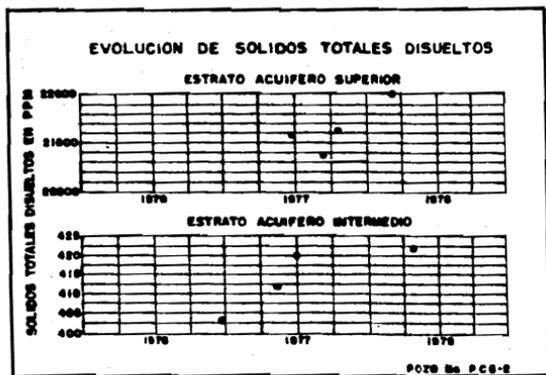


FIG. X. 4

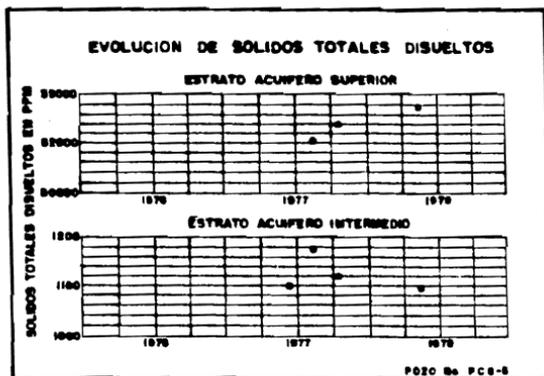


FIG. X. 5

La simulación de este complejo fenómeno no es garantía absoluta - de su comportamiento real, ya que la velocidad de avance de la interfase salina puede acelerarse en función de mecanismos hasta -- ahora imposibles de modelar con la información existente, por lo que la información obtenida de los pozos hasta aquí descritos, -- proporcionará una ayuda definitiva.

#### V.6. RECOMENDACIONES

- a).- Se recomienda una suspensión gradual del bombeo en una franja costera de 14 km. donde básicamente se aprovechan los acuíferos superior e intermedio, disminuyendo con ello las filtraciones verticales descendentes, dejando al mismo tiempo una zona de transición, contaminándose ésta con el tiempo.
- b).- Continuar con las observaciones de campo principalmente en los pozos perforados para este fin, para conocer así en forma separada las características piezométricas, químicas y físicas de los acuíferos superior, intermedio e inferior.
- c).- Utilizar los pozos cancelados para la obtención de datos adaptándolos de manera similar a los pozos descritos anteriormente

y de esta forma poder llevar a cabo la elaboración de un modelo más apropiado al comportamiento del acuífero.

- d).- Definir las políticas más convenientes de explotación de -- acuerdo a las características de la intrusión salina y a futuras necesidades de el Valle, recalibrando asimismo el modelo conforme se vaya teniendo más información.

#### CONCLUSIONES GENERALES

Es evidente la importancia que tiene el estudio de zonas costeras áridas y semiáridas en cuanto a recursos de agua subterránea se refiere, debido a lo necesario que es contar con éste elemento -- para el desarrollo de cualquier actividad social o productiva.

En el capítulo cuarto se expusieron los métodos de control de la Intrusión Salina; para saber a ciencia cierta cual de tales métodos es aplicable a una determinada zona de estudio, es necesario elaborar estudios de factibilidad técnica de cada uno para -- que la elección corresponda a las condiciones geohidrológicas -- del sitio; paralelamente deben llevarse a cabo estudios de factibilidad económica que nos señalen el método más conveniente de -- acuerdo a la disponibilidad de recursos. Una conjugación de ---

ambos estudios nos da como resultado el método más apropiado o algunos de ellos que también podrían aplicarse.

En el caso de la zona costera del Valle de Guaymas, Sonora, se utilizó el método de disminución del bombeo para el análisis de varias opciones de explotación en la fase primaria del estudio de la zona, ya que éste aun no se encuentra en su última etapa. Puede inferirse sin embargo, que podría darse el caso de la utilización de algún otro método de control. Si considerásemos como método a utilizar el de Recarga Artificial, se tendría que contar con una fuente de abastecimiento de agua de recarga, lo cual es prácticamente imposible por las extensas longitudes de conducción del agua que tendrían que hacerse desde otros sitios.

Para las Barreras Físicas, los costos de construcción serían muy elevados dada la extensa longitud de costa con que cuenta la zona de estudio. En el caso de la Barrera Hidráulica de inyección, ésta tendría que hacerse por medio de pozos por las condiciones de los acuíferos intermedio e inferior, también podría realizarse dicha barrera mediante campos de extensión o canales a lo largo de la costa que beneficiarían primeramente al acuífero superior y más adelante al intermedio e inferior. La construcción de esta barrera hidráulica implica como en el caso de recarga artificial, el contar con agua de recarga suficiente para su funcionamiento, la cual podría traerse de otros sitios o mediante agua tratada de reuso.

Por último, en zonas donde la concentración de pozos sea grande, existiría la posibilidad de reubicarlos, cancelando algunos y dejando en funcionamiento otros.

Las consideraciones anteriores son el resultado de la información obtenida de acuerdo a los enunciados de los capítulos II, III y IV. El capítulo II nos indica los cálculos teóricos que se deben realizar relacionados con el fenómeno; dichos cálculos se ven apoyados por el resultado de la exploración geofísica del sitio en estudio, así como del análisis químico de muestras de agua del lugar.

Una vez definidas las características del fenómeno en la zona de estudio, éstas se utilizan en la implementación de modelos de simulación del comportamiento del acuífero, que se refieren tanto a la evolución de los niveles estáticos del agua, como al avance del agua salada hacia la formación acuífera con el tiempo. Es -- así como mediante la utilización de estos modelos, se estará en condiciones de elegir el método de control óptimo, tanto técnica como económicamente para el tratamiento del fenómeno de la Intrusión Salina.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Geohidrology  
De Weist R.J.M. Ed. John Wiley & Sons, 1965.
2. Hidrología Subterránea  
Emilio Custodio. Barcelona, 1975.
3. Groun Water Hidrology  
Todd D.K. Ed. John Wiley & Sons, 1966.
4. El agua subterránea y los pozos  
Johnson Inc., 1970.
5. Generalidades sobre la Intrusión Salina y Métodos de Control  
Juan Manuel Lesser I.  
Boletín de Divulgación Técnica. SARH, 1976.
6. Tratado de Geofísica Aplicada  
José Cantos Figuerola  
Publicaciones del Instituto Geológico y Minera de España, 1974.
7. Estudio Hidrogeológico e Hidrogeoquímico de la península de  
Yucatán  
Juan Manuel Lesser I.  
SARH-Conacyt, 1976.
8. Hidrogeoquímica  
Antonio Lizst Mendoza  
Boletín de Divulgación Técnica. SARH, 1975.
9. Pozos de estudio como una ayuda en el análisis de la Intrusión  
Salina  
J.L. Jardines y Victor J. del Razo  
Subdirección de Promoción y Programas de Grande Irrigación,  
SARH. Publicado en las Memorias del III Congreso Mundial sobre  
Aprovechamientos Hidráulicos; Cd. de México. 1979.