

41121
8



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES.
CAMPUS ARAGON**

**"EXTRACCION DE AGUA DULCE - AGUA SALADA EN
LA ZONA COSTERA DE LA ISLA DE COZUMEL, Q.R."**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A :

MARINA / DOLORES RAMOS

ASESOR: ING. PATROCINIO ARROYO HERNANDEZ



MEXICO

2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A



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.

**TESIS CON
FALLA DE
ORIGEN**

AGRADECIMIENTOS

A Dios, simplemente por darme la vida y la familia que tengo.

A ti S. Sebastián M. donde quiera que estes.

A mis padres, Julia Ramos de Dolores y Leopoldo Dolores Torres por apoyarme en todo lo que hago, simplemente sin ustedes no sería nada, me han dado la mejor de las herencias sin esperar nada a cambio y no tengo palabras para agradecer su infinita bondad, su amor y sus cuidados hacia mi persona y educación; éste es un objetivo más que cumplo, esperando no sea el último pero tal vez el más importante, y que por supuesto les dedico, ya que todo lo que he logrado es gracias a su constante dedicación, cariño, cuidado y amor.

A mi hermana, Eva porque realmente eres un ejemplo a seguir, siempre has luchado por lo que quieres y para mí eso es digno de admiración, te agradezco tu incondicional apoyo para mi formación académica y personal.

A mi hermano, Esteban por apoyarme en todo lo que he necesitado, por todos esos momentos agradables que hemos compartido y sobre todo por tu sinceridad y confianza hacia mí gracias.

A mis profesores, por compartirme su dedicación y conocimiento, pero muy en especial al Ing. Patrocinio Arroyo Hernández, por su total disponibilidad a la realización de ésta tesis, por su gran vocación y simplemente por ser una gran persona gracias.

A mis amigos, por todos esos momentos tan agradables que pasamos, no me atrevo a mencionar nombres porque no acabaría de nombrar a toda la gente que de alguna manera me ha regalado buenos momentos y ha contribuido directa o indirectamente a la realización de esta tesis.

A la Comisión Nacional del Agua, por haberme apoyado en mi etapa de servicio social y de tesista, pero en especial al Ing. Fernando Lara Guerrero y al Ing. José Alfredo Cruz Cruz, por haberme proporcionado las bases para la realización del presente trabajo.

Marina

de ✓

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

EXTRACCIÓN DE AGUA DULCE - AGUA SALADA EN LA ZONA COSTERA DE LA ISLA DE COZUMEL, Q.R.

INDICE

	Página
Prefacio.....	1
Objetivo.....	1
Alcances.....	3

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1.1.- Generalidades.....	5
1.2.- Localización y descripción del área.....	6
1.2.1.- Localización de la Zona de Estudio.....	6
1.2.2.- Marco Físico.....	8
1.2.3.- Marco Geológico.....	9

CAPITULO II FUNDAMENTACION TÉCNICA

2.1.- Conceptos básicos de hidrología subterránea.....	12
2.2.- Materiales que conforma un acuífero.....	16
2.3.- Propiedades físicas de los acuíferos.....	17
2.3.1.- Porosidad.....	17
2.3.2.- Permeabilidad intrínseca (k).....	17

2.3.3.- Densidad (ρ)	18
2.3.4.- Conductividad Eléctrica.....	19
2.3.5.- Conductividad hidráulica (K)	20
2.3.6.- Transmisividad (T).....	21
2.3.7.- Rendimiento específico	22
2.3.8.- Retención específica (SR)	23
2.4.- Clasificación de las aguas subterráneas.....	24
2.5.- Teoría del flujo del agua subterránea	25
2.5.1.- Movimiento del agua subterránea.....	26
2.5.2.- Medición del nivel del agua subterránea.....	27
2.5.3.- Profundidad al nivel estático.....	27
2.5.4.- Elevación del nivel estático.....	28
2.5.5.- Dirección del flujo subterráneo	28
2.6.- Métodos para la determinación de parámetros hidráulicos de una acuífero.....	30
2.6.1.- Pruebas de bombeo	31
2.6.2.- Permeámetros	31
2.6.3.- Prueba tipo "slug"	32
2.6.4.- Pruebas de aforo.....	32
2.7.- Carga subterránea del agua dulce y del agua salada	32

CAPITULO III RELACIONES AGUA DULCE - AGUA SALADA EN LAS REGIONES COSTERAS

3.1.- Introducción.....	35
3.2.- Aspectos dinámicos y físicos del movimiento subterráneo simultáneo, del agua dulce y salada.....	37
3.2.1.- Interface entre el agua subterránea dulce y salada.....	37
3.2.2.- Corrección de Hubbert al principio de Ghyben – Herzberg.....	46
3.2.3.- Zona de Transición.....	47
3.2.4.- Relaciones agua dulce / agua salada en islas oceánicas.....	50
3.3.- Explotación de acuíferos costeros.....	52
3.3.1.- Consideraciones generales.....	52
3.3.2.- Formación de conos de agua salada debajo de las captaciones.....	53
3.3.3.- Posición final de la interface.....	57
3.3.4.- Efectos de las extracciones, sobre el espesor de la zona de mezcla.....	60
3.4.- Técnicas para la extracción de estudio de las relaciones agua dulce - agua salada en las regiones costeras.....	61
3.4.1.- Determinación directa de la posición de la interface agua dulce – agua salada.....	62
3.4.2.- Medición de niveles.....	65
3.4.3.- Frecuencia de mediciones.....	66
3.4.4.- Empleo de los modelos para estudiar las relaciones agua dulce – agua salada en acuíferos costeros.....	66

CAPITULO IV BOMBEO MIXTO EN LA ZONA COSTERA DE LA ISLA DE COZUMEL, Q.R.

4.1.- Problemática y situación actual	69
4.2.- Alternativas de solución.....	74
4.3.- Consideraciones generales del bombeo mixto	80
4.3.1.- Antecedentes	80
4.3.2.- Pozo tipo.....	81
4.4.- Metodología del bombeo mixto.....	83
4.5.- Caso de estudio: "Aplicación del bombeo mixto en la zona costera de la isla de Cozumel, quintana roo."	85
4.6.- Aprovechamiento del agua dulce y salada.....	93

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones y Recomendaciones	97
Recomendaciones.....	99
Anexos	101
Bibliografía	107

OBJETIVO

Proporcionar una alternativa técnicamente factible para la extracción de agua dulce, en la Isla de Cozumel Quintana Roo, mediante la aplicación del Sistema de Bombeo Mixto.

PREFACIO

Desde que el ser humano ha tenido uso de razón se ha adaptado y acostumbrado a los caprichos de la naturaleza, tomando de ella lo que le ofrece para evolucionar y desarrollarse. Tal es el caso del agua, que tiene una relación muy estrecha con la vida, por lo que el hombre ha aprendido a extraerla de la tierra, a desviarla de sus cauces, a recolectarla de la lluvia, entre otros aspectos. Sin embargo, aun no ha sido posible controlarla del todo y con el paso del tiempo hemos olvidado esa estrecha relación hasta convertirla en un instrumento más.

Actualmente en nuestro país, mientras en el norte se carece drásticamente de agua, en el sur se presentan fenómenos hidrológicos que destruyen infraestructura, poblados y cultivos. De continuar así ésta situación, nos conducirá a un futuro donde padeceremos una "guerra por el agua", motivo por el que el uso racional de ésta constituye una prioridad fundamental, en el que la disponibilidad de agua en cantidad, calidad y oportunidad es un requisito indispensable para el bienestar de la población y para el desarrollo económico. Sin este vital recurso no puede concebirse la existencia de niveles adecuados de salud, de producción agrícola e industrial, así mismo, el agua es un elemento esencial para conservar la flora, fauna, diversidad biológica, estabilidad del clima y calidad de vida de los mexicanos.

Muchos países disponen de gran longitud de costas y una buena parte de la población, agricultura e industria se sitúa a lo largo de las mismas. Ello origina una importante extracción de agua subterránea, y por lo tanto, una sustancial modificación de las relaciones agua dulce - agua salada. No sólo son estas extracciones las causantes de esas modificaciones, sino también, la ejecución de obras de ingeniería que aumentan el drenaje natural de los acuíferos o provocan la penetración del agua del mar por ríos y canales

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

con la excavación de puertos en zonas costeras, ahondamiento de cauces de evacuación de aguas de tormenta, desecación de zonas bajas inundadas por el mar, dragado de ríos y canales para hacerlos navegables, entre otros.

Durante mi estancia como prestadora de Servicio Social en la Comisión Nacional del Agua, particularmente en la Gerencia de Aguas Subterráneas, me ha inquietado la problemática que afronta el país respecto a la escasez de agua, es por eso que me interesa conocer más a cerca de alternativas que permitan la extracción de la misma y en este caso muy particularmente la extracción de agua dulce subterránea en la Isla de Cozumel, Quintana Roo, donde se presenta el fenómeno de agua dulce - agua salada.

Esta extracción es compleja ya que involucra el movimiento subterráneo de aguas de diferente temperatura y densidad, como lo es la salada y la dulce, que por métodos tradicionales resulta difícil y poco económica, es por esto que la ingeniería requiere de nuevos métodos que faciliten la extracción de agua dulce.

Por lo anteriormente expuesto, en este trabajo se presentara una alternativa que nos ofrezca extraer agua dulce sin alterar su calidad, por medio del Sistema de Bombeo Mixto.

TEXTO CON
FALLA DE ORIGEN

ALCANCES

El amplio uso y la importancia estratégica del agua subterránea, específicamente en el abastecimiento de la Isla de Cozumel es tal que amerita su urgente protección contra la sobreexplotación y la contaminación originada por la intrusión salina.

En este trabajo se ha resumido la terminología y conceptos más empleados en la geohidrología, con el fin de proporcionar las herramientas elementales, para la comprensión del tema de la extracción de agua dulce y agua salada en islas costeras.

Se tratarán las consideraciones básicas para las especificaciones de las relaciones agua dulce - agua salada, en zonas costeras, orientándose principalmente a la Isla de Cozumel. Q.R.

Tradicionalmente se realizaba la extracción de agua dulce por medio de un pozo equipado con una bomba en una isla costera que generalmente contiene agua dulce flotando sobre un cuerpo de agua salada. La excesiva extracción de agua dulce permite el avance del límite entre la misma y el agua salada, de esta manera se produce un desequilibrio natural que implica la contaminación del agua dulce. Por tanto, cuando se extrae agua dulce, se presenta un cono de abatimiento, que no permitía la extracción correcta de agua dulce al ser contaminada ésta por el agua salada, pero actualmente el sistema de bombeo mixto (equipado con dos bombas a diferentes profundidades) permite la extracción alterna de agua dulce y agua salada, sin provocar efectos que perjudiquen la calidad del agua dulce.

Se presenta una guía general para el desarrollo e implementación de estrategias para la extracción subterránea y alterna de agua dulce - agua salada, logrando una mayor extracción de la primera, evitando así la contaminación de ésta con el ascenso del agua salada

Para dar cumplimiento, al objetivo del presente trabajo, éste se desarrolla de la siguiente manera. En el capítulo I, "Introducción", se explican las características generales de la zona de estudio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el capítulo II "Fundamentación Técnica", se muestra un panorama general de conceptos básicos para un mayor entendimiento de las relaciones agua dulce – agua salada.

"Relaciones agua dulce – agua salada en regiones costeras", es el capítulo III y explica el fenómeno de salinización, que generalmente se presenta en acuíferos costeros, además proporciona las condiciones generales que deben cumplirse para una benéfica extracción de agua dulce, sin olvidar los efectos que causa un bombeo excesivo de la misma en zonas costeras, que normalmente son afectadas por el agua de mar.

Posteriormente se presenta el capítulo IV "Bombeo mixto en la zona costera de la a Isla de Cozumel Quintana Roo.", en éste se explica la descripción general y metodología del bombeo mixto aplicada al acuífero de Cozumel, la finalidad de este capítulo es dar a conocer una alternativa viable para la extracción de agua dulce sin contaminarla de agua salada, y al mismo tiempo extraer ésta tratando de evitar una zona de transición mayor entre ambas, de tal modo que se extraigan dos fluidos de densidades diferentes al mismo tiempo, por medio del bombeo mixto, y sobre todo evaluar el aprovechamiento del agua salada y por supuesto el del agua dulce.

Y por ultimo, el capítulo V "Conclusiones y recomendaciones", que expone las condiciones de la Isla, los lugares en los cuales es considerable aplicar el bombeo mixto, además de que se hacen las recomendaciones necesarias para la exitosa metodología del bombeo mixto y la preservación del acuífero de Cozumel.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

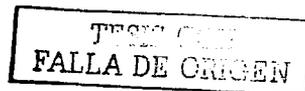
1.1.- GENERALIDADES

Los acuíferos costeros, al estar en contacto con el océano se exponen al continuo intercambio de agua salada procedente del mismo y a su vez descarga parte del agua del acuífero en él. Por otra parte, al ir aumentando la demanda de agua dulce subterránea el flujo de ésta hacia el mar disminuye y revierte lo que da lugar a un fenómeno conocido en la literatura técnica con el nombre de filtración, dado que el agua del océano entra y penetra en los acuíferos costeros.

Como resultado del fenómeno de filtración, si el agua de mar llega a los pozos situados en el interior de la costa, el consumo del agua pierde su utilidad; no obstante, aunque el acuífero esté contaminado por el agua del mar puede aún tardar muchos años en alcanzar el nivel adecuado de salinidad del agua, peligroso para el acuífero de agua dulce. De este modo la estratificación del agua subterránea¹ es constante en estas áreas costeras.

Como consecuencia de la estratificación del agua subterránea, el agua obtenida en un acuífero costero se contamina cuando la porción activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de agua dulce y agua salada o por la propia agua salada. Sin embargo, no es este el único modo de salinización ya que si la captación se establece en una masa de agua subterránea dulce sobre agua salada puede producirse una ascensión de sal formando un cono y es justamente lo que se pretende evitar en el acuífero de la Isla de Cozumel, Quintana Roo.

¹ Con agua dulce flotando sobre agua salada.



El diseño y la operación de pozos en la Isla de Cozumel plantea múltiples problemas, ya que el espesor aprovechable es muy reducido, de escasos 12 m en la parte central, lo que permite extraer un volumen que va de 0.5 a 1.5 litros por segundo (lps) en promedio, de agua por aprovechamiento, sin que afecte su calidad. Actualmente, se extraen cerca de 300 litros por segundo (lps), a través de una batería de 150 pozos, la cual abastece a la zona turística y a la población. Para satisfacer las necesidades futuras, se planea buscar otros mecanismos que permitan operar los pozos emplazados en la zona, sin que provoquen la salinización del agua en ellos.

Frecuentemente el agua dulce subterránea es una fuente valiosa, la necesidad de proteger los acuíferos costeros contra la filtración del agua del mar ha llevado a una serie de investigaciones con el fin de conseguir métodos que nos prevean o controlen éste fenómeno.

Como una alternativa de explotación, la Comisión Nacional del Agua (CNA), por medio de la Gerencia de Aguas Subterráneas, presenta un proyecto para evaluar la factibilidad de aplicar un sistema de bombeo mixto² de agua dulce - agua salada, a fin de incrementar la extracción de agua dulce sin propiciar el ascenso del agua salada.

El sistema de bombeo mixto permite la extracción simultánea de agua dulce y salada, estabilizando en una posición controlada el aumento de la interface³.

1.2. - LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

1.2.1.- Localización de la Zona de Estudio.

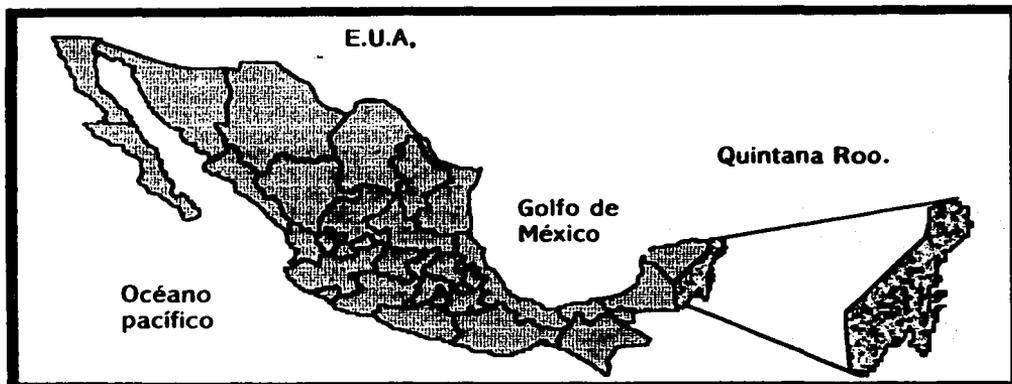
Ubicada entre los paralelos 20°15' a 20°35' de latitud norte y los meridianos 87°02' a 86°45' de longitud oeste con relación a Greenwich, la Isla de Cozumel se localiza al noreste del estado de Quintana Roo, siendo la más grande de las islas mexicanas en el mar Caribe, con una superficie aproximada de 473 km². Presenta una forma alargada, alcanzando su eje longitudinal una extensión de 43 km con dirección, sensiblemente, norte-sur, mientras que su eje perpendicular escasamente alcanza los 14 km.

² Scavenger wells por su significado en inglés

³ Contacto entre el agua dulce y el agua salada.

Políticamente, pertenece al municipio de Cozumel y se encuentra separada del continente por un canal de 17.5 kilómetro frente a las costas de playa del Carmen. figura 1.1.

MACROLOCALIZACIÓN



ZONA DE ESTUDIO

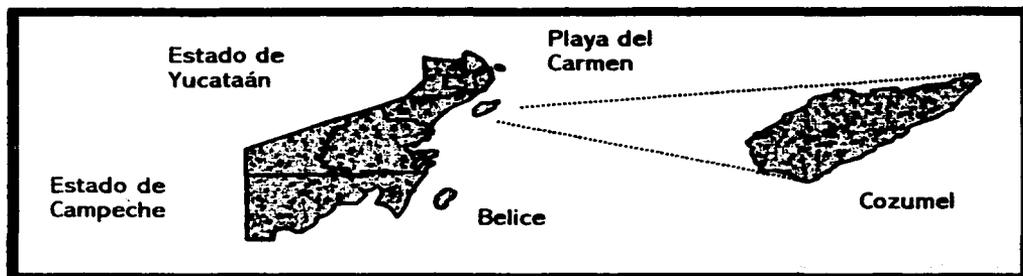


Figura 1.1
Localización de la Zona de Estudio

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
FALLA DE CARMEN

1.2.2.- Marco Físico.

a) Fisiografía.

La Isla se encuentra emplazada en la provincia denominada "Plataforma de Yucatán". Dicha provincia se caracteriza por una expresión superficial poco accidentada, con pendientes de 1 a 2 al millar y la presencia de montículos inferiores a los 10 metros de altura.

Asimismo, la isla presenta una altura media de 4 metros sobre el nivel del mar (msnm.) y elevaciones máximas de 10.8 m, localizadas principalmente, en la costa oriental y en la porción central de la isla.

b) Geomorfología.

En la zona de estudio predomina un relieve ligeramente ondulado, alternado con amplias áreas planas y presencia de lomeríos de reducida altura, mientras que hacia la porción occidental se muestra relativamente horizontal; sin embargo, cabe destacar la existencia de zonas escarpadas tanto en la faja costera norte como en la oriente.

c) Climatología.

En la Isla el clima es del tipo tropical húmedo, con lluvias en verano. El periodo de lluvias se presenta de forma general durante los meses de agosto a enero, donde las precipitaciones varían de un mínimo de 23.4 mm, registrada en el mes de marzo, y un máximo de 252.2 mm medidos en la estación Cozumel, en el mes de diciembre.

La temperatura media mensual en la región de interés muestra un incremento en los meses de marzo a septiembre, con descenso de octubre a febrero; de igual forma, los valores máximos se registran durante los meses de julio y agosto, entretanto los mínimos se reportan en diciembre y enero. La temperatura media mensual varía en el rango de 21 a 25 °C (grados centígrados).

d) Hidrología.

El escaso escurrimiento que se presenta en la Isla de Cozumel es producido por la permeabilidad de las rocas calizas abundantemente fracturadas, la densa vegetación detiene el agua precipitada propiciando su infiltración y una evaporación alta. Sólo al sur del municipio, en la zona de las lagunas de Chunyaxché, Muyil y Boca Paila, el escurrimiento es un poco mayor. Esto se debe a la presencia de finas partículas de material calcáreo y orgánico que dificultan la infiltración y que son, precisamente, la causa de la formación de estos depósitos superficiales de agua.

La escasez de agua superficial hace que el potencial hidráulico subterráneo sea muy importante, pues de él depende el abastecimiento de agua en el municipio. Esto es de especial relevancia para la isla, en que el abasto se realiza a través de un acuífero localizado en la porción central de ésta. Este acuífero debe de explotarse con sumo cuidado, debido a que descansa sobre agua salada. Las aguas de este acuífero son relativamente duras debido a la disolución de las rocas calizas, por lo que antes de usarse pasan por un proceso de potabilización. En la porción continental del municipio las posibilidades de explotación de las aguas subterráneas son altas, aunque si bien hacia el interior del continente la calidad del agua es tolerable, en la costa, sede de un incipiente desarrollo turístico, el agua es salada. Los acuíferos de esta parte del municipio son acuíferos libres que se recargan con el agua de lluvia y que fluyen hacia el litoral siguiendo la escasa inclinación del terreno.

1.2.3.- Marco Geológico.

- Estratigrafía

La secuencia estratigráfica está representada, esencialmente, por rocas sedimentarias, con edades que van del Oligoceno al Cuaternario, misma que se describe a continuación:

Formación Cozumel (Oligoceno). Este paquete geológico está compuesto por calizas y dolomitas de color verde oscuro, compactas y con estratificación delgada, a las cuales, por su posición estratigráfica, se les atribuye una edad del Oligoceno.

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN

Formación Chancanab (Plioceno). Esta formación se presenta como lodolita arenosa de color crema y gris, con onquedades de disolución de un tamaño promedio de 7 cm medidos sobre su eje longitudinal, mismas que, en su mayor parte, se encuentran revestidas con aragonita de color café claro.

Formación Abrigo (Plioceno). Esta unidad se constituye como un horizonte de rocas carbonatadas, deleznable, cuyas características litológicas han permitido subdividirla en 3 miembros, los que se describen brevemente a continuación:

1. El inferior: Conformado por sedimentos arenosos.
2. El medio: se encuentra compuesto por calcarenita de granos redondeados embebidos en una matriz de calcita fina de color arena, que interperiza a gris oscuro.
3. El superior: La mayor parte de las areniscas calcáreas, de color crema, presentes a nivel superficial en la porción central de la isla, pertenecen a este miembro.

Formación Mirador (Plioceno). Se denomina "Formación Mirador" a una secuencia de rocas calizas consolidadas y compactas que, por sus características particulares, se ha dividido en dos miembros:

1. Inferior.- Es un cuerpo de rocas calizas y areniscas compactas, con un espesor promedio de 3 metros y estratificación media.
2. Superior.- Se encuentra conformado por sedimentos calcáreos compactos de color crema y café claro; superficialmente interperizan a color café y gris oscuro, y aparecen en forma estratificada, con un espesor promedio de 7 m.

Cuatemario. Este periodo está representado por material detrítico, substancialmente, eólico, que ha dado origen a dunas de calcarenitas sueltas de grano medio y fino, formadas por fragmentos de conchas y otros organismos y clastos de arena y gravilla calcárea de color blanco. Las dunas llegan a tener hasta 5 m de altura y poco más de 400 m de anchura.

- Geología estructural.

En la Isla existen evidencias de alteraciones tectónicas, expresadas por dos fallas que la limitan en sus bordes oriental y occidental, además de una estructura de plegamiento anticlinal, cuyo eje está orientado NE-SW, en el mismo sentido de uno de los ejes tectónicos regionales peninsulares, que han sido definidos como accidentes geológicos de fracturamiento, que favorecen los fenómenos de disolución⁴. Estos alineamientos tienen sus manifestaciones a lo largo de la costa oriental de la península de Yucatán y están evidenciados por la existencia de la fosa marina que bordea la isla hacia el oeste, en la que se han identificado una serie de fallas escalonadas.

Básicamente, los elementos estructurales presentes son: Anticlinal de Cozumel, Falla normal occidental y Falla normal oriental.

El anticlinal Cozumel presenta una orientación preferencial norte-sur, con ligera variación en la porción norte hacia el noreste-sureste; por su parte, en los bordes oriental y occidental se localizan fallas normales que propiciaron la formación de un "horst" o pilar tectónico que al ir emergiendo dio origen a la isla.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁴ Los líquidos pueden aceptar en su seno ciertas cantidades de sólidos y gases.

CAPITULO II

FUNDAMENTACIÓN TÉCNICA

2.1.- CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

El origen, ocurrencia, movimiento y calidad del agua subterránea son estudiados por la geohidrología, y tal estudio suele ser difícil, pues no se puede ver directamente en el subsuelo y en ocasiones ocurre en ambientes complejos. Los principios generales que gobiernan su ocurrencia, movimiento y calidad están bien fundamentados, lo cual permite al investigador desarrollar una aproximación muy razonable de lo que ocurre en el subsuelo. La hidrogeología no es una ciencia exacta como la física o las matemáticas, pero si entendemos los principios fundamentales es posible desarrollar un buen análisis de un sistema en particular. Para un mejor entendimiento de la hidrología subterránea, a continuación se describen algunas definiciones fundamentales.

ACIDEZ.- Contenido de iones de hidrógeno de una solución, que se expresa con un valor en la escala pH.

ACUÍFERO.- Unidad geológica saturada que contiene y transmite agua de buena calidad de tal manera que pueda extraerse en cantidades económicamente aprovechables clasificándose de la siguiente manera:

ACUÍFERO LIBRE.- Es aquél que se encuentra limitado por una capa confinante en la base del acuífero, mientras que la porción superior está limitada por el nivel del agua (nivel freático) el cual se encuentra a presión atmosférica. El nivel superior del acuífero es libre de ascender o descender.

ACUÍFERO CONFINADO.- Es aquel que se encuentra limitado entre dos formaciones impermeables, donde la presión de agua es usualmente mayor que la atmosférica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ACUÍFERO SEMICONFINADO.- Es aquel que se encuentra limitado por formaciones menos permeables que el mismo pero a través de las cuales puede recibir o ceder volúmenes significativos de agua.

ACUÍFERO COLGADO.- Es aquel que esta constituido por una unidad geológica saturada con agua que descansa sobre otra unidad geológica impermeable ubicada por arriba del nivel freático principal.

ACUITARDO.- unidad geológica poco permeable que se comporta como una membrana delgada semipermeable a través de la cual pueden haber filtraciones entre acuíferos separados por ella.

ACUICLUDO.- Formación geológica que puede contener agua pero es incapaz de transmitirla en cantidades significativas.

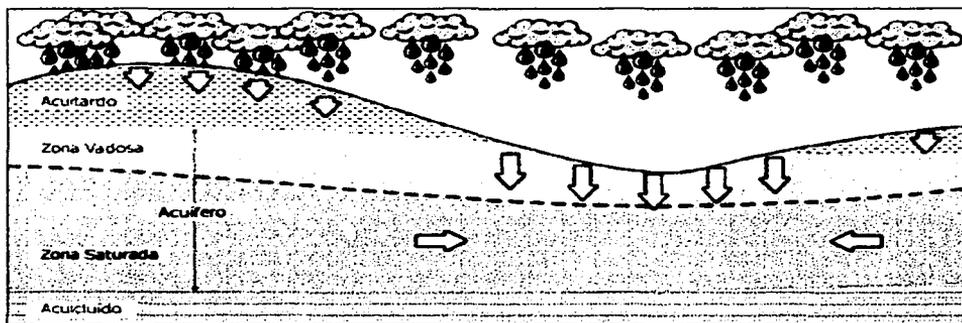
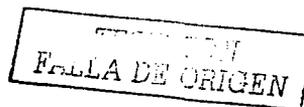


Figura 2.1
Esquema de un acuitardo y un acuífido.

ACUÍFUGO.- Es una formación geológica impermeable que no almacena ni transmite agua.

AGUA DULCE.- Contiene de 0 a 1000 ppm de sólidos totales disueltos.

AGUA TOLERABLE.- Contiene de 1000 a 2000 ppm de sólidos totales disueltos.



AGUA SALADA.- Contiene más de 2000 ppm de sólidos totales disueltos.

ALMACENAMIENTO ESPECIFICO.- Cantidad de agua que se libera o toma del acopio de un acuífero por unidad de volumen de un medio poroso y por unidad de cambio en la carga hidráulica.

ANISOTROPIA.- Condición en la que una o varias propiedades hidráulicas de un acuífero varían de acuerdo a la dirección del flujo.

APROVECHAMIENTOS.- Obras subterráneas artificiales (pozos y norias) y naturales (manantiales).

AREA DE RECARGA.- Permite al agua entrar en el acuífero. Es particularmente vulnerable a los contaminantes que pudieran estar en el agua. Si el pavimento se construye sobre ésta área, menos agua puede entrar al acuífero. Esto podría significar una escasez para aquellas personas que utilizan el agua subterránea desde el acuífero.

AREA DE VEDA.- Zona donde la explotación del agua subterránea esta controlada y/o legislada (prohibida o restringida por decreto) debido principalmente a la sobreexplotación.

CARGA HIDRÁULICA.- Suma de las cargas de elevación, presión y velocidad en un punto específico de un acuífero.

CENOTE.- Cavidad que comunica con el nivel freático, producto de la disolución de calizas y el posterior desplome parcial o total de las bóvedas de las cavemas.

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.- Volumen de agua que se libera o toma del acaparamiento de un acuífero por unidad de área y por cambio unitario en la carga hidráulica.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.- Coeficiente de proporcionalidad que describe la velocidad a la que se puede mover el agua a través de un medio poroso permeable.

CONO DE ABATIMIENTO.- Es la depresión cónica debido al escurrimiento del agua hacia el subsuelo que rodea al pozo, su influencia se deja sentir según el caudal extraído y la clase de material que lo rodea.

CONO DE AGUA SALADA O DOMO DE AGUA SALADA.- Toda protuberancia vertical de la masa de agua salada que se produce como consecuencia de bombeos o drenajes locales en una zona en la que hay agua dulce sobre agua salada.

CUÑA DE AGUA SALADA O CUÑA SALINA.- Masa de agua salada de gran longitud con sección en forma de calza apoyada en la base del acuífero y con el vértice o pie hacia tierra dentro, es la forma normal de las masas de agua salada a lo largo de una costa.

FLOTACIÓN.- Separación de un mineral mediante una corriente de aire que provoca la formación de burbujas y en el que los sólidos de interés se adhieren a las burbujas formadas con las cuales salen por derrame del recipiente.

GRADIENTE HIDRÁULICO.- Cambio en la carga hidráulica total por unidad de distancia, en una dirección dada. Si la dirección no se especifica, se entenderá que la dirección es aquella en donde se obtiene el máximo cambio de reducción en la carga.

INFILTRACIÓN.- Este fenómeno se presenta cuando el agua penetra al subsuelo, gradualmente conducida a capas más profundas y puede ingresar a través de los mantos rocosos subterráneos, pasando entre sus pequeñas grietas.

INTERFACE.- Se presenta cuando se ponen en contacto dos fluidos de diferentes pesos específicos, como son el agua dulce y el agua salada, a través de un medio poroso (acuífero), existe una superficie de separación o frontera entre ambos.

INTRUSIÓN.- Designa la entrada de algún material en otro.

ISOTROPIA.- Condición por la cual las propiedades hidráulicas de una acuífero son iguales en todas las direcciones.

NIVEL DINÁMICO.- Profundidad a la que se encuentra la superficie del agua subterránea, a partir del nivel del terreno, cuando esta trabajando el equipo de bombeo.

NIVL FREÁTICO.- Superficie que separa la zona del subsuelo inundada con agua subterránea de la zona en la que las grietas están rellenas de agua y aire.

NORIA.- Perforación vertical realizada en forma manual para extraer agua subterránea.

PH.- Es un número que nos indica la acidez de una disolución. Si el pH es mayor que 7 la disolución es básica, también llamada alcalina; y si el pH es menor que 7 la disolución es ácida.

PIEZOMETRÍA.- Se refiere a la medición de las fluctuaciones que se presentan en los niveles del agua subterránea, producidos por causas tanto naturales como artificiales.

PPM.- (ppm) Partes por millón. Unidades de medida de la salinidad del agua.

POZO.- Es una perforación vertical en forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad y tiene superficie de agua libre a la presión atmosférica.

UNIDAD GEOHIDROLOGICA.- Uno o varios tipos de roca o material granular cuyas características físico-químicas permiten, en diferente grado almacenar y transmitir el agua subterránea.

2.2.- MATERIALES QUE CONFORMA UN ACUÍFERO

Los acuíferos están formados por materiales consolidados (rocas) o no consolidadas (sedimentos). Cada uno de estos materiales tienen orígenes distintos que le confieren características físico y químicas particulares al agua subterránea.

Los productos de la destrucción de rocas se conocen como sedimentos, roca no consolidada o suelo. Las rocas (en base a su origen se clasifican en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias) son el resultado de una serie de procesos tales como: (1) roca fundida la cual forma un líquido caliente conocido como magma que se localiza a profundidades considerables de la superficie terrestre; (2) precipitación de materiales inorgánicos en el agua; (3) depósito de conchas de varios organismos; (4) condensación de gas que

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

contienen partículas de minerales; y (5) desintegración de otras rocas y su subsecuente acumulación de los granos y partículas resultantes para formar nuevas rocas.

La extracción de agua subterránea se puede realizar en casi todos los tipos de rocas sedimentarias. Sin embargo, los estratos de rocas conocidas como lutitas (de grano más fino) proporcionan solo unos cuantos litros por día.

2.3.- PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ACUÍFEROS

2.3.1.- Porosidad

Propiedad intrínseca que tiene la materia y se define como el volumen de aberturas, huecos u oquedades; es decir, todo tipo de espacio intergranular de las rocas y sedimentos. Esta propiedad nos permite estimar el máximo volumen de agua que una roca o sedimento puede contener cuando está totalmente saturada(o) y se representa matemáticamente como:

$$\eta = (V_v / V)100$$

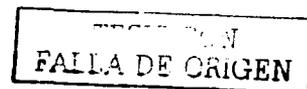
(2.3.1)

donde:

η = Porosidad, en porcentaje (%)

V_v = Volumen de espacios (L^3)

V = Volumen unitario de roca o sedimento; incluye el material sólido y los espacios intergranulares (L^3)



2.3.2.- Permeabilidad intrínseca (k)

Propiedad del material geológico que generalmente contiene vacíos que se encuentran comunicados entre sí, por lo que tienen la capacidad de almacenar y transmitir agua.

La permeabilidad se expresa matemáticamente como el producto del diámetro promedio de los granos del material geológico y una constante de proporcionalidad intrínseca del medio. Es decir:

$$k = Cd^2 \quad (2.3.2)$$

donde:

k = Permeabilidad intrínseca (L²)

C = Constante de proporcionalidad denominada factor de forma (adimensional)

d = Diámetro promedio de los granos del material geológico (L)

Las unidades para la permeabilidad se dan en L², que pueden ser m², cm², etc. La tabla 2.1 muestra algunos valores de permeabilidad en darcys, siendo un darcy igual a 10⁻⁸ cm/s.

TIPO DE MATERIAL	PERMEABILIDAD (darcy)	TIPO DE MATERIAL	PERMEABILIDAD (darcy)
Materiales no consolidados		Materiales consolidados	
Grava	10 ⁶ -10 ²	Arenisca	10 ⁻¹ -10 ⁻⁵
Arena limpia	10 ³ -0.5	Caliza y dolomita	10 ⁻¹ -10 ⁻⁴
Arena limosa	10 ² -10 ⁻²	Caliza cársica	10 ³ -10 ⁻¹
Loess, limo	1-10 ⁻⁴	Pizarras y lutitas	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁸
Arcilla marina	10 ⁻⁴ -10 ⁻⁷	Basalto fracturado	10 ³ -10 ⁻²
		Roca cristalina fracturada	10 ⁻¹⁰ -10 ⁻³
		Roca cristalina densa	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁸

Tabla 2.1
Valores típicos de permeabilidad para diferentes materiales geológicos

2.3.3.- Densidad (ρ)

Es la masa seca por unidad de volumen (incluyendo los espacios vacíos) del medio poroso inalterado.

$$\rho = \frac{m}{v_o} \quad (2.3.3)$$

donde:

ρ = Densidad (M/L³)

m = Masa (M)

v_o = Volumen total de la muestra (L³)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3.4.- Conductividad Eléctrica.

Se define como la capacidad de un cubo de un centímetro de lado para conducir una corriente eléctrica. La unidad de medida es el "mho" (recíproco del ohm que es la unidad de medida de la resistividad). Dado que la mayoría de las aguas naturales tienen conductividades menores que un mho/cm, se suele utilizar el micromho o millonésima de mho.

$$\mu\text{mho/cm} = 10^{-6}\text{mho/cm}$$

El agua químicamente pura tiene una conductancia eléctrica muy baja, sin embargo la presencia de los iones disociados en solución suministra conductividad a la solución.

La conductividad del agua es función de su temperatura, la concentración y la naturaleza de las sales disueltas; puesto que la conductividad se incrementa con la temperatura, se acostumbra referir los resultados de las medidas a una temperatura constante 18, 20 ó 25 °C con el fin de hacer comparable el reporte.

TIPO DE AGUA	CONDUCTIVIDAD (micromhos/cm)
Agua pura	0.05
Agua destilada	0.05 a 5.0
Agua de lluvia	5.0 a 30
Agua subterránea	30 a 5 000
Agua de mar	45 000 a 55000
Salmueras	100, 000

Tabla 2.2
Rangos de valores para diversos tipos de aguas.

Conductividad Específica X (C) = Sólidos Disueltos
(micromhos / cm a 25 °C) = (en ppm)

proporciona una aproximación gruesa del total de sólidos disueltos, el valor de C varía de 0.55 a 0.75; las aguas que contienen mayoría de bicarbonatos o de cloruros tendrán un valor cercano al límite inferior en

este rango, las aguas sulfatadas se aproximarán o excederán al límite superior, especialmente aguas afectadas por solución de yeso, y las aguas altamente silicadas tendrán un valor más alto.

Un estudio de conductividades nos permite determinar zonas de baja o alta permeabilidad, fuentes de alimentación, sentido del flujo y en zonas costeras ayuda a detectar la intrusión de agua de mar.

2.3.5.- Conductividad hidráulica (K)

Es la capacidad de un material geológico para permitir la circulación del agua, y se define como el coeficiente de proporcionalidad que describe la velocidad a la que se puede mover el agua a través de un medio poroso permeable.

$$K = Q / (A \cdot i) \quad (2.3.4)$$

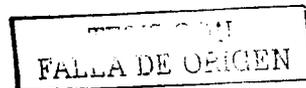
donde:

K = Conductividad hidráulica (L/T)

Q = Gasto o volumen de agua por unidad de tiempo (L³/T)

A = Área (L²)

i = Gradiente hidráulico (adimensional)



La conductividad hidráulica esta gobernada por el tamaño y la forma de los poros (intergranulares y fracturados), la interconexión entre los poros, y las propiedades físicas del fluido. Si la interconexión entre los poros es pequeña, entonces el volumen del agua que puede pasar de poro a poro será restringido, resultando en una baja conductividad hidráulica.

Las propiedades del agua varían con la temperatura, por lo que la conductividad hidráulica se debe definir a una temperatura en particular ya que esta en función de la viscosidad y densidad del líquido.

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (m/s)
SEDIMENTOS	
Grava	3×10^{-4} a 3×10^{-2}
Arena	9×10^{-7} a 5×10^{-4}
Limo	1×10^{-9} a 2×10^{-6}
Arcilla	1×10^{-11} a 4.7×10^{-9}
ROCAS SEDIMENTARIAS	
Caliza arrecifal y karstica	1×10^{-4} a 2×10^{-2}
Caliza, dolomia	1×10^{-9} a 6×10^{-6}
Arenisca	3×10^{-10} a 6×10^{-6}
ROCAS CRISTALINAS	
Basalto fracturado	4×10^{-7} a 2×10^{-2}
Rocas igneas y metamórficas fracturadas	8×10^{-9} a 3×10^{-5}
Granito intemperizado	3.3×10^{-8} a 5.2×10^{-6}

Tabla 2.3
Valores típicos de la conductividad hidráulica

2.3.6 .- Transmisividad (T)

Es la habilidad de un medio para permitir la circulación del agua, de manera simple, la transmisividad se puede expresar como el producto de la conductividad hidráulica por el espesor saturado del acuífero:

$$T = Kb \quad (2.3.5)$$

donde:

T = Transmisividad (L^2/T)

K = Conductividad hidráulica (L/T)

b = Espesor saturado del acuífero (L)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La transmisividad es una medida del volumen de agua por unidad de tiempo que puede transmitirse horizontalmente a través del ancho unitario del espesor saturado de un acuífero bajo la influencia de un gradiente hidráulico unitario.

2.3.7.- Rendimiento específico

La propiedad de almacenamiento que se presenta cuando se extrae agua subterránea de acuíferos libres, se conoce como rendimiento específico. Así, el volumen de agua que un volumen unitario de sedimento o roca saturada drena bajo la influencia de la gravedad representa al rendimiento específico, el cual se expresa de la siguiente manera.

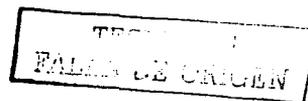
$$S_y = v_g / v_r \quad (2.3.6)$$

donde:

S_y = Rendimiento específico, (%)

v_g = Volumen de agua drenada por gravedad (L^3)

v_r = Volumen unitario de roca o sedimento (L^3)



Con frecuencia, al rendimiento específico se le conoce como porosidad efectiva o espacio poroso, y equivale al volumen de agua disponible para su exploración. El rendimiento específico depende del tamaño de grano, forma, graduación de los materiales, compactación y tiempo de drenaje. Los valores del rendimiento específico varían de 0.02 a 0.30.

Material	Rendimiento específico (%)		
	Maximo	Promedio	Mínimo
Arcilla -	5	2	0
Limo	19	18	3
Arena fina	28	21	10
Arena media	32	26	15
Arena gruesa	35	27	20
Grava fina	35	25	21
Grava media	26	23	13
Grava gruesa	26	22	12

Tabla 2.4
Valores típicos del rendimiento específico, en porcentajes.

2.3.8.- Retención específica (SR)

Es la relación del volumen de agua que un sedimento o roca saturada puede retener contra el drenaje por gravedad y el volumen total de la muestra (sedimento o roca).

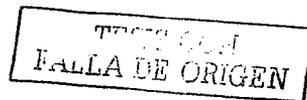
$$S_r = V_r / V_t \quad (2.3.7)$$

siendo:

S_r = Retención específica (adimensional)

V_r = Volumen de agua retenida contra la acción de la gravedad (L^3)

V_t = Volumen unitario de roca o sedimento saturado (L^3)



2.3.9.- Filtración

Es un método de separación de mezclas muy útil cuando los componentes sólidos de una combinación heterogénea; por lo común son finamente divididos, no se disuelven en el componente líquido o gaseoso.

El volumen de filtración se calcula empleando la fórmula que expresa la Ley de Darcy :

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta h / L \quad (2.3.8)$$

donde:

Q = Gasto (L^3/T)

A = Sección transversal al flujo de agua (L^2)

Δh = Diferencia de cargas hidráulicas entre los puntos de entrada y salida del agua (L)

K = Conductividad hidráulica (L/T)

L = Espesor del medio poroso (L)

La ley de Darcy es válida cuando se aplica a flujos laminares mientras que no es válida para flujos turbulentos.

2.4.- CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Existen múltiples clasificaciones sencillas y complicadas, contándose entre las primeras las relacionadas con el uso del agua (doméstico, agrícola, ganadero, industrial o municipal), tales como las relacionadas con su contenido en sólidos totales disueltos, dureza, propiedades destacadas, conductividad eléctrica y relación de adsorción⁵ de sodio. Entre las segundas se encuentran las que proporcionan información geoquímica mismas que clasifican el agua por los iones dominantes, por su contenido aniónico, por su salinidad y/o alcalinidad.

En general las clasificaciones que aportan mayor información son las más complicadas.

CLASIFICACION	CONCENTRACIÓN DE STD EN ppm
Agua dulce	0 - 1, 000
Agua salobre	1,000 - 10, 000
Agua salada	10, 000 - 100, 000
Salmuera	más de 100, 000

Tabla2.5
Clasificación de las aguas subterráneas

ESTACION
FALLA DE ORIGEN

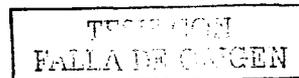
Basada en la dureza del agua. Cuando el agua de lluvia, ácida por naturaleza, se infiltra en rocas calizas o dolomitas, ésta disuelve a los carbonatos de calcio y magnesio produciendo agua subterránea que se denomina "dura". El agua dura no reacciona con el jabón y por lo tanto no es deseable para actividades de limpieza de la casa, además de que cuando se transporta y/o calienta, genera costras e incrustaciones en los conductos y sitios de almacenamiento del agua. El agua suave se encuentra en sitios cercanos a las zonas de recarga.

La dureza del agua se determina de manera numérica en términos de la concentración de los iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). La clasificación del agua, en suave, moderadamente suave, dura y muy dura se obtiene a partir de la conversión de la concentración de STD (tabla 2.6) a CaCO_3 .

⁵ Concentración de una sustancia disuelta, sobre una superficie o a su alrededor.

TIPO DE AGUA	STD(mg/L como CaCO3)
Suave	0-60
Moderadamente suave	61-120
Dura	121-180
Muy dura	>180

Tabla 2.6
Clasificación del agua de acuerdo a la dureza.



2.5.- TEORÍA DEL FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El flujo del agua subterránea, constituye un aspecto importante de la geohidrología, ya que es un caso especial a través de un medio poroso.

El estudio del agua subterránea presenta diferentes grados de dificultad, en la medida que se consideren aspectos tales como: el carácter dimensional del flujo, la dependencia de este respecto al tiempo, las fronteras en que se mueva el agua y las propiedades del medio y del fluido.

El flujo del agua subterránea en la naturaleza es, hasta cierto punto, tridimensional; esto significa que si fuera posible medir la velocidad de una partícula fluyendo a través del suelo, el vector de la velocidad en cualquier punto tendría componentes a lo largo de tres ejes principales x , y , y z .

La dificultad al resolver problemas del agua subterránea depende del grado con el cual el flujo se presente; así, resulta prácticamente imposible resolver analíticamente un flujo de agua tridimensional, al menos que las condiciones de simetría del problema, hagan posible reducir las ecuaciones a un sistema bidimensional. Afortunadamente la aproximación anterior puede hacerse en la mayoría de los problemas ingenieriles e inclusive, en ocasiones, es posible la reducción a una sola dimensión, siempre y cuando se tenga en cuenta el rango de error que esto acarrea.

El flujo de agua subterránea puede evaluarse cuantitativamente conociendo la velocidad, presión, densidad, temperatura y viscosidad del agua infiltrada a través de una formación geológica. Estas características del agua constituyen generalmente las incógnitas del problema y pueden variar en cada punto de la formación y con el tiempo. Si las incógnitas dependen únicamente de las variables independientes x , y , y z , el

movimiento se presenta con el régimen establecido; si por el contrario las incógnitas son también función del tiempo, el régimen es transitorio. El flujo con régimen establecido, se puede considerar como un caso particular del flujo con régimen transitorio cuando el tiempo tiende a infinito; o bien como su promedio a lo largo de un periodo de tiempo dado.

El movimiento del agua subterránea se llama confinado, o cuatavo, cuando los límites o superficies confinantes del medio a través del que circula el agua (es decir el espacio comprendido por los poros llenos de agua), permanecen fijos para los diferentes estados del movimiento; por el contrario, el flujo del agua es libre, cuando posee una superficie libre, cuya posición varía con el estado del movimiento; en ocasiones también suele llamársele movimiento en condiciones freáticas .

2.5.1.- Movimiento del agua subterránea

El movimiento del agua subterránea está gobernado por principios hidráulicos establecidos. El flujo a través de acuíferos, la mayoría de los cuales son medios porosos naturales, puede expresarse por la ley de Darcy.

En 1856, Henry Darcy estableció la ley que lleva su nombre, la cual dice que la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de recorrido del flujo. Esta ley se expresa en forma matemática de la siguiente manera:

$$V = K \frac{h}{L} \quad (2.5.1)$$

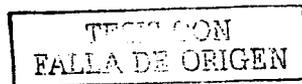
donde:

V = Velocidad de flujo, en (M/S).

K = Conductividad hidráulica (M/S).

h = Pérdida de carga, en (M).

L = Distancia recorrida por el flujo en (M).



En forma general, la ecuación anterior se puede expresar como:

$$v = K \frac{dh}{dL}$$

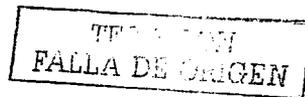
donde dh/dL es el gradiente hidráulico.

2.5.2.- Medición del nivel del agua subterránea.

Para efectuar las mediciones de los niveles del agua subterránea existen diferentes herramientas. Se puede utilizar una cinta de acero graduada, marcada con gis. Otro sistema que permite medir los niveles del agua subterránea es por medio de sondas eléctricas, las cuales tienen un amperímetro, voltímetro⁶, alarma o foco, el cual se activa una vez que la sonda entra en contacto con el agua. Recientemente se han diseñado transductores de presión electrónicos para medir niveles del agua con una gran precisión (25 mm de tolerancia). Estos aparatos se conectan a una computadora u otro aparato que almacena la información (Data-logger) para que registre las mediciones a intervalos regulares especificados por el usuario.

2.5.3.- Profundidad al nivel estático

Es la distancia vertical desde la superficie del terreno hasta el nivel del agua subterránea. De manera más precisa, la distancia se mide desde la parte superior del brocal (obra que nos da acceso al pozo) hasta el espejo del agua subterránea.



⁶ Aparato para medir potenciales eléctricos.

2.5.4.- Elevación del nivel estático

Se trata del nivel en que se encuentra el agua subterránea referido a un cierto nivel, comúnmente el del mar. Para poder establecer el nivel del agua subterránea con respecto al nivel del mar es necesario efectuar una nivelación de la obra (brocal) donde esta asentado el pozo profundo.

Por medio de aparatos topográficos (niveles) se mide el nivel del brocal con respecto al de otra obra que ya fue nivelada anteriormente. En los últimos años, se han aplicado otras tecnologías que utilizan las señales de satélites geoposicionadores (GPS) para definir la localización horizontal y vertical de las obras.

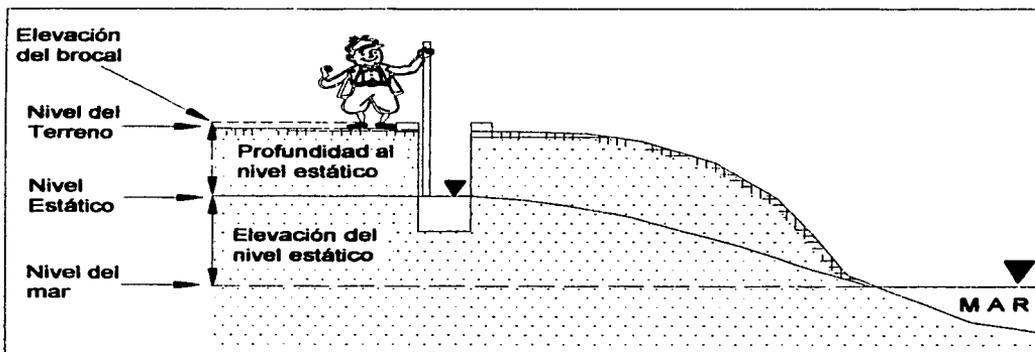
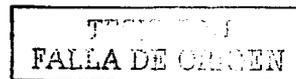


Figura 2.2
Medición del nivel de agua subterránea.



2.5.5- Dirección del flujo subterráneo

Una de las tareas más importantes en toda evaluación hidrogeológica es la determinación de la dirección del flujo subterráneo que nos permite identificar las zonas de recarga y descarga de los acuíferos, entre otras cosas. Para establecer la dirección de flujo del agua subterránea se requiere realizar una serie de actividades entre las que se pueden mencionar.

- Nivelación del brocal del pozo con respecto al nivel del mar.
- Determinación de la distancia entre los pozos (cuando menos tres).
- Medición de la carga hidráulica en cada pozo.

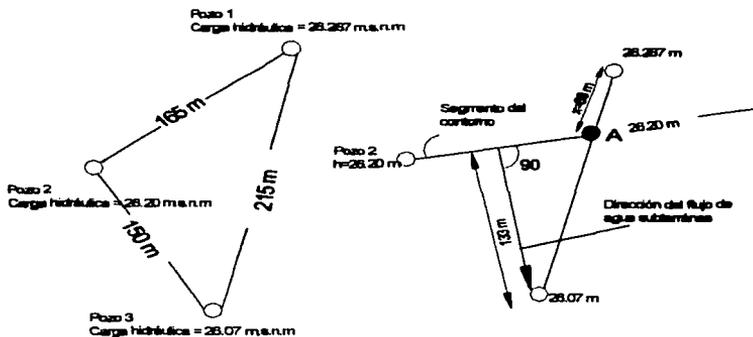


Figura 2.3
Pasos para la determinación de la dirección de flujo del agua subterránea.

A continuación se describen los pasos necesarios para la determinación del gradiente y la dirección del flujo subterráneo (figura 2.3) a partir de tres pozos (Heath, 1983):

Identificar el pozo con el nivel estático intermedio (Pozo 2: $h = 26.20$ msnm)

Calcular la distancia (x) entre el pozo que tiene el nivel mayor y el pozo del nivel menor que le corresponde al nivel estático del pozo intermedio (punto A)

$$\left(\frac{26.267 - 26.20}{x} \right) = \left(\frac{26.267 - 26.07}{215} \right)$$

$$x = 68 \text{ metros}$$

Trazar una línea recta entre el pozo intermedio y el punto identificado en el paso número 2. esta línea representa un segmento del contorno del nivel del agua, en el que el nivel del agua es el mismo que en el pozo intermedio.

Trazar una línea perpendicular al contorno del nivel del agua, y unirla ya sea con el pozo de mayor o menor carga hidráulica. Esta línea nos indica la dirección de flujo del agua subterránea.

Dividir la diferencia entre la carga hidráulica del pozo y la del contorno (h_L) por la distancia entre el pozo y el contorno (L). La respuesta es el gradiente hidráulico.

$$\left(\frac{h_L}{L}\right) = \frac{26.2 - 26.07}{133} = \frac{0.13m}{133m}$$

2.6.- MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE UN ACUÍFERO

La estimación de la conductividad hidráulica se puede realizar a través de métodos de campo y de laboratorio. Los métodos de campo consisten en pruebas de bombeo, donde se extraen volúmenes conocidos de agua y se miden los efectos de esta acción en pozos de observación o piezómetros. Por otro lado los métodos de campo conocidos como pruebas tipo "slug" donde se agrega o extrae un volumen de agua conocido de manera súbita en el pozo y se miden sus efectos (cambios del nivel del agua) en el mismo pozo para determinar las propiedades hidráulicas de los materiales.

Por lo que respecta a los métodos de laboratorio, las pruebas se efectúan en pequeñas muestras de suelo en aparatos conocidos como permeámetros en donde se hace circular agua a través de las muestras. Otra técnica que se puede clasificar como de laboratorio consiste en el análisis granulométrico de las muestras de suelo y de manera indirecta se obtiene la conductividad hidráulica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

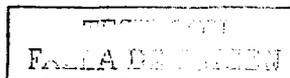
2.6.1.- Pruebas de bombeo

Tienen como fin determinar las características hidráulicas de los acuíferos, y consisten en observar los efectos (abatimientos) provocados por el bombeo pueden ser observados en el mismo pozo de bombeo, o bien, en pozos de observación próximos a él.

Al iniciarse el bombeo en un pozo, el nivel del agua en las velocidades sufre un abatimiento, que resulta mayor en el pozo mismo y decrece a medida que la distancia al pozo aumenta, hasta que se llega a un punto en que el bombeo no afecta a dicho nivel. La fuerza que induce al agua a que se mueva hacia el pozo, es la carga hidráulica representada por la diferencia entre el nivel del agua dentro del pozo y el existente en cualquier lugar fuera de él.

Cuando se bombea agua mediante un pozo, ésta se deriva del almacenamiento del acuífero, y en tanto no exista una recarga vertical, el cono de depresión se va extendiendo más y más, decreciendo la magnitud de los abatimientos a medida que el área afectada es mayor, hasta que la superficie piezométrica se estabiliza en las proximidades del pozo y se llega a una condición de flujo establecido.

2.6.2.- Permeámetros



Permiten medir de manera precisa la velocidad de percolación del agua a través de diferentes materiales, lo que finalmente se aplica en la determinación de la conductividad hidráulica del material analizado. Los valores de conductividad hidráulica de los diferentes materiales se pueden determinar en el laboratorio por medio de instrumentos denominados permeámetros. Existen dos tipos de permeámetros, (a) el de carga constante y (b) el de carga variable. En el primero, el gradiente hidráulico y la descarga se mantienen constantes. Y, en el aparato de carga variable, el gradiente hidráulico decrece con el tiempo, y en consecuencia el gasto también decrecerá con el tiempo. Estas pruebas se realizan varias veces con cada muestra para obtener una conductividad hidráulica promedio.

2.6.3.- Prueba tipo "slug"

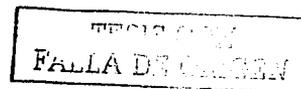
Consiste en aplicar una perturbación repentina en el nivel del agua de un pozo, con la finalidad de calcular la conductividad hidráulica del medio. Existen tres maneras de aplicar este tipo de prueba: (a) disminución de la carga hidráulica, (b) incremento de la carga hidráulica y (c) carga hidráulica constante.

Una de las principales ventajas de las pruebas tipo "slug" es que permiten una rápida y económica evaluación de las propiedades hidráulicas del material del subsuelo; además, estas pruebas pueden servir para diseñar pruebas de bombeo de larga duración.

2.6.4.- Pruebas de aforo

Una manera abreviada de evaluar la capacidad específica de un pozo es mediante una prueba de corta duración que se le conoce como prueba de aforo. La capacidad específica se define como la producción de un pozo expresada comúnmente como la relación entre el gasto ($m^3/día$) y el abatimiento provocado por la extracción de dicho gasto (m), lo cual resulta en unidades de $(m^3/día)/(m)$, similares a los de la transmisividad.

2.7- CARGA SUBTERRÁNEA DEL AGUA DULCE Y DEL AGUA SALADA



Quando se tienen dos fluidos diferentes, como el agua dulce y el agua salada subterráneas, se pueden distinguir las cargas siguientes: (figura 2.4.).

La carga de agua dulce:

$$h_d = z + \frac{P}{\rho_d g} \quad (2.7.1)$$

La carga del agua salada:

$$h_s = z + \frac{P}{\rho_s g} \quad (2.7.2)$$

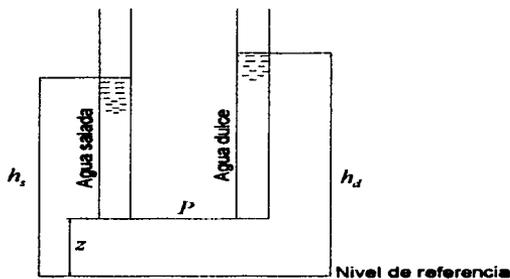


Figura 2.4
Cargas de agua dulce y del agua salada.

$$h_s = z \frac{P}{\rho_s g}$$

donde:

h_s = Carga de agua (M).

ρ_s = Peso específico del agua (KG/M³)

P = Presión del agua en el punto P (KG/M²).

z = Distancia que existe del nivel de referencia al punto de presión P (M).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En los cálculos solamente suele usarse un tipo de carga y, como regla general, ésta es la del agua dulce.

La carga del agua salada puede ponerse en función de la del agua dulce, eliminando P entre las ecuaciones anteriores.

$$P = \rho_d g (h_d - z) = \rho_s g (h_s - z) \text{ de donde:}$$

$$h_d = h_s \frac{\rho_s}{\rho_d} - z \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (2.7.3)$$

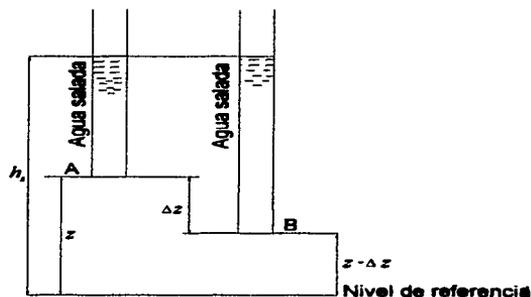


Figura 2.5

Carga del agua salada a diferentes profundidades.

Si la carga del agua subterránea se mide en un pozo de observación lleno de agua salina, la carga de agua dulce puede ser calculada reemplazando la columna de agua salada, obtenida en el pozo de observación, por una columna de agua dulce de igual peso.

Un hecho importante es que la carga de agua dulce en el agua salada estancada aumenta con la profundidad. Esto se demuestra fácilmente convirtiendo la carga de agua salada medida en dos puntos, A y B (ver figura 2.5.), en carga de agua dulce mediante la ecuación (2.7.3).

$$\text{en A: } h_{dA} = h_s \frac{\rho_s}{\rho_d} - z \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$$

$$h_{dB} > h_{dA}$$

$$\text{en B: } h_{dB} = h_s \frac{\rho_s}{\rho_d} - (z - \Delta z) \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$$

CAPITULO III

RELACIONES AGUA DULCE - AGUA SALADA EN REGIONES COSTERAS

3.1.- INTRODUCCIÓN

El estudio y el conocimiento de las relaciones entre el agua dulce y el agua salada en las regiones costeras reviste un gran interés, ya que muchos acuíferos vierten sus aguas directamente al mar. Este flujo de agua dulce crea un estado de equilibrio entre ambas aguas que sólo sufre modificaciones naturales a muy largo plazo y debidas a cambios climáticos o movimientos relativos de la tierra y el mar. En tales condiciones, la masa de agua salada tiene a lo largo de la costa una sección en forma de cuña, la cual se apoya en la base del acuífero y tiene el vértice o pie hacia tierra dentro (figura 3.1). Pero como consecuencia de los bombeos y/o drenajes locales como ríos, lagunas litorales, etc., se produce un estado de desequilibrio, cuya consecuencia, es la salinización del agua dulce. Debida principalmente a la presencia de un movimiento horizontal y otro vertical del agua salada hacia la costa.

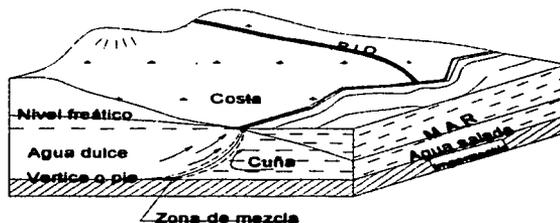


Figura 3.1
Cuña de agua salada en un acuífero costero.

La protuberancia vertical de la masa de agua salada es provocada por las condiciones que impone la extracción del agua dulce mediante el bombeo y también si la zona de drenaje es alargada. Por lo que respecta al avance horizontal, los drenajes y/o bombeos próximos a la costa provocan un avance anormal de la cuña de agua salada en forma de lengua o dedo que en áreas de permeabilidad diferente producen digitaciones.

Por otra parte, el agua captada en un acuífero costero se contamina (saliniza) cuando la porción activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de agua dulce agua salada o por la propia agua salada. Sin embargo no es este el único modo de salinización ya que si la captación se establece en una masa de agua dulce sobre agua salada puede originarse una ascensión de sal formando un cono (figura 3.2). Esta contaminación puede provenir también de infiltraciones de agua de otros acuíferos salinizados, bien por goteo o bien por deficiencias en el pozo (figura 3.3). También debe considerarse la contaminación por inundaciones de agua salada durante tormentas si el pozo esta en una llanura costera de muy baja cota, o debido a la mayor penetración del agua del mar en los ríos y lagunas costeras durante las mismas, o incluso por lluvias salinas originadas por fuertes tormentas litorales o por tifones.

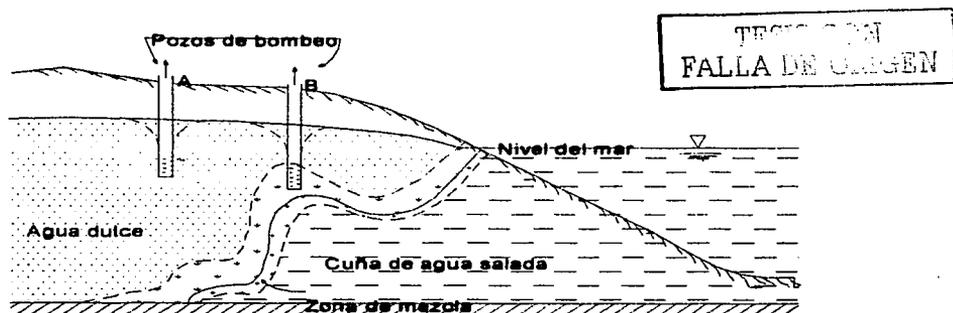


Figura 3.2

Formación de conos de agua salada debajo de captaciones.
El pozo A no se contamina, pero sí el B.

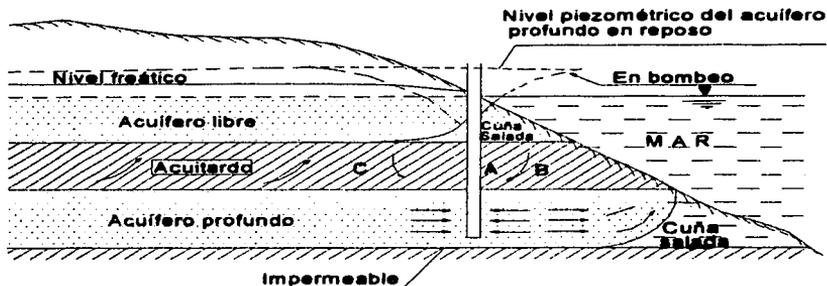


Figura 3.3

Contaminación salina de un pozo profundo

- A) Contaminación por cierre en el acuífero.
- B) Contaminación por infiltración de agua salada inducida por el bombeo.

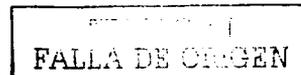
3.2.- ASPECTOS DINÁMICOS Y FÍSICOS DEL MOVIMIENTO SUBTERRÁNEO SIMULTÁNEO, DEL AGUA DULCE Y SALADA.

3.2.1.- Interface entre el agua subterránea dulce y salada.

Cuando se ponen en contacto dos fluidos de diferentes pesos específicos, como son el agua dulce y el agua salada, a través de un medio poroso (acuífero), existe una superficie de separación o frontera entre ambos, denominada interface.

En la práctica, esta interface no es brusca, sino que existe una zona, denominada zona de transición, en la que el agua dulce y salada están mezcladas.

Los primeros estudios de la relación agua dulce - agua salada en regiones costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon Ghyben (1889) y Herzberg (1901)., respectivamente, y están basados en el equilibrio estático de columnas de agua de diferente densidad, cuyas hipótesis básicas son (figura 3.4):



- El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- No existe flujo de agua salada.
- La interface es un plano, no existiendo zona de mezcla.

En estas condiciones, en un punto cualquiera A (figura 3.4) de la interfaz debe equilibrarse la presión del agua dulce y del agua salada.

$$(h + z)\rho_d = z\rho_s \quad (3.2.1)$$

donde:

h = Cota sobre el nivel del mar del agua dulce en la vertical del punto A (M). (ver figura 3.4)

z = Profundidad bajo el nivel del mar del punto A (M)

ρ_d = Peso específico del agua dulce = 1000 KG/M³.

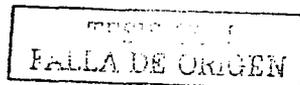
ρ_s = Peso específico del agua salada = 1025 KG/M³.

así pues:

$$z = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} \cdot h = h\beta \quad (3.2.2)$$

siendo:

$$\beta = \frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d}$$



β , varía entre 50 y 33 siendo un valor más frecuentemente utilizando 40, ya que si utilizamos $\rho_s = 1025$ kg/m³ y un valor de ρ_d igual a 1000 kg/m³ tendríamos que $\beta = 40$, siendo $z = 40 \cdot h$. Esto 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 (figura 3.4), 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 cufia de agua salada está limitada por el fondo impermeable del acuífero (punto B de la figura 3.4), que se produce cuando:

$$h = z_o \beta$$

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

Dado que la relación β es adimensional, la profundidad de la interface viene expresada en la misma unidad que tenga h .

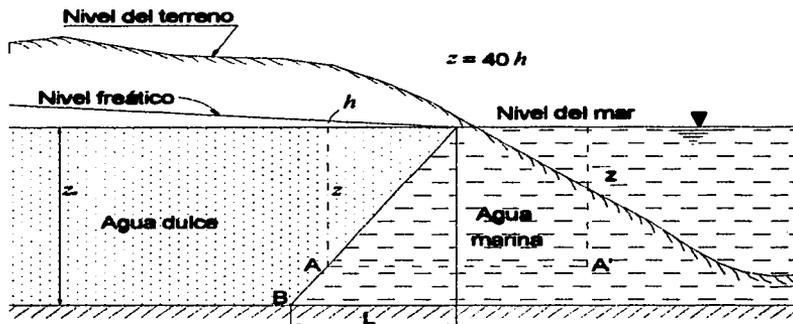


Figura 3.4
Equilibrio del agua dulce y el agua marina en una zona costera.

La fórmula $z = h\beta$ es válida solamente para las condiciones siguientes:

- el agua salada debe estar estancada.
- el flujo en el agua dulce es horizontal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

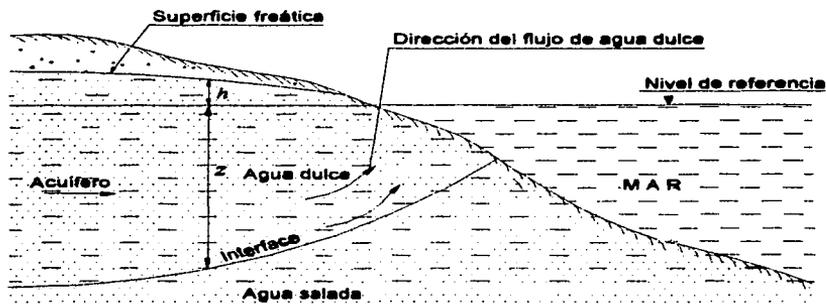


Figura 3.5
Profundidad de la interfase en un acuífero libre, según la fórmula de Ghyben - Herzberg.

Es evidente (ver figura 3.5) que la condición de flujo horizontal no se cumple en puntos próximos a la costa y bajo el fondo del mar, sino que existe un flujo hacia arriba, por lo que la profundidad de la interfase es mayor que βh (figura 3.6). En el caso en que el flujo en el agua dulce tenga una componente hacia abajo (si hay recarga del acuífero), la profundidad de la interfase es menor que βh .

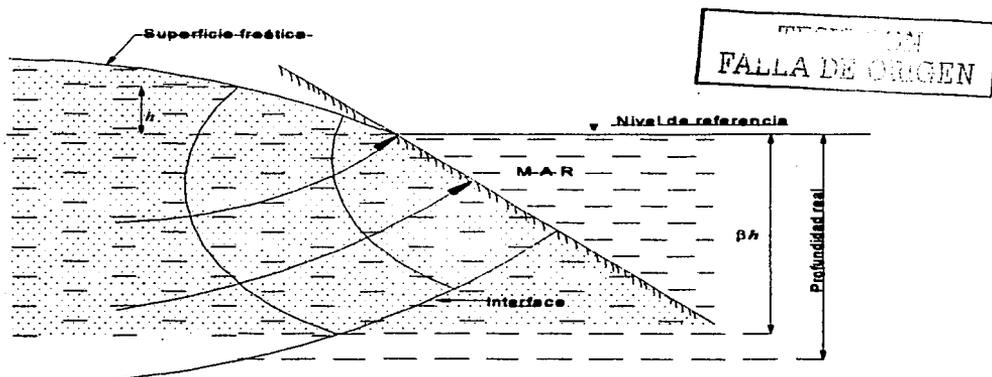


Figura 3.6
Profundidad de la interfase cerca de la costa

Entonces puede resumirse que, cuando existe una componente vertical de la velocidad la fórmula de Ghyben - Herzberg no da resultados correctos.

La fórmula (3.2.2) puede aplicarse también a acuíferos confinados o semiconfinados (figura 3.7), en la que h es el nivel piezométrico del agua subterránea dulce.

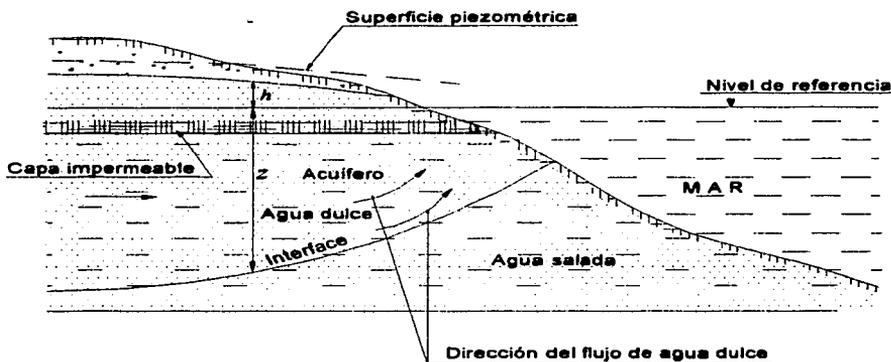


Figura 3.7
Profundidad de la interfase en un acuífero confinado, según la fórmula de Ghyben-Herzberg.

Si el acuífero está dividido en diferentes horizontes por capas impermeables (figura 3.8), lógicamente, puede haber más de una interfase, por lo tanto cada horizonte puede tener su propia interfase, más o menos independiente de la de otros horizontes.

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN

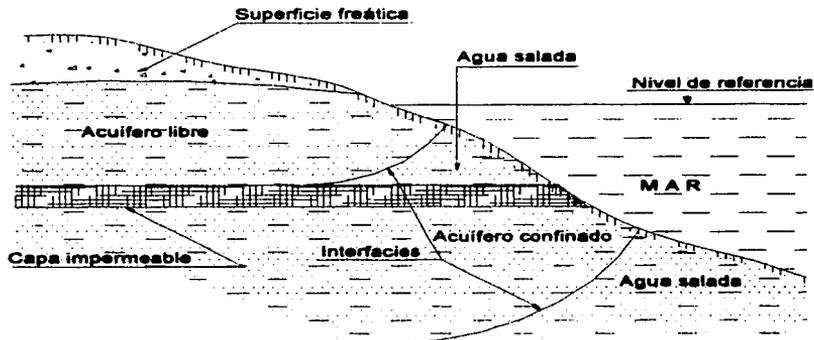


Figura 3.8
Caso de existencia de más de una interfase.

Las figuras 3.5 a 3.8 muestran que la interfase presenta una curvatura cerca de la costa y es interesante conocer las condiciones que la determinan. Para ello es preciso estudiar más a fondo el flujo del agua, dulce y salada, en la proximidad de la interfase.

La interfase permanece inmóvil, en condiciones estables, de aquí que puede considerarse como una línea de flujo (figura 3.9), y las velocidades v_d y v_s en el agua dulce y salada paralelas a ella.

Las velocidades v_d y v_s pueden ser expresadas por la ecuación de Darcy:

$$v_d = -k_d \frac{dh_d}{dx} \quad \text{y} \quad v_s = -k_s \frac{dh_s}{dx} \quad (3.2.3)$$

Siendo:

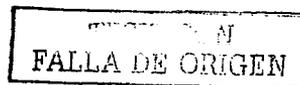
h_d = Carga del agua dulce justo encima de la interfase (M).

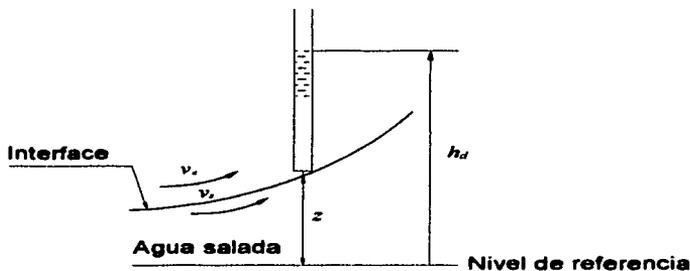
h_s = Carga del agua salada justo debajo de la interfase (M).

k_d = Coeficiente de permeabilidad del agua dulce (L²).

k_s = Coeficiente de permeabilidad del agua salada (L²).

x = Distancia (M).





ESTUDIO CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.9
Flujo en las proximidades de la interfase.

La relación entre la carga de agua dulce y de agua salada dada en la ecuación (2.7.3) de la fundamentación técnica es:

$$h_d = h_s \frac{\rho_s}{\rho_d} - z \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \text{ y diferenciado respecto a } x$$

tenemos:

$$\frac{dh_d}{dx} = \frac{dh_s}{dx} \frac{\rho_s}{\rho_d} - \frac{dz}{dx} \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (3.2.4)$$

en la que:

$$\frac{dz}{dx} = \text{pendiente de la interfase}$$

$$\frac{dh_d}{dx} \text{ y } \frac{dh_s}{dx} = \text{gradientes hidráulicos a lo largo de la interfase}$$

Sustituyendo los gradientes por las ecuaciones (3.2.3) se tiene:

$$\frac{v_d}{K_d} - \frac{v_s \rho_s}{K_s \rho_d} = \frac{dz}{dx} \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (3.2.5)$$

Las conclusiones más importantes que pueden extraerse son:

- a) Si la interface es horizontal, $\frac{dz}{dx} = 0$ y entonces:

$$v_d = v_s \frac{K_d \rho_s}{K_s \rho_d}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esto indica que el agua dulce y el agua salada están estancadas o que ambas se mueven paralelas a la interface, siendo más rápido el flujo del agua dulce que el del agua salada.

- b) Si el agua dulce se mueve pero el agua salada no, $v_s = 0$ y

$$v_d = K_d \frac{dz}{dx} \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$$

Lo que significa que la interface debe de tener una curvatura hacia arriba en la dirección del flujo de agua dulce.

- c) Si el agua salada se mueve pero el agua dulce no, $v_d = 0$ y

$$v_s = -K_s \frac{dz}{dx} \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}$$

Lo que tiene el efecto contrario que en el caso anterior.

- d) Si no hay flujo ni en el agua dulce ni en la salada, $v_d = v_s = 0$ y, por tanto, $\frac{dz}{dx} = 0$ y la interface es horizontal.

El flujo del agua subterránea es afectado por la presencia de una interface. Si, por el contrario, el flujo del agua subterránea cambia, este cambio no afecta inmediatamente a la interface; el agua dulce y el agua salada actúan al principio al unisono. Esto se demuestra de la forma siguiente:

Si la carga del agua dulce subterránea cambia, también cambia la del agua salada. La posición de la interface, sin embargo, no cambia inmediatamente, ya que el movimiento de ésta es muy lento (en el mismo orden de magnitud de la velocidad del aflujo del agua subterránea, unos pocos cm. por día).

La carga en la interface antes del cambio es según (2.7.3) de la fundamentación técnica

$$h_d = h_s \frac{\rho_s}{\rho_d} - z \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (3.2.6)$$

y después del cambio es:

$$h_d + \Delta h_d = (h_s + \Delta h_s) \frac{\rho_s}{\rho_d} - z \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (3.2.7)$$

La posición de la interface no ha cambiado todavía apreciablemente, ya que z conserva su valor inicial.

Restando (3.2.6) de (3.2.7) se tiene:

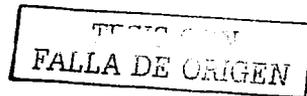
$$\Delta h_d = \Delta h_s \frac{\rho_s}{\rho_d} \quad (3.2.8)$$

y diferenciado respecto a x , puede demostrarse que:

$$\Delta v_d = \Delta v_s$$

Esto significa que los cambios, en la componente paralela a la interface, de la velocidad del agua dulce son iguales a los del agua salada, esto no quiere decir que la componente de la velocidad normal a la interface sea también igual.

Finalmente se llega a la conclusión de que los cambios en la velocidad del lado del agua dulce de la interface son iguales a los del lado del agua salada. El agua dulce y salada actúan como una sola y la



distribución de los cambios en la carga es, al principio, independiente de la presencia de la interface. Únicamente si existe un cambio en la posición de la interface, el efecto de su presencia (efecto de diferencia de densidad del agua dulce y del agua salada) comienza a notarse.

3.2.2.- Corrección de Hubbert al principio de Ghyben – Herzberg.

La ley de Ghyben – Herzberg, describe correctamente la posición de la interface 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. Si 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. 3.10-A), la cual debe hacerse por una longitud finita y no por un punto.

El consiguiente aumento de velocidades 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 surgencias de agua dulce en playas y lugares costeros que se encuentran a una elevación ligeramente mayor a la del mar. 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, es decir si se toma para el cálculo de profundidad de la interfaz en A (fig.3.10-A) la cota en B, situado en la equipotencial que pasa por A'.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

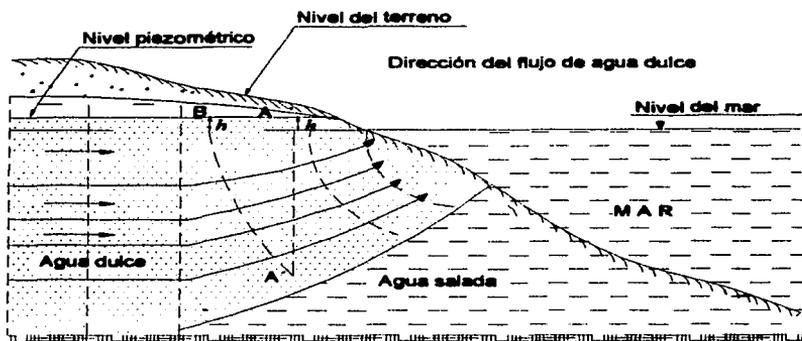


Figura 3.10-A
Red de flujo en un acuífero costero sin consideración de la zona de mezcla de agua.

3.2.3.- Zona de Transición.

En la zona de transición el contenido en sal (CINa) aumenta gradualmente desde el valor que tiene para el agua dulce hasta alcanzar el del agua del mar, debido a dos fenómenos principales:

- Dispersión mecánica debida al flujo del agua.
- Difusión molecular.

El fenómeno de la dispersión ha sido objeto de numerosos estudios⁷, siendo sus aspectos principales los siguientes:

Si se origina un flujo del agua subterránea, normal a una brusca interface inicial, la dispersión tiene lugar durante el movimiento de la interface, lo que da lugar a la formación de una zona de transición. Esta dispersión es causada por las variaciones de velocidad del agua a través de los poros del terreno y por el cambio de sales (por difusión) con el agua adherida a las partículas del suelo. Si se desprecia el efecto de

⁷ "Groundwater hydrology" Todd, D.K. "Underground dispersion of miscible liquids" Scheidegger, A.E. "Some experiments in dispersion", Bear, J., y otros.

difusión, el espesor de la zona de transición aumenta proporcionalmente con el desplazamiento de la interface independientemente de la velocidad del agua y de la dirección del desplazamiento, hacia delante o hacia atrás.

La existencia de una zona de transición en los casos en que la interface parece estar inmóvil es atribuida a:

- El hecho de que la dispersión tiene también lugar lateralmente
- Las pequeñas oscilaciones de la interface causadas por las mareas y por las variaciones estacionales del agua subterránea en el acuífero.
- La difusión.

El agua en la zona de transición no está estancada, sino que se encuentra en movimiento, lo que se demuestra fácilmente de la siguiente forma.

La zona de transición está subdividida en finas capas, cada una de las cuales tiene una densidad constante ρ/n , separadas por interfaces secundarias (figura 3.10).

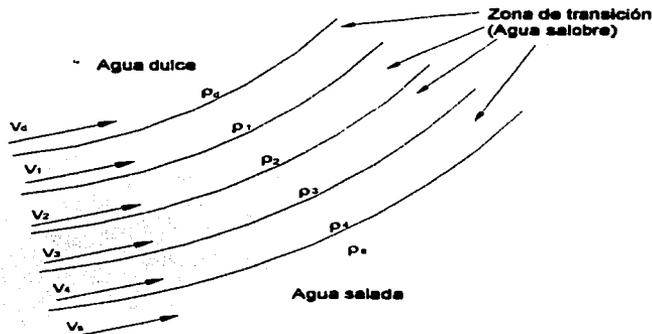


Figura 3.10
Flujo en la zona de transición.

Dado que $\rho/n \neq \rho/n+1$, debe existir un flujo paralelo a las interfaces secundarias que satisfagan la relación:

$$\frac{v_n}{K_n} - \frac{v_{n+1}}{K_{n+1}} \frac{\rho_{n+1}}{\rho_n} = \frac{dz}{dx} \frac{\rho_{n+1} - \rho_n}{\rho_n}$$

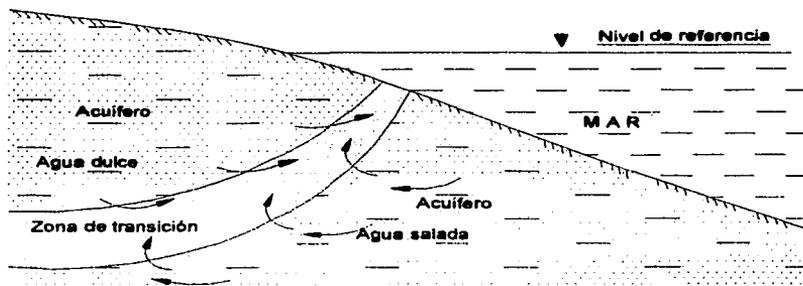


Figura 3.11
Circulación del agua salada bajo la interfase

En la zona de transición existe un flujo que indica un desplazamiento o descarga del agua sobre, que fluye continuamente. Por consiguiente, este continuo movimiento del agua salobre es posible solamente si ésta de la zona de transición se rellena continuamente. Esto significa que existe un flujo hacia adentro del agua salada bajo la zona de transición, como muestra la figura 3.11.

El flujo hacia tierra del agua del mar indica que la carga del agua salada subterránea tierra adentro, es menor que el nivel del mar, y esto significa que la profundidad de la interfase es mayor que lo que sería si no existiese dicho flujo.

La mezcla del agua dulce y salada es muy grande principalmente en terrenos porosos o fisurados y en rocas kársticas, y la zona de transición está constituida por una amplia cuña de agua salobre. Esta cuña puede ser el origen de los manantiales salobres cerca de las costas.

3.2.4. Relaciones agua dulce - agua salada en islas oceánicas

Muchas islas oceánicas de pequeñas dimensiones están formadas por materiales relativamente permeables, como calizas, arenas, lavas basálticas, calizas arrecifales, etc., de modo que el agua subterránea que contienen esta en forma de un lentejón sobre agua salada (ver figura 3.12). El agua dulce es vertida hacia el mar al mismo tiempo que es reemplazada por la infiltración de la lluvia. Si se trata de una isla circular de radio R y la recarga de agua dulce es W , medida en altura de agua por unidad de tiempo, puede establecerse que el flujo Q en una circunferencia de radio $r \leq R$ vale:

$$Q = 2\pi r k \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) h \frac{dh}{dr}$$

en la que h es el nivel del agua dulce sobre el nivel del mar y $(1+1/\beta)h$ es el espesor total de agua dulce, en la circunferencia de radio r .

El aporte de agua dentro de esa circunferencia vale:

$$Q = \pi r^2 W$$

igualando ambas formulas se obtiene:

$$\frac{W r dr}{2k(1+1/\beta)} = h dh$$

de donde:

$$h^2 = \frac{W}{2k(1+1/\beta)} (R^2 - r^2) \quad (3.2.9)$$

pues $h = 0$ para $r = R$

Si se trata de una isla alargada de anchura $2l$ es

$$h^2 = \frac{W}{k(1+1/\beta)} (l^2 - x^2) \quad (3.2.10)$$

siendo x la distancia desde el eje de la isla.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La resolución exacta del flujo hacia el mar para el caso de una isla alargada ha sido estudiada por Henry (1964). El resultado es que la fórmula anterior es suficientemente aproximada si la recarga no es extraordinariamente intensa. Únicamente si el ancho de la isla es grande, se tienen errores apreciables en la determinación de la interface cerca de la costa.

En el caso de existir dos niveles permeables afectados por el agua dulce, de permeabilidad y espesor k_1 y b_1 el superior y k_2 y b_2 el inferior, según Fetter (1972) se tiene:

$$h^2 \left(k_1 + k_2 \frac{1}{\beta} \right) + h(b_1 k_1 - b_2 k_2) = (l^2 - x^2)$$

lo que equivale a considerar una permeabilidad media

$$\bar{k} = \frac{k_1(b_1 + h) + k_2(-b_1 + h/\beta)}{h(1 + 1/\beta)}$$

En una isla de cualesquiera dimensiones puede establecerse el balance de entradas y salidas en prismas verticales obteniéndose la ecuación (Fetter, 1972):

$$k(1 + 1/\beta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = -2W \quad (3.2.11)$$

que permite resolver el problema numéricamente, suponiendo que las aproximaciones empleadas son válidas (aproximación de Dupuit-Forchheimer y fórmula de Ghyben - Herzberg).

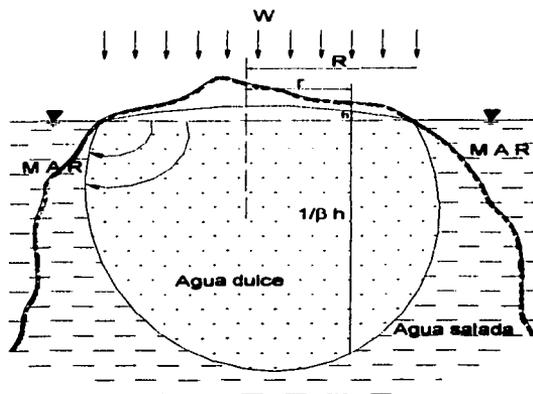


Figura 3.12
Lentejón de agua dulce en una isla oceánica

3.3.- EXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS COSTEROS.

3.3.1.- Consideraciones generales.

En condiciones de equilibrio dinámico, la Interface entre el agua subterránea dulce y salada del acuífero, tiene una posición estable (salvo pequeñas fluctuaciones debidas a las mareas y a las influencias estacionales), si se alteran éstas debido al movimiento producido por el bombeo, la Interface se rompe y la zona de transición aumenta al mismo tiempo de espesor.

La ruptura del equilibrio inicial provoca el movimiento de la interface y al mismo tiempo la zona de transición aumenta de espesor.

Por consiguiente, cuando se va a comenzar a bombear agua de un acuífero costero es necesario conocer de antemano cuál será la extensión de esos dos fenómenos y hasta qué punto puede permitirse su desarrollo.

Debe evitarse por todos los medios un excesivo avance de la interface, pues si el acuífero se saliniza resulta ser muy difícil y costoso sanearlo. El agua adherida a las partículas de tierra en los poros se vuelve también salina y la sal contenida en ellas, sólo desaparece por difusión en un proceso muy lento.

Así pues, una vez que el agua salina ha penetrado en un acuífero de agua dulce, éste queda contaminado por mucho tiempo.

3.3.2.-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 sólo 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 el pozo según sea el descenso producido y la penetración del mismo en el acuífero (figura 3.13). El agua salobre de la zona de mezcla, al tener menor densidad que el agua salada, puede ascender más y contaminar el agua bombeada. Para un mismo pozo y para cada caudal de bombeo existe una salinización máxima.

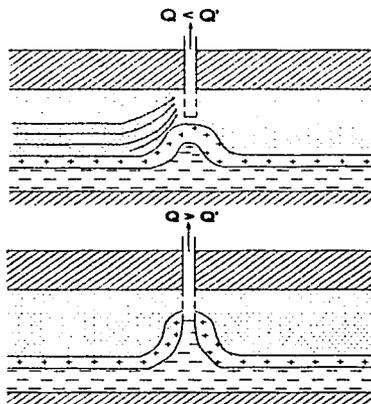


Figura 3.13

Formación de conos de agua salada y salobre debajo de un pozo parcialmente penetrante en un acuífero con agua salada en la parte inferior. Q' = caudal crítico.

El fenómeno de la formación del cono requiere un cierto tiempo durante el cual se obtiene solo agua dulce. Al producirse un caudal de bombeo excesivo y la penetración del pozo sea mayor, la salinización se produce con más rapidez e intensidad.

Existe un ascenso crítico, de modo que una vez alcanzado por la interface, la subida del pozo es brusca. Puede establecerse un caudal crítico tal que los bombeos a caudal menor no producen subida de sal al pozo.

En general el aumento de salinidad en el agua bombeada a caudal constante es aproximadamente logarítmico de modo que representándose la salinidad en función del logaritmo del tiempo debe obtenerse una recta, o a veces dos rectas.

Si el agua salada existe 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 interface tal que debajo de la captación se produce un punto de gradiente horizontal nulo de la interface o punto de estancamiento (figura 3.14), el arrastre de sales hacia el mar no puede continuar, se acumulan en ese punto y se produce con facilidad la subida del agua salada. Para no tener contaminación salina, no basta limitar el descenso, manteniendo siempre un nivel por encima del nivel del mar; si se producen puntos de estancamiento o un gradiente de agua salada hacia el pozo. El descenso y penetración de la captación puede ser superior o inferior al nivel del mar para no tener contaminación importante. Depende del flujo de agua dulce y de las condiciones de la interface, y de forma muy importante de la estratificación del terreno. La subida de sal se ve dificultada y aún más si existen intercalaciones y lentejones de materiales muy poco permeables cuando la permeabilidad vertical es notablemente menor que la horizontal. De tales circunstancias se obtiene provecho en muchos acuíferos costeros.

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 una buena parte de él, en especial la formada por agua salobre, de menor densidad, se desplaza horizontalmente de acuerdo con el flujo del agua subterránea. Este cono puede llegar a interferir con otros pozos situados en la dirección del flujo.

El ascenso del agua salada puede evitarse disminuyendo su potencial. Ello 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 una extrayendo el agua salobre o salada que penetra por el fondo y otra (la más somera)

extrayendo agua dulce. Sin embargo el sistema es caro de instalación y precisa de un sistema en general muy costoso para evacuar al mar el agua salada o salobre sin que se infiltre o perjudique otras actividades. Además el control y regulación de los dos bombeos es delicado pues un sobrebombeo en la bomba inferior puede originar un despilfarro de agua dulce y un subbombeo no evitaría la contaminación del agua dulce extraída⁸.

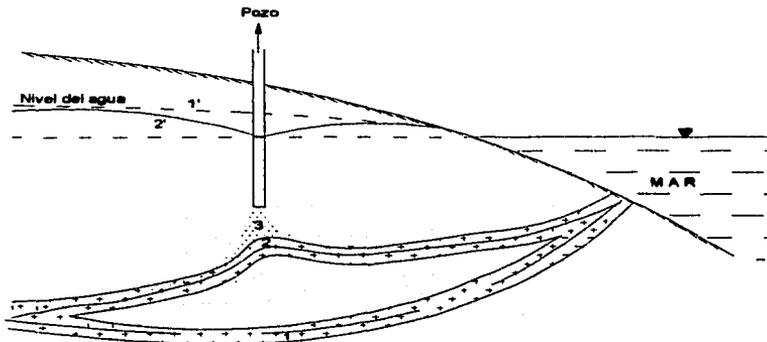


Figura 3.14

Subida de sal debajo de un pozo por creación de un punto de estancamiento; 1: posición inicial de la interfase y su zona de mezcla; 1': 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 2'; 3: formación del cono salino como consecuencia del estancamiento.

El caudal de ambas bombas debe establecerse de modo que la divisoria de las aguas que van a cada pozo esté por encima de la interfase entre el agua dulce y el agua salada. Ensayos realizados en zanjas indican que debe cumplirse:

$$\xi = \frac{Q_d}{Q_s} \leq \frac{b_d}{b_s}$$

TERRA CON FALLA DE ORIGEN

⁸ A veces se cree que en pozos con agua salada o salobre en su parte inferior o cerca de ella puede ser bombeado con seguridad colocando la bomba cerca del nivel en vez de a mayor profundidad. Este efecto no existe de forma importante más que con caudales muy reducidos y en pozos con notable almacenamiento (gran diámetro). La mayor ventaja de colocar la bomba cerca del nivel es el de limitar el caudal a extraer, que es el factor principal para limitar la salinización en el pozo ya construido.

en la que Q_d y Q_s son los caudales de agua dulce y agua salada y b_d y b_s los espesores iniciales de agua dulce y agua salada. La posición de la divisoria en la vertical de los pozos para un cierto valor de ξ . Se prescinde de las diferencias de densidad.

La posición de la divisoria en la vertical de ambos pozos puede obtenerse por teoría de imágenes escribiendo que:

$$\frac{Q_d}{\lambda_1} \left(\frac{1}{z+b_1} - \frac{1}{z+a_1} - \frac{1}{z-b_1} + \frac{1}{z-a_1} \right) =$$

$$= \frac{Q_s}{\lambda_2} \left(\frac{1}{b-z-b_2} - \frac{1}{b-z-a_2} - \frac{1}{b-z-b_2} + \frac{1}{b-z-a_2} \right)$$

o lo que es lo mismo

$$\frac{Q_d}{Q_s} \left(\frac{1}{z+b_1} + \frac{1}{z+a_1} - \frac{1}{z-b_1} - \frac{1}{z-a_1} \right) =$$

$$= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{1}{b-z+b_2} - \frac{1}{b-z+a_2} - \frac{1}{b-z-b_2} + \frac{1}{b-z-b_2} \right)$$

en la que:

b = Espesor del acuífero (M).

a_1 y b_1 = Distancia de los extremos superiores e inferiores del filtro de agua dulce al nivel freático inicial (M).

a_2 y b_2 = Distancia de los extremos inferior y superior del filtro de agua salada a la base del acuífero (M).

λ_1 y λ_2 = Longitudes de las rejillas de agua dulce y agua salada (M).

z = Profundidad de la divisoria bajo el nivel freático inicial (M).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3.3.- Posición final de la interface

La posición final de equilibrio de la interface, para un acuífero dado, depende del volumen de agua subterránea extraído y del caudal remanente de agua dulce que el acuífero vierte al mar. A mayor extracción de agua, menor flujo residual se vierte al mar y, por tanto, más se extiende la interface hacia el interior de la costa.

Si bien, como es lógico, desde un punto de vista económico, el agua dulce que un acuífero vierte al mar debe de ser la menor posible, una reducción de este flujo puede entrañar graves peligros, como se ha visto anteriormente a causa de la extensión de la interface tierra adentro. En relación a esto, deben de mencionarse los puntos siguientes:

- Incremento del espesor de la zona de transición.

La reducción del flujo de agua dulce hacia el mar supone una disminución del flujo en la zona de transición y, por consiguiente, un aumento del espesor de la misma. El incremento de la longitud de la interface contribuye igualmente a este proceso.

- Peligro de formación de conos de agua salina bajo el pozo.

La extracción de agua dulce de un acuífero, en un punto bajo el cual existe agua salada, tiende a hacer subir la interface hacia la superficie del terreno. Si el agua extraída es mucha, pueden formarse conos locales de agua salina bajo el punto de extracción. Figura 3.15

TRUCCO CON
FALLA DE ORIGEN

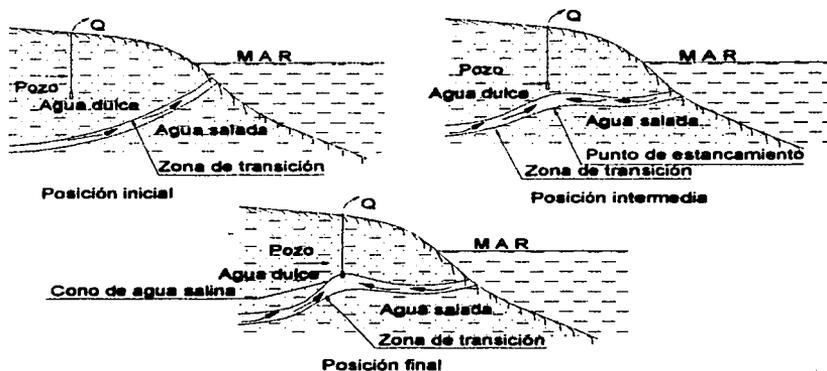


Figura 3.15
Formación de conos de agua salina bajo un pozo.

La formación de estos conos de agua salina constituye un serio peligro a causa de la existencia de la zona de transición, debido a que el agua en esta zona no está estancada, sino en movimiento, en dirección de la curvatura hacia arriba de la interface.

Ahora bien, si la interface tiene un punto de estancamiento (ver figura 3.15), la corriente de agua salobre en la zona de transición cambia de dirección a partir de ese punto y puede alcanzar el pozo, aun cuando éste se encuentre sobre el nivel del mar, ya que el agua salobre tiene menor densidad y, por consiguiente, puede alcanzar mayor altura. Tal y como muestra la figura 3.16, el agua salina puede subir por encima del nivel del mar si el peso de la columna de agua⁹ h_1 es menor que el peso de la columna h_2 , consistente en agua del mar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

⁹ Parcialmente formada de agua dulce y de agua salada.

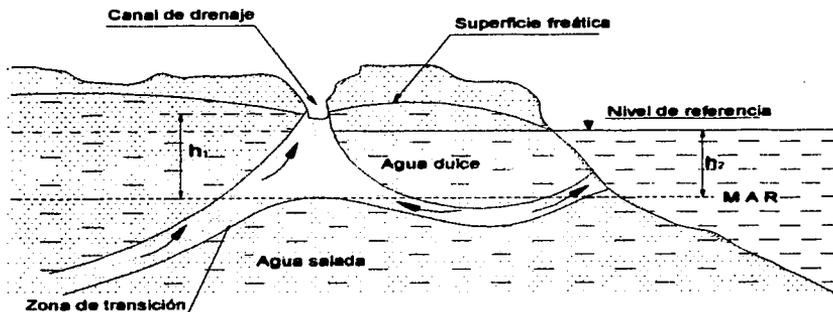


Figura 3.16
Ascensión de agua salina subterránea sobre el nivel del mar.

La condición para salvaguardar los pozos de la formación de conos de agua salina es que no existan puntos de estacionamiento en la zona de transición.

Afortunadamente, el suelo tiene una cierta anisotropía y la permeabilidad vertical es menor que la horizontal, lo que disminuye el peligro de la formación de conos. Asimismo, la existencia de capas localizadas de material arcilloso impermeable bajo el pozo, tienen, como es lógico, un efecto favorable.

Esta claro, por consiguiente que existe un límite práctico de la reducción del flujo que se vierte al mar, así como de la máxima distancia que puede permitir que avance la interface tierra adentro.

También debe tenerse en cuenta la presencia de pozos en funcionamiento, canales y galerías de drenaje cuando trata de determinarse la posición final de la interface.

A causa del peligro de la formación de estos conos de agua salina debe de procurarse que la interface quede siempre alejada del fondo del pozo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3.4.- Efectos de las extracciones, sobre el espesor de la zona de mezcla

Se ha comentado que las extracciones de un acuífero costero aumentan el espesor de la zona de transición.

Y las causas son:

- La mayor penetración del agua salada crea un contacto más largo con un menor caudal de agua dulce de lavado;
- El desplazamiento de la interface desde la posición inicial a la final produce una fuerte dispersión;
- Las variaciones en el régimen de bombeo producen variaciones en la posición de la interface que aceleran el proceso de dispersión.
- Las captaciones situadas sobre la cuña de agua salada producen ascensos salinos que ayudan a la dispersión.

Los estudios realizados¹⁰ 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 en cambio ha incrementado notablemente la zona de mezcla, que se expande y contrae de acuerdo con los aumentos y disminuciones del caudal extraído. Se ha determinado que mientras el agua marina no ha ascendido sensiblemente, el agua de 2000 ppm en Cl ha ascendido al ritmo de 1 m en 3 años y la de 1000 y 100 ppm al ritmo de 27 m/año, a favor de una menor densidad. Este ascenso ha producido un abandono de los pozos costeros más profundos.

Frecuentemente los acuíferos tienen heterogeneidades y el avance de la interface no es regular, siendo más rápido por los niveles más permeables y más explotados pudiendo dejar niveles intercalados y áreas que conservan agua dulce. Este caso ha sido analizado en la porción fuertemente contaminada por agua salada del delta del río Besós (Barcelona), donde aún es posible encontrar en sondeos de reconocimiento niveles de agua dulce, los 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 de la distribución de heterogeneidades locales.

¹⁰ En Honolulu, en las islas Hawai (Todd y Meyer, 1971).

En acuíferos fracturados el problema es aún más agudo. Así, en el estudio de un acuífero en calizas¹¹; la presencia de diaclasas normales a la costa condujo a que mientras unos pozos se salinizaban al poco de iniciarse el bombeo, otros, que no interceptaban esas fisuras, no tenían síntomas salinos hasta después de un bombeo prolongado. En los acuíferos basálticos de las Islas Canarias suceden fenómenos similares; así en el área litoral de bombeos intensivos de Telde (Gran Canaria), unos pozos muestran salinizaciones importantes mientras otros no, algunos tienen entradas de agua dulce y agua salada a diferentes niveles entremezclados (los de agua salada se cementan a mano, pues el diámetro del pozo es de 3 m); todo depende de las heterogeneidades locales, del grado de conexión con el mar y del ritmo de explotación del área, siendo muy difícil predecir los comportamientos locales. En estas circunstancias la fórmula de Ghyben - Hezberg tiene un valor puntual nulo.

En áreas con un débil espesor de agua dulce, se deben construir pozos poco penetrantes, de escaso caudal, bien repartidos, y a ser posible con drenes o galerías horizontales normales al flujo en su base. En algunos lugares como Hawai y en las Islas Canarias se emplean a veces pozos-galería o galerías inicialmente inclinadas; en la Isla de Hierro (Canarias) como la topografía no permite alejarse de la costa sin alcanzar cotas topográficas elevadas, se realizan galerías por encima del nivel del mar hacia tierra adentro, y en su extremo final se construye un pozo.

Se suele recomendar no descender por debajo del nivel del mar, pero ello no impide necesariamente que las aguas mezcladas, menos densas, asciendan hasta el pozo. Por otro lado en muchos casos se consiguen resultados aceptables con pozos que descienden por debajo del nivel del mar; es una cuestión de recursos, caudales y permeabilidad.

3.4.- TÉCNICAS DE ESTUDIO DE LAS RELACIONES AGUA DULCE - AGUA SALADA EN LAS REGIONES COSTERAS.

Las técnicas empleadas para el estudio y conocimiento práctico de las relaciones agua dulce - agua salada en las regiones costeras en nada difieren de las técnicas usuales en hidrología. Se requiere una mayor precisión en los métodos de muestreo y los piezómetros deben prepararse expresamente para el fin a que

¹¹ Situado en el Barranco de Cedeñoques (cerca de Hospitalet del Infant, Tarragona).

se destinan. Aunque puedan perforarse sondeos y piezómetros en el mar, es una técnica difícil y muy costosa y sólo en muy rara ocasión se ha practicado; además es muy difícil obtener periódicamente datos de un punto de observación en el mar.

Una campaña de estudio de un acuífero costero precisa del establecimiento de perfiles y mapas hidrogeológicos, de ensayos de bombeo y mapas de permeabilidad, de un cuidadosos análisis de la salinidad del agua y de su estratificación y del establecimiento de balances hídricos para determinar el vertido de agua dulce al mar, siendo recomendable realizar esto último mediante más de un método independiente, como por ejemplo el hidrometeorológico, el hidrodinámico y el balance de ion cloruro.

3.4.1.- Determinación directa de la posición de la interface agua dulce – agua salada.

La manera más directa de manifestar la situación de la zona de interface o de la zona de mezcla del agua dulce y del agua salada en un determinado acuífero es mediante análisis químicos de muestras de agua tomadas a diferentes profundidades. Para ello es preciso disponer de una serie de piezómetros o pozos con zonas ranuradas cortas y situadas a diferentes profundidades. Si la zona ranurada es larga en comparación con el espesor del acuífero, es preciso comprobar que no existen corrientes verticales que alteren la estratificación de salinidad si el pozo está en reposo, y si la muestra se toma por bombeo representa una mezcla de agua de diferentes niveles.

Las muestras se puede efectuar con un tomamuestras o bien por bombeo de corta duración en pozos de rejilla corta. Si es factible, este último procedimiento es el más recomendable ya que es la mejor garantía de que la muestra representa a la porción de acuífero ensayada. Si el piezómetro no está bien construido y el potencial del acuífero es inferior al de otros acuíferos superiores puede tenerse en los alrededores de la rejilla un agua infiltrada a lo largo de las paredes del tubo que no represente al punto muestreado.

Los pozos costeros que funcionan habitualmente, pueden presentar salinidades elevadas, las cuales representes un fenómeno local de formación de un cono de agua salada, el cual sólo indica la existencia de agua salina en la base del acuífero, pero a profundidad desconocida.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los sondeos para determinar la variación de cloruros en profundidad pueden, en una misma localidad, instalarse uno por uno, o colocarse varios tubos en una misma perforación colocando grava y arcilla o cemento en los lugares convenientes o simplemente llenando todo el pozo de gravilla o arena; no obstante, la construcción requiere algunos cuidados, incluso en el caso de instalar uno por sondeo, a fin de evitar que en zonas de notables gradientes verticales, la zona seleccionada reciba agua de otros niveles de mayor potencial. Ello es esencialmente cierto en zonas con fuertes bombeos.

Los problemas de taponamiento de los sondeos son difíciles de evitar si hay materiales finos en el acuífero, y en ocasiones conviene utilizar rejillas con un aglomerado de arena alrededor, o colocar un macizo de gravas.

Puede evitarse la toma de muestras efectuando un registro vertical de salinidad con una célula conductivimétrica sumergible calibrada. Sólo tienen significado los valores medidos en la zona filtrante. El resto del pozo o sondeo puede contener un agua de otras características procedentes de bombeos anteriores, agua inyectada en ensayos, etc., la cual permanece allí sin casi alteración durante mucho tiempo. Al parecer los datos del tramo final del piezómetro están a veces algo falseados por existencia de lodos o sedimentarse allí las aguas más salinas¹².

Se puede determinar con precisión la conductividad del agua dulce o salobre, pero es más difícil hacerlo con aguas saladas incluso si se utilizan células alimentadas con corriente alterna de elevada frecuencia. Conviene reponer periódicamente los electrodos de la célula así como efectuar calibraciones con soluciones de conductividad conocida, teniendo en cuenta las necesarias correcciones por temperatura. En el mercado existen células que compensan el efecto de temperatura o bien células que incluyen un termistor para determinarla simultáneamente; sin embargo parte de su precisión la pierden al tener que ser capaces de ser sumergidos a grandes profundidades. Sin embargo actualmente existen termómetros para efectuar registros térmicos en pozos con gran sensibilidad y precisión (0,01 °C). Existen sistemas de medida de conductividad en continuo que son capaces de determinar la profundidad de la interface, ajustando su posición a un valor de la salinidad predeterminado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Si en la construcción de un pozo se efectúa una testificación eléctrica, pueden determinarse aproximadamente los límites de las zonas de agua salada si se conoce la litología. Así por ejemplo, cuando

¹² Como ha sido observado en el delta del río Llobregat (Barcelona) y citan en el Norte de Francia Dreyfus y Valleur (1970).

la resistividad decrece gradualmente sin un cambio litológico que lo justifique, es posible que el agua en el acuífero sea cada vez más salina. El límite de la zona de mezcla en el lado del agua salada es mucho más difícil de determinar puesto que la resistividad se acerca a cero cuando la concentración de cloruros en el agua excede unos pocos g/l. En general es útil la testificación de resistividad y potencial espontáneo, que en la mayoría de aparatos modernos puede ir acompañada del registro de radiación gamma natural. Es preciso tener en cuenta que los dos primeros registros que son los que determinan la salinidad, precisan que el sondeo esté sin revertir, lo cual no siempre es posible o sencillo, dependiendo de la técnica de perforación.

Si el piezómetro es de plástico y está ranurado en toda su longitud, puede efectuarse periódicamente una testificación de resistividad eléctrica aparente del terreno; el tubo sólo añade una resistencia adicional que es constante de una experiencia a otra. En este caso la alteración de la estratificación en el tubo por corrientes verticales es de importancia secundaria. En otros casos la testificación es útil para comprobar la profundidad de colocación de la zona filtrante. Dreyfus y Vailloux (1970) recomiendan usar rejillas con porosidad superior al 30%.

Los métodos geofísicos eléctrico-resistivos de determinación desde la superficie de las posibles zonas de intrusión marina deben realizarse con precaución aunque los resultados pueden ser interesantes. Existen muchos ejemplos que muestran la utilidad del método pero en general se han aplicado a acuíferos poco profundos y con el nivel freático alto.

En algunas ocasiones se puede seguir el movimiento de la interface dejando instalados permanentemente los electrodos y determinando la curva de resistividad periódicamente. Otras veces puede procederse a efectuar una perforación y colocar a diferentes profundidades electrodos; posteriormente se rellena el pozo, colocando material permeable donde están los electrodos. Efectuando medidas periódicas es posible determinar la variación de la salinidad a las diferentes profundidades indicadas.

En zonas poco permeables es difícil obtener muestras del agua contenida. Estas pueden obtenerse de testigos de la formación, pero es preciso tomar precauciones para asegurar que no hay contaminación por otras aguas Luszczynski (1962) sugiere añadir fluoresceína al lodo de perforación para poder averiguar si la

muestra se contamina o no con él. El agua puede ser extraída de estos testigos por medio de un filtro prensa (Luszczynski 1961), pero el método no es siempre eficaz.

Si la muestra es pequeña o muy poco porosa puede procederse a extraer el agua por centrifugación; también puede aplicarse el método de dilución que consiste en lavar la muestra con un volumen conocido de agua destilada hasta conseguir una concentración constante, aunque el método precisa conocer con precisión la porosidad y grado de saturación de la muestra. En general los resultados obtenidos son satisfactorios, siendo el método de dilución el más sencillo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4.2.- Medición de niveles.

en los piezómetros y pozos de observación la medida de niveles es de gran importancia para establecer variaciones de potencial y determinar el flujo de agua en el sistema. Estos deben medirse con precisión, del orden del cm o menos, ya que las cotas sobre el nivel del mar son en general pequeñas o muy pequeñas. Todos los puntos de observación deben estar cuidadosamente nivelados. Unas veces la cota cero del país corresponde al nivel medio del mar en una cierta localidad, no teniendo porque coincidir con la misma en otros lugares costeros. Así, en España la cota cero de referencia es el nivel medio del mar en Alicante, pero en Barcelona y Tarragona el nivel medio del mar es casi 50 cm más alto. En otros lugares se toma como cota cero la del nivel mínimo de marea viva equinoccial y en este caso y según los mares y localidades, la diferencia con el nivel medio puede superar 1 m. La determinación del nivel medio del mar es estrictamente necesaria si se piensa aplicar la fórmula de Ghyben - Herzberg, pero no lo es si se dispone de uno o varios piezómetros que lleguen al agua salada. En caso de tenerse que hacer, debe recurrirse a los datos de algún mareógrafo¹³ próximo; si no existe, es preciso montar una escala limnométrica o limnógrafo en algún puerto próximo asegurándose de que no existen circunstancias que falseen las medidas. No debe caerse en la tentación de tomar como nivel medio del mar el que se puede medir en un cierto momento en una playa local, pues los errores pueden ser muy grandes.

La influencia de la densidad del agua en el tubo del pozo o piezómetro de observación en el nivel medio es muy notable. Así en un pozo ranurado a cota -30 m con agua dulce ($\gamma_d = 1,000$) se observa una cota del nivel de agua de +0,90 m con el tubo lleno de agua salobre de $\gamma = 1,005$ se observará un valor +0,746 m y

¹³ Instrumento para determinar la altura de las mareas y calcular el nivel medio del mar.

con el tubo lleno de agua marina de $\gamma_s = 1,025$ se observará un valor + 0, 146 m. Por ello conviene conocer la densidad y a veces la temperatura del agua en la que se mide el nivel. Si el tubo esta lleno de aguas de diversas densidades o conviene medir el potencial en un cierto punto de la rejilla puede procederse a introducir un tubito en el sondeo hasta la profundidad deseada y aspirar agua hasta haberlo llenado del agua puntual; entonces se puede tomar una muestra y medir el nivel. Si la profundidad del nivel del agua supera 7 u 8 m no puede realizarse la aspiración. Puede procederse a colocar el tubito y verter en él agua dulce hasta haber desplazado la que existía previamente; al cabo de unos momentos puede suponerse que el efecto de la alteración en el punto seleccionado es mínima y se obtiene el nivel de agua dulce.

3.4.3.- Frecuencia de mediciones.

En estudios realizados a acuíferos costeros conviene tomar muestras, efectuar registros de salinidad y medir niveles con frecuencia, aunque es difícil fijar a priori esa frecuencia, deberá ser, en principio, más elevada en acuíferos sometidos a una explotación intensa y fuertes variaciones piezométricas. Al fijar un programa de toma de muestras o de registros, es preciso tener en cuenta que entre operación y operación es preciso dejar transcurrir el tiempo necesario para que se reconstituya la estratificación salina, o se renueve el agua alterada, dependiendo de la forma de realizar el trabajo.

Como principios muy generales y variables, puede decirse que los niveles deben medirse en piezómetros de 1 a 4 veces al mes y en lugares con variaciones importantes y rápidas conviene instalar algunos limnigrafos; en los pozos de explotación la medida debe ser diaria o a lo más semanal. En los piezómetros la toma de muestras y registros debe realizarse de 1 a 6 veces al año y en los pozos debe analizarse el agua extraída, aunque sólo para determinar cloruros, por lo menos semanalmente, con uno o dos análisis completos anuales.

3.4.4.- Empleo de los modelos para estudiar las relaciones agua dulce - agua salada en acuíferos costeros.

Los modelos analógicos o matemáticos, de gran utilidad en estudios de Hidráulica e Hidrología subterránea, lo son menos en el estudio de las relaciones agua dulce - agua salada en los acuíferos costeros. La razón

estriba en la dificultad de simular el comportamiento de dos líquidos diferentes y miscibles y en especial la simulación de la interface.

El planteamiento matemático conduce a ecuaciones no lineales de complicada expresión que son muy difíciles de manejar para establecer modelos matemáticos, salvo casos muy sencillos, como un canal a lo largo de la costa recargando agua; las ecuaciones pueden plantearse en el campo complejo y resolverse con ordenador. Recientemente se han desarrollado formas de resolver casos sencillos teniendo en cuenta la dispersión, utilizando el método de las características, que consiste en resolver la ecuación de la continuidad y superponer la dispersión. Lee y Cheng (1974) han abordado la resolución directa de las ecuaciones del flujo de un fluido incompresible no homogéneo en régimen estacionario.

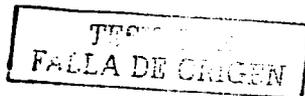
Cuando se conoce la recarga media de los acuíferos, la explotación del agua subterránea no necesariamente debe restringirse al aprovechamiento de ese volumen renovable, sino que de acuerdo a las condiciones y necesidades de una región dada se puede establecer políticas de extracción, que en ocasiones causan efectos perjudiciales en los acuíferos, los cuales pueden conocerse previamente mediante los modelos, siendo posible así seleccionar las alternativas de explotación futura que resulten más adecuadas.

Información requerida para formar un modelo

El estudio del comportamiento de cualquier sistema requiere de un modelo que permita relacionar las causas con los efectos, mediante parámetros representativos del sistema. En el estudio de un acuífero, las causas son su recarga y descarga; los efectos, las evoluciones de la superficie piezométrica, y los parámetros que ligan unos y otros son las características físicas e hidráulicas del acuífero.

Las causas y efectos no pueden relacionarse si no se tiene un conocimiento completo del acuífero que se va a modelar. Entre la información con que debe contarse para formar un modelo está la siguiente:

1. características físicas del acuífero (extensión y espesor, comportamiento de las fronteras)
2. características hidráulicas (distribución de la transmisibilidad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S) del acuífero, permeabilidad (K)).



3. historia de las extracciones (volúmenes y distribución del bombeo (B), en el área y en el tiempo para el mayor intervalo de tiempo posible).
4. historia piezométrica (evolución de los niveles piezométricos del acuífero en el mismo intervalo de tiempo).
5. condiciones piezométricas iniciales (h_0).
6. volumen y distribución de la recarga (R).

Por lo general no siempre es posible contar con una cantidad suficiente de información que permita conocer en forma completa a un acuífero, siendo necesario utilizar la existente aunque los resultados que se obtengan sean preliminares y se tomen con la debida reserva; afinándolos posteriormente a medida que se obtenga una formación más detallada.

Gracias a la capacidad y rapidez de las actuales computadoras digitales, resulta más conveniente simular acuíferos por medio de modelos matemáticos, los cuales se basan fundamentalmente en el principio de conservación de la materia y la ley de Darcy. El procedimiento consiste en dividir el acuífero a modelar en elementos de mismo tamaño, cuyo tamaño depende del área total, de la distribución de los datos disponibles y de la magnitud y distribución de la evolución piezométrica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO IV

BOMBEO MIXTO EN LA ZONA COSTERA DE LA ISLA DE COZUMEL, QUINTANA ROO.

4.1.- PROBLEMÁTICA Y SITUACIÓN ACTUAL

En el subsuelo de la Isla, el agua dulce flota sobre un cuerpo de agua salada, la separación entre estos se debe a la diferencia de densidades, siendo mayor la del agua salada; dicha separación no es rígida sino transicional y origina una mezcla entre ambos bloques, de espesor variable y superficie convexa. Provocando la escasez del agua dulce e incrementándose esta problemática por el comportamiento demográfico de la Isla y la dependencia económica ligada a la actividad turística como principal fuente de sustén. La consecuencia inmediata de lo expuesto, es la disminución considerable del espesor aprovechable del acuífero existente (aproximadamente de 12 m en la parte central) aunado a sus características¹⁴. El acuífero de Cozumel sólo permite la extracción de 1.5 lps. en promedio en cada pozo perforado.

Con base a estudios¹⁵ recopilados, analizados y depurados que han abarcado la zona de Cozumel, se hace una breve descripción de la situación actual:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

¹⁴ Debido a la geología estructural de la Isla de Cozumel se ha originado la presencia de un acuífero calcáreo de gran permeabilidad, compuesto en su mayor parte por calizas fosilíferas, calcarenitas, arenas calcáreas y depósitos de Motal.

¹⁵ Estudio Geohidrológico Preliminar de la Isla de Cozumel, Quintana Roo 1982. Lesser y Asociados, Estudio sobre Salinidad del Acuífero y Alternativas de Solución, Cozumel Quintana Roo. 1993. Consorcio de Ingeniería Mexicana, S. A de C.V., Sinopsis Geohidrológica del Estado de Quintana Roo. 1990. Comisión Nacional del Agua.

Actualmente se extraen cerca de 300 litros por segundo (lps), a través de una batería de 150 pozos de 15 m de profundidad, la cual abastece a la zona turística y a la población. Desafortunadamente el agua extraída es insuficiente para la población, como es sabido Cozumel es un lugar turístico, que necesita de todos los servicios para el buen funcionamiento de la zona. Para satisfacer las necesidades futuras, se planea buscar otros mecanismos que permitan operar los pozos emplazados en la zona, sin que provoque la salinización del agua en ellos.

El estudio del comportamiento de la Isla comprendió una superficie de 50,212 km², entre las coordenadas geográficas siguientes: paralelos 17°54' y 21°36' de latitud norte, y meridianos 86°45' y 89°10' de longitud oeste.

Existen cuatro unidades en el subsuelo, la primera roca fracturada permeable y saturada con agua de buena calidad; la segunda roca semicompacta de permeabilidad media a baja; la tercera corresponde a una roca compacta de baja o nula permeabilidad, y la cuarta una roca saturada de agua salada.

En algunas partes de la faja costera, las características y el régimen de operación inadecuados de los pozos, están provocando la salinización local del acuífero; el área más afectada en este sentido es la que ocupan las baterías que abastecen a la zona de Cancún, conforme se aumenta el caudal de extracción la salinidad del agua se incrementa (los pozos que extraen caudales de 3.6 lps tienen alrededor de 1000 ppm; los que extraen 1 lps presentan concentraciones de 500 y 700 ppm; en los pozos restantes con gastos menores de 1 lps, su salinidad es 500 ppm.), siendo variable de una región a otra. Es cierto que el bombeo no ha provocado efectos graves e irreversibles sobre los niveles y la calidad del agua subterránea, a escala regional, sin embargo se presentan efectos locales derivados de características, espaciamiento o régimen de operación inadecuados de los pozos ahí enclavados. No obstante, existen desventajas en el diseño tipo de los pozos, ya que propicia la salinización del acuífero, por flujo ascendente del agua a través del espacio anular, y se reduce la eficiencia hidráulica de los pozos por penetración parcial.

A pesar de las restricciones que impone la presencia de la zona de transición bajo el acuífero dulce, mediante un manejo adecuado, es factible captar cantidades adicionales de agua dulce, para interceptar una fracción mayor del volumen renovable sin deteriorar la calidad del agua.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La recarga del acuífero se lleva a cabo a través de la infiltración del agua de lluvia, mientras que su descarga se realiza por flujo subterráneo hacia el mar, y por la explotación de pozos y de norias. La Isla recibe una recarga media de 40 Mm³/año, con notables variaciones de un año a otro, dependiendo de la magnitud y distribución de la precipitación pluvial; el acuífero descarga, en forma natural, cerca del 22% hacia el mar, a lo largo del litoral.

Debido a la gran capacidad de infiltración del terreno y a la reducida facultad de atenuación de la zona no saturada, el acuífero de Cozumel es muy vulnerable a la contaminación derivada de las actividades humanas.

La descarga de aguas residuales al subsuelo está contaminando bacteriológicamente al acuífero en las áreas ocupadas por los núcleos de población, dando lugar a problemas de salud pública.

Una de las actividades que se efectuaron para la elaboración de este estudio fue un recorrido al campo, donde se visitaron los pozos que se destinan al abastecimiento de la Isla de Cozumel, donde se ubicaron 50 pozos de bombeo que pertenecen a la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA), seleccionados de mutuo acuerdo con el personal técnico de la CNA y la CAPA. La localización de los aprovechamientos se realizó mediante un geoposicionador geográfico manual (Garmin 12 XL).

Conjuntamente, se realizó el levantamiento piezométrico de 50 pozos de bombeo (ver plano 1), previamente seleccionados por la CNA y personal de la CAPA, a fin de determinar la profundidad del nivel estático y su elevación con respecto al nivel medio del mar.

Como parte de los trabajos de campo, se seleccionaron 25 captaciones del sistema de abastecimiento de la Isla de Cozumel, en los cuales se hizo la toma de perfiles de conductividad eléctrica. En cada uno de los pozos seleccionados se tomó y registró el valor de conductividad eléctrica a cada 50 cm de profundidad hasta alcanzar la profundidad total de cada uno de los aprovechamientos. Para realizar esta actividad se empleó un conductivímetro "Conductronic modelo CL8", de tipo digital, con capacidad de lecturas de 1 $\mu\text{ohms/cm}$ hasta 30,000 $\mu\text{ohms/cm}$.

La salinidad del agua en los pozos se incrementa conforme se aumenta el gasto de extracción; así, los pozos que extraen caudales de 3.6 lps tienen alrededor de 1000 ppm; los que extraen 1 lps presentan

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

concentraciones de 500 y 700 ppm; en los pozos restantes con gastos menores de 1 lps, su salinidad es 500 ppm.

La profundidad al nivel estático del acuífero (ver plano 2) varía entre 2 y 5 metros: los mayores se ubican al centro de la isla y disminuyen gradualmente hacia el mar. El nivel estático tiene elevaciones máximas de 50 cm sobre el nivel del mar en la porción central de la isla.

A pesar de las variaciones estacionales de los niveles del agua en el acuífero, de escasos centímetros o decímetros, se provocan movimientos de la interfase entre el agua dulce y la salada, que hacen, a su vez, variar el espesor aprovechable del acuífero, lo que se refleja en algunas de las captaciones de la batería, tales como la captación No. 18 del eje 3 (ver plano 1).

Las elevaciones del agua subterránea de los pozos visitados se obtuvo a través del personal de la CAPA, con la que se dibujó el plano No. 3, en el que se aprecian equipotenciales con valores de 0.4 a 0.7 msnm., en los ejes 1 y 2.

Como el esquema de flujo, en general, es del tipo radial en Cozumel, el agua circula de la porción central de la isla hacia el litoral, con gradientes hidráulicos muy bajos, debido a la permeabilidad del acuífero. A pesar del constante bombeo, a través del tiempo, no se han presentado modificaciones de importancia en la configuración de la superficie freática, ya que la extracción no es tan significativa.

La conductividad eléctrica es una medida rápida y sencilla de la salinidad del agua, y sus valores son directamente proporcionales a la concentración de sólidos totales disueltos (STD). Básicamente, la conductividad eléctrica del agua está en función de su temperatura, del tipo de iones presentes y de su concentración.

Si consideramos que la conductividad se suele referir a una temperatura de 25 °C, sus variaciones, únicamente, estarán condicionadas al tipo y concentración de los constituyentes disueltos, de forma tal que, las aguas que contienen bicarbonato y sulfato de calcio presentan las más bajas conductividades, mientras que las que contienen cloro sódico tienen las más elevadas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el plano No. 4, se aprecian las profundidades a las que se encuentra la interfase salina, observando, además, una profundidad de 16 m al sureste de la zona de captaciones, específicamente en el área que ocupa el eje No. 4, en las inmediaciones de las captaciones Nos. 3, 5 y 7, hasta el pozo No. 15 de la carretera transversal. Por otra parte, en el extremo nororiental, de la zona de captaciones, se tiene una profundidad máxima de 12 m a la interfase salina, bajo el eje No. 2, desde el aprovechamiento No. 21 hasta llegar al No. 30.

En el plano No. 5, se determino el espesor de agua dulce del acuífero. Ahí mismo, se puede observar que el mayor espesor de agua dulce se encuentra al sur de la zona de captaciones, en el que, superficialmente, se localiza el eje No. 4, en las inmediaciones del aprovechamiento No. 6, donde se ha calculado un espesor de 12 m de agua de buena calidad, disminuyendo en forma radial a partir de este punto, hasta los 6 m de espesor en la localidad de Buena Vista, en el cruce de la carretera transversal y el eje No. 5; al oriente del área de la batería se encuentran valores máximos de 8 m, esencialmente sobre el eje No. 2 en su extremo occidental, y valores mínimos de 4 m hacia la parte oriental de la zona de captaciones.

TIPICO DEL
FALLA DE ORIGEN

4.2.- ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

De acuerdo a las necesidades de la Isla se analizaron distintas opciones que permitan una mayor extracción de agua dulce subterránea sin afectar su calidad, y a un mejor costo. Dichas alternativas se describen a continuación.

- 1) **Incorporar un nuevo tapón de concreto en los pozos.** Ya que se supone que el tapón existente se encuentra en mal estado, lo que provoca una extracción con mayor concentración de cloruros en la parte inferior del pozo. Al realizar este sellado del pozo, se supone que permitirá captar directamente agua de la tubería ranurada, mejorando la calidad de producción.

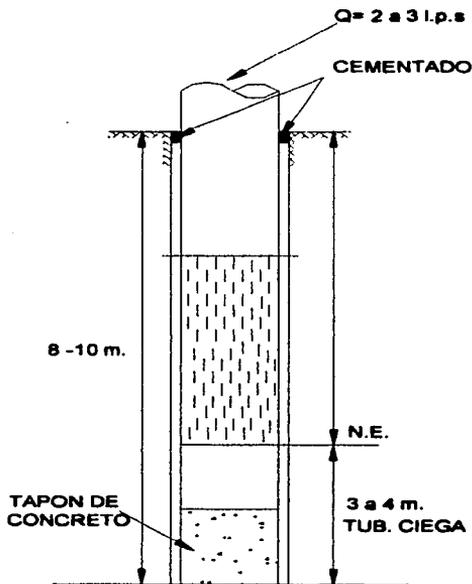


Figura 4.1
Incorporación de un nuevo tapón de concreto en los pozos

FALLA DE ORIGEN

- 2) **Modificación del diseño de los pozos.** Esta alternativa supone que el agua con menos concentración de cloruros se encuentra comprendida en los primeros 10 m abajo del nivel estático y propone el incremento de la tubería ranurada de 2 m que actualmente tiene de 4 a 6 m de longitud: así mismo con el incremento de conductos se podrían aumentar los gastos de 1.5 lps que actualmente se extraen, a caudales hasta de 3 lps.

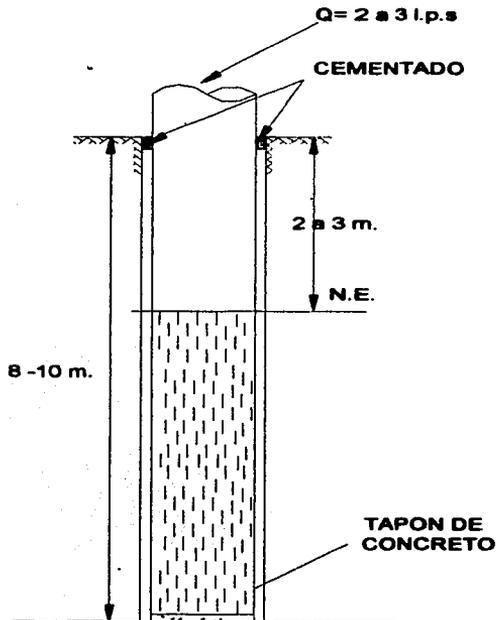


Figura 4.2
Modificación del diseño de los pozos

TECNICAMENTE
FALLA DE ORIGEN

- 3) **Intercalado de pozos.** Debido a que el espaciamiento actual de 500 m, entre pozos, no se fija en base a un análisis de su radio de influencia, se propone reducir el distanciamiento gradualmente aprovechando la capacidad de conducción del subsuelo y el radio de influencia de cada pozo. Por lo que primeramente se intercalarán pozos entre los ejes 2 y 3 con una separación de 250 m, para realizar pruebas, verificar y analizar el comportamiento del acuífero y posteriormente si no se observan efectos negativos disminuir la distancia a 125 m., así podría incrementarse el suministro de agua utilizando las líneas de conducción existentes.

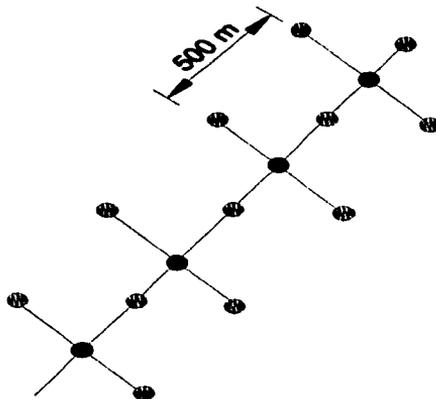
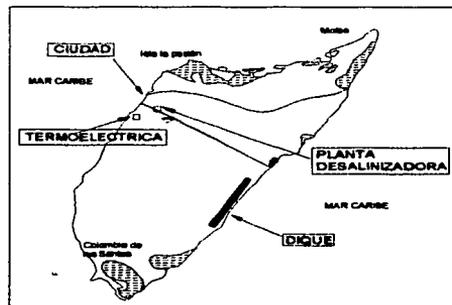


Figura 4.3
Intercalado de pozos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- 4) **Realizar obras de captación (un tanque, un canal, una muelle).** Localizar la porción de la Isla que presente condiciones hidrogeológicas favorables para la captación de agua dulce; probablemente, de magnitud similar a las disponibles en las áreas de captación actual.
- 5) **Construcción de un Dique.** De acuerdo con los estudios realizados del comportamiento del subsuelo en base a sondeos, se puede obtener un resultado diferente que no garantice el incremento en el nivel del agua dulce esperado. Sin embargo, con esta opción se incrementaría el nivel de agua subterránea.
- 6) **Instalación de una Planta Termoeléctrica.** En principio el agua destilada no es apta para el consumo humano pero se ha comprobado en el laboratorio que al combinarse con el agua que actualmente producimos en una proporción de 75-25 obtendríamos un líquido con calidad de pH de 6.8 a 7, dureza de 50-75 ppm y 40 a 50 ppm de cloruros además de que incrementaríamos la cantidad de agua disponible a 260 lps con una inversión muy alta en relación a la cantidad y calidad de agua que obtendríamos.
- 7) **Instalación de una Planta Desalinizadora.** La construcción de una planta desalinizadora implica la necesidad de elaborar los estudios de impacto ambiental correspondientes, e instaurar las medidas de mitigación de acuerdo con la normatividad mexicana. Los residuos de una planta desalinizadora van a depender de la tecnología empleada, de la calidad del influente y del agua producida, del sistema de pre-tratamiento, así como de los métodos de limpieza utilizados en la planta.



TEMA CON FALLA DE ORIGEN

Figura 4.4
Ubicación del Dique y de las plantas termoeléctrica y desalinizadora.

- 8) **Extracción alternada de agua dulce y agua salada por medio del bombeo mixto.** Para la explotación del agua subterránea, se propone un sistema de bombeo mixto (scavenger wells) que permitirá la extracción simultánea de agua dulce-agua salina en el mismo pozo. Para ello, se seleccionarán pozos piloto en donde se instalarán dos bombas sumergibles a diferente profundidad y se bombearán simultáneamente a diferentes gastos.

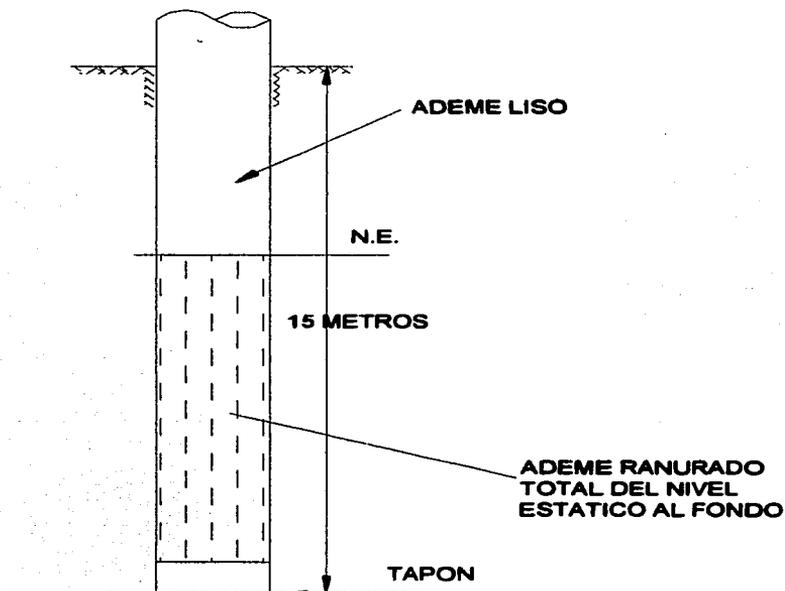


Figura 4.5
Pozo del sistema de bombeo mixto

FALLA DE ORIGEN

ALTERNATIVA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
1) Incorporar un nuevo tapón de concreto en los pozos	Permitirá captar directamente agua de la tubería ranurada, mejorando la calidad de producción y los costos son muy bajos.	Se desconocen las posibilidades de que el resultado será satisfactorio.
2) Modificación del diseño de los pozos	Se podrían aumentar los gastos de 1.5 lps que actualmente se extraen, a caudales hasta de 3 lps.	Se estiman mayores costos por maniobra y cambio de tuberías.
3) Intercalado de pozos	Podría incrementarse el suministro de agua utilizando las líneas de conducción existentes.	El resultado se dará a largo plazo.
4) Realizar obras de captación.	La Isla presenta condiciones hidrogeológicas favorables para la captación de agua dulce.	Se estiman altos costos de infraestructura.
5) Construcción de un Dique	Se incrementaría el nivel de agua subterránea.	De acuerdo a las características del subsuelo, está se comportara de manera diferente con resultados que no garantizan el incremento en el nivel del agua dulce indicado.
6) Instalación de una Planta Termoelectrica	Incrementaríamos la cantidad de agua disponible.	El agua destilada no es apta para el consumo humano y los costos de infraestructura son muy altos.
7) Instalación de una Planta Desalinizadora	Acercaría la cantidad y la calidad del agua subterránea.	Los costos de esta opción son muy elevados
8) Extracción alternada de agua dulce y agua salada por medio del bombeo mixto	Se pretende incrementar la extracción de agua dulce que actualmente es de 1.5 lps hasta 4.0 lps sin provocar el ascenso del agua salina. Los costos de esta alternativa son muy bajos. Además el impacto ambiental es mínimo.	No hay desventaja.

Cuadro 4.1
Alternativas de solución

TESIS
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

En el cuadro 4.1 se manifiestan claramente las ventajas y desventajas que ofrecen cada una de las alternativas de solución para la Isla de Cozumel, como se observa, la opción más viable es la **"Extracción alternada de agua dulce y agua salada por medio del bombeo mixto"**, debido a que ofrece incrementar un porcentaje de la extracción de agua dulce a un menor costo e impacto ambiental, sin producir efectos negativos. Evidentemente comparada con las otras alternativas ésta es la más óptima.

4.3.- CONSIDERACIONES GENERALES DEL BOMBEO MIXTO.

4.3.1.- Antecedentes

La aplicación del concepto de pozo de bombeo mixto fue considerada por primera vez en los 60's en Pakistán, por Sir M. Mac Donald y Hunting Technical Services Ltd. (HTS). El objetivo general del estudio fue demostrar el concepto de pozo de bombeo mixto en el campo así como desarrollar diseños prácticos y criterios de operación para la obtención de agua dulce subterránea por medio de pozos de bombeo mixto en el área del proyecto (cubriendo la provincia Sindh en Pakistán), al mismo tiempo que se mantiene la función de drenaje de agua salada.

Debido a la necesidad de poder extraer una mayor cantidad de agua dulce de los delgados ojos de agua en Pakistán. La implementación del proyecto piloto fue seriamente considerada en 1984 y se estableció en 1987 (financiado por la Administración de Desarrollo de Ultramar del Reino Unido). Los componentes del proyecto incluyeron investigaciones de campo, excavado y probado de cuatro pozos piloto de bombeo mixto, y el modelo de simulación. Los criterios de diseño de los pozos fueron derivados del resultado de los modelos. El éxito de los estudios piloto ha llevado a la implementación a gran escala en Pakistán y se estudian las posibilidades de la aplicación a otros lugares del mundo, como México (Isla de Cozumel Quintana Roo).

TESIS CON
FALLA DE DISEÑO

4.3.2.- Pozo tipo

El concepto del bombeo mixto fue desarrollado a partir de un razonamiento simple: si solamente se extrae agua dulce, ocurrirá un aumento de la interfase dulce - salada. Por otra parte, si solo se extrae agua salada, podría ocurrir una reducción de la interfase. Si se extraen simultáneamente agua dulce y salada, la interfase se estabilizaría en una posición controlada.

Un pozo de bombeo mixto es un pozo tubular convencional equipado con dos bombas (que extraigan el agua del acuífero), ubicadas a diferentes profundidades: una de ellas, la más somera, extraerá agua dulce, mientras que la otra, enclavada a mayor profundidad, bombeará agua del estrato salino como se ilustra en la figura 4.6. La bomba de agua dulce tiene su entrada en la parte superior del pozo, mientras la entrada de la bomba de agua salada esta cerca del fondo del pozo.

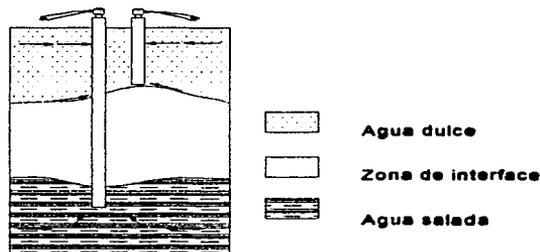


Figura 4.6
Esquema del sistema de bombeo mixto.

La ejecución del sistema mixto obliga a realizar siempre, en forma conjunta, la extracción de agua dulce y salobre, para evitar la contaminación del acuífero, además mantener el nivel inferior controlado, mientras se extrae agua dulce del acuífero, con lo que se pretende conservar la calidad del agua y prevenir la intrusión salina vertical.

La figura 4.7 muestra el comportamiento dinámico del acuífero para los diferentes eventos a los que es sometido: el punto a) corresponde al estado de reposo del acuífero, manifestando un estado homogéneo en

EXTRACCIÓN DE AGUA DULCE - AGUA SALADA EN LA ZONA COSTERA DE LA ISLA DE COZUMEL, QUINTANA ROO.

su comportamiento; el punto b) representa el funcionamiento hidrodinámico, al que están sujetos los pozos con el sistema tradicional de bombeo, de tal manera que se puede observar como es atraída gran parte de la interfase salina y, probablemente, de la misma fase marina, y el punto c) representa la puesta en marcha del sistema de bombeo mixto, con el comportamiento hidrodinámico de los diferentes estratos del acuífero y cómo se mantiene controlada la fase salina, a través de la extracción de agua salobre por el pozo más profundo, excluyendo así la intrusión de agua de mala calidad, hacia las captaciones de agua dulce.

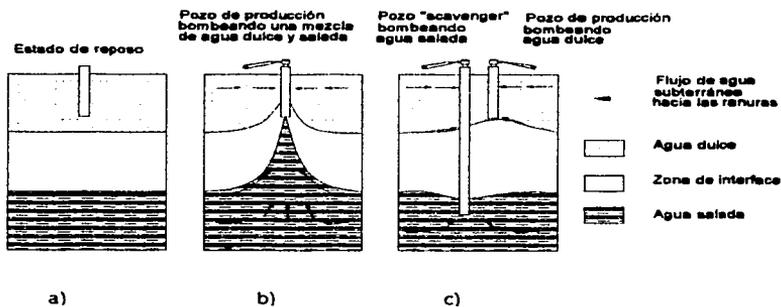


Figura 4.7
Comportamiento dinámico del sistema acuífero.

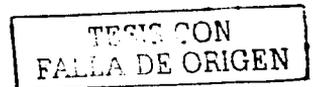
Es intrascendente la selección de sitios propicios, dadas las características de la región y en especial las variaciones de facies litológicas en el subsuelo, justificadas por las amplias respuestas hidráulicas del acuífero.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.4.- METODOLOGÍA DEL BOMBEO MIXTO

Para implementar un sistema de bombeo mixto, se presenta a continuación una metodología que toma en cuenta los principales factores que intervienen y ayuda a simplificar el proceso.

1. *En principio se realiza un trabajo de campo que incluye la elaboración de estudios que permitan conocer las condiciones hidrológicas del lugar.*
2. *De acuerdo a los resultados que arrojan los estudios preliminares evaluar la posibilidad de la aplicación del Sistema de Bombeo Mixto y seleccionar los sitios favorables para la implantación del mismo.*
3. *Construcción de pozos*
4. *Instalaciones especiales*
5. *Funcionamiento hidráulico y mantenimiento*



1.- Estudios preliminares que nos permitan conocer las condiciones hidrológicas del lugar.

Se refiere a la Investigación y monitoreo en campo, que nos permite conocer las características físicas de la zona de estudio, con la reseña del acuífero, la recarga del agua subterránea, la descarga y la explotación del mismo para posteriormente establecer pozos de bombeo mixto diseñados y operados en un rango de condiciones potenciales tan amplio como sea posible, involucrando la compilación y revisión de datos.

2.- De acuerdo a los resultados que arrojan los estudios preliminares, evaluar la posibilidad de la aplicación del Sistema de Bombeo Mixto y seleccionar los sitios favorables para la implantación del mismo.

Este punto establece la viabilidad técnica del desarrollo e identifica la configuración óptima de pozos de bombeo mixto bajo las condiciones encontradas en el área del proyecto.

Asimismo tiene como objetivo principal definir correctamente las zonas en las cuales se establecerán los pozos de Bombeo Mixto para la extracción de agua subterránea precedido de un análisis de información. para posteriormente establecer pozos de bombeo mixto diseñados y operados en un rango de condiciones potenciales tan amplio como sea posible, involucrando la compilación y revisión de datos.

3.- Construcción del pozo

Establece las fases constructivas de un pozo siendo todas importantes para la consecución de los mismos. Estas fases deberán seguirse con rigurosidad aunque las características de los diferentes emplazamientos impidan la estandarización del diseño y construcción de un pozo.

4.- Instalaciones especiales

Suministro e instalación eléctrica y del sistema de bombeo. Este punto establece los requerimientos mínimos generales que deberán cumplirse para seleccionar los equipos mecánicos adecuados.

5.- Funcionamiento hidráulico y mantenimiento

Una vez terminadas las instalaciones especiales, se explica la operación del sistema y el requerimiento de un programa de mantenimiento periódico, con el fin de asegurar el adecuado funcionamiento del pozo.

El mantenimiento de pozos consiste en una revisión periódica de su funcionamiento, así como los procedimientos de rutina requeridos para su preservación, este procedimiento varía de un sitio a otro y, más específicamente, de un pozo a otro. Los puntos a considerar durante el mantenimiento son:

- 1) visibilidad (facilidad de localización);
- 2) acceso (mantenimiento del camino o brecha);
- 3) evitar la corrosión de los equipos de bombeo;
- 4) retiro de la capa protectora (mantenimiento de la tapa del pozo con agentes antioxidantes);
- 5) identificación del pozo;
- 6) integridad del sello superficial, evitando infiltraciones y problemas en la calidad del agua;
- 7) eficiencia del sistema de bombeo mixto, en cada una de sus partes.

Todos estos términos se llevan a cabo, ya sea en forma visual o mediante la comparación con el registro histórico de datos; en los que involucren información de calidad, serán completados una vez que se tengan los resultados del laboratorio.

4.5.- CASO DE ESTUDIO: "APLICACIÓN DEL BOMBEO MIXTO EN LA ZONA COSTERA DE LA ISLA DE COZUMEL, QUINTANA ROO."

1. *En principio se realiza un trabajo de campo que incluye la elaboración de estudios que permitan conocer las condiciones hidrológicas del lugar.*

El funcionamiento del acuífero en Cozumel, considerado del tipo "libre", responde invariablemente a la secuencia de rocas calcáreas, de edad terciaria, las cuales presentan cierto grado de fracturamiento y efectos de disolución; su recarga se produce, fundamentalmente, por la infiltración del agua de lluvia, en los meses de mayo a octubre; otros factores que favorecen a aquélla son: su alta capacidad de infiltración y la reducida pendiente topográfica del terreno, lo que permite el ingreso de aproximadamente el 80% de la precipitación anual, aunque solamente un 20% entra al acuífero, y el resto queda retenida por las rocas que se encuentran sobre la superficie freática, para después, ser transpirada por las plantas.

De amplia distribución territorial, la descarga natural del acuífero de Cozumel ocurre a través de la evapotranspiración, cuya incidencia principal se produce en las inmediaciones de la costa y en las áreas pantanosas que se observan en las franjas norte y oriental de ésta; otro volumen, aunque más reducido, es el que escapa subterráneamente hacia el mar.

De acuerdo al comportamiento de los acuíferos calizos, los niveles estáticos dependen de la recarga vertical, por lo que tienen variaciones instantáneas, condicionadas por la precipitación pluvial. En la zona de interés, las oscilaciones del nivel estático (ver plano 2) ,son del orden de los 10 cm.

Los resultados obtenidos en estudios precedentes, así como las pruebas de bombeo realizadas, han confirmado la heterogeneidad de la porción superior del acuífero, donde se presentan pozos que revelan fuertes abatimientos, mientras que otros muestran un comportamiento más estable.

A través de la batería de pozos que se destinan para los usos municipal y turístico en la isla, que consta de 150 pozos, se lleva a cabo la descarga artificial del acuífero, cuya extracción es del orden de los 4.1 millones de metros cúbicos por año, los que tienen un diseño especial para no provocar la intrusión salina verticalmente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Otro aspecto importante, ocasionado por la alta transmisividad del medio, se ve reflejado al incrementar el gasto en un pozo, llegando a extraer agua salada. Este efecto fue corroborado durante los aforos realizados en el estudio de 1982, donde varios pozos que bombeaban agua salada, al disminuirse el volumen de extracción, se mejoraba la calidad de su agua.

Debido a los fenómenos naturales (precipitaciones importantes) la interfase salina varía en amplitud y, consecuentemente, el espesor de agua dulce se reduce en época de estiaje y se amplía en la temporada de lluvia. Artificialmente, la interfase salina es afectada por el bombeo.

- 2) *De acuerdo a los resultados que arrojan los estudios preeliminares evaluar la posibilidad de la aplicación del Sistema de Bombeo Mixto y seleccionar los sitios favorables para la implantación del mismo.*

De acuerdo a las pruebas realizadas, se pudo concluir que, el acuífero de la Isla de Cozumel cuenta con las características ideales para la implantación del sistema de bombeo mixto. Resulta claro que las mejores zonas se encuentran donde están las transmisividades más altas y los espesores mayores de agua dulce.

Una de las áreas más favorables es la que se ubica en el eje No. 4 (ver plano No. 1), desde su entronque con la carretera principal, hasta el aprovechamiento No.13, donde el acuífero tiene un espesor de 12 m y, consecuentemente, mayor profundidad de las conductividades, con transmisividades bajas, de 1.92×10^{-3} m²/seg, reportadas en trabajos previos. Una segunda área potencial se localiza en el extremo nororiental de la zona de captaciones, en donde hay espesores de 8 m y transmisividades de 2.30×10^{-3} m²/seg, como se ilustra en la figura 4.8, así como el perfil vertical de la figura 4.9 que muestra el espesor de agua dulce aprovechable.

TESIS
FALLA DE ORIGEN

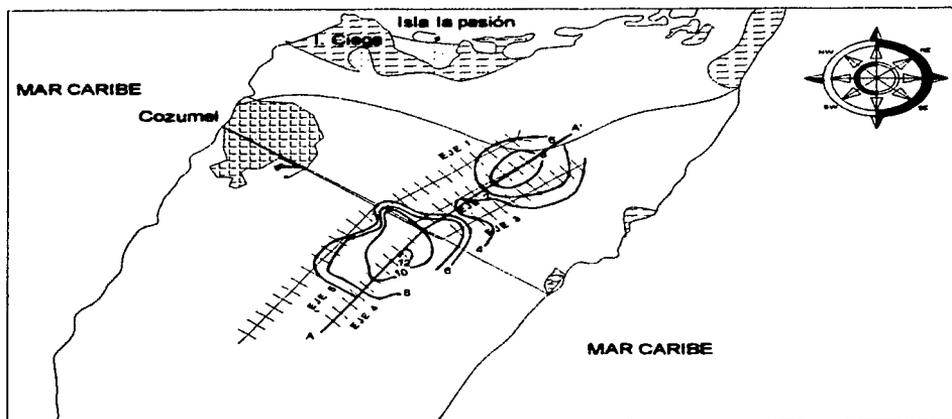


Figura 4.8
Localización de zonas favorables para la implantación del sistema de Bombeo Mixto

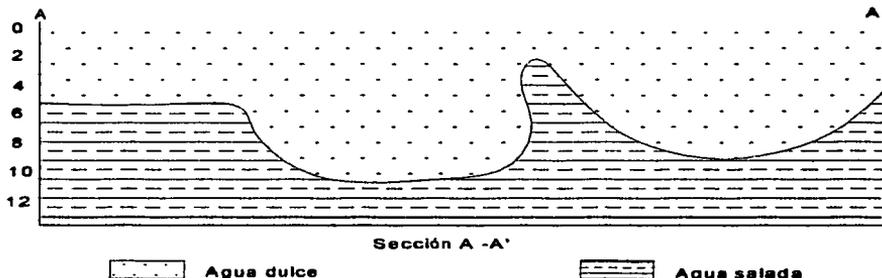


Figura 4.9
Perfil que muestra el espesor de agua dulce aprovechable

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Con la implantación de este proyecto, se generará un sistema dinámico dentro del acuífero, razón por la cual será necesario el monitoreo continuo en las captaciones que utilicen este procedimiento, dadas las condiciones que impone un acuífero heterogéneo con flujo turbulento.

3) Construcción del pozo

Es factible considerar como zonas favorables aquellas donde se encuentran las mejores respuestas del acuífero, utilizando ya sean los pozos existentes de la batería o bien la perforación de nuevos aprovechamientos, intercalados entre los existentes. En la construcción del siguiente pozo se consideró una profundidad al nivel estático de 4m.

- La profundidad máxima será de 20 m, a todo lo largo de la perforación con un diámetro de 12 pulgadas.
- Se instalará el contra-ademe de 12" de diámetro y hasta 6 m, de profundidad a partir del nivel del terreno.
- El filtro de grava (tamaño máx. ¾" con piedra no triturada) será colocado en el espacio anular entre el entubado y las paredes de concreto del contra-ademe, se colocará 6 m, abajo del Nivel del Terreno (dependiendo el nivel estático del lugar en el que se instalará el pozo, aproximadamente 2 m, abajo de éste).
- El ademe será ranurado 2 m, de longitud después del engravillado, con 6 ventanas de 1.5" @ 3" a lo largo del perímetro y 7 ventanas de 4" @ 8" a lo largo del tubo.
- El pozo debe contar con un tapón de concreto de 30 cm.

Las características particulares de cada uno de los sitios elegidos definirán el diseño final del pozo de explotación. Dada la reducida extensión del territorio, la construcción de los pozos para el proyecto de bombeo mixto, se adaptará al sistema de los ya existentes.

La figura 4.10 muestra el diseño del pozo antes mencionado.

TESIS Ocho
FALLA DE ORIGEN

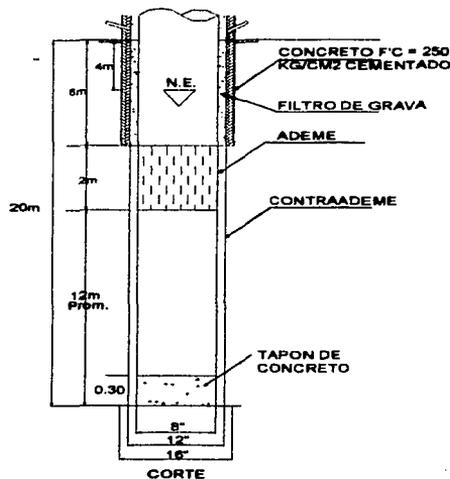


Figura 4.10
Diseño del pozo de Bombeo Mixto

5.- Instalaciones especiales

Instalación eléctrica.- Para la implantación del sistema de bombeo mixto, de la zona en cuestión, se cuenta ya con todos los accesorios y equipos necesarios para llevar la corriente eléctrica desde el suministro hasta el pie de pozo.

De acuerdo con la información obtenida¹⁷, la potencia a consumir de las dos bombas, tomando en cuenta el análisis de cargas, establece que los niveles de voltaje requeridos para dichas cargas presentan una tensión de alimentación adecuada a su demanda, por lo que las instalaciones eléctricas no requerirán más que una adaptación a la segunda bomba.

¹⁷ Estudios preliminares CNA, Lesser y Asociados y Consorcio de Ingeniería.

Disposición de la bomba.- En base a las necesidades de la Isla de Cozumel se seleccionó una bomba sumergible¹⁸ de 2 polos, de potencia de 1 H.P. a una velocidad de rotación de 3550 rpm, por lo cual la aplicación óptima es cuando el agua está libre de arenas, dado que el desgaste se incrementa con la velocidad de rotación. La bomba sumergible viene equipada con su válvula check, la cual evita arrancar el cuerpo de bombeo con la tubería vacía y, por consiguiente, demanda mayor potencia. La figura siguiente muestra el diagrama de tuberías e instrumentación y arreglo típico de una bomba sumergible.

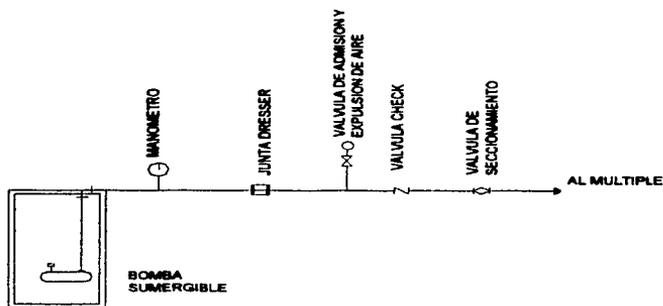


Figura 4.11
Bomba sumergible

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.- Funcionamiento hidráulico y mantenimiento

La puesta en marcha del Sistema de bombeo mixto procede de tal manera que la implantación de dos bombas extraigan el agua del acuífero, ubicadas a diferentes profundidades, en este caso puede ser a una profundidad de 10 metros, considerando que una de las áreas más favorables es la que se ubica en el eje No. 4 (ver plano No. 1), donde el acuífero tiene un espesor de 12 m, por ser esta la más somera, sacará agua dulce, mientras que la otra, enclavada a mayor profundidad, aproximadamente 20 m, bombeará agua del estrato salino, tal y como se observa en la figura 4.12.

¹⁸ Se llama así al conjunto motor - bomba con acoplamiento directo entre ellos, formando una unidad compacta que se encuentra sumergida en el agua del pozo. Esta condición obliga a que el motor tenga un diseño muy esbeto debido a que tiene que ser alojado en el tubo del ademe.

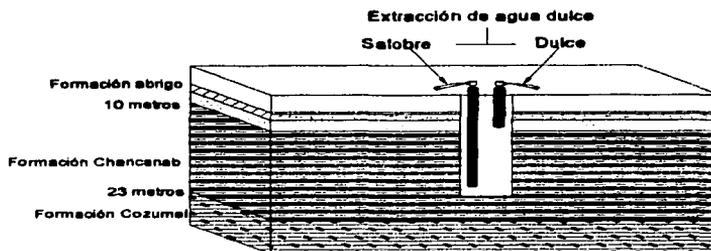


Figura 4.12
Bloque diagramático modelo de bombeo mixto.

TRIE CON
FALLA DE ORIGEN

La operación de este sistema mixto obliga a realizar siempre, en forma conjunta, la extracción de agua dulce y salobre, con el fin de lograr que no se contamine el acuífero, así como mantener el nivel inferior controlado, mientras se explota el espesor de agua dulce del acuífero, con lo que se pretende obtener lo siguiente: conservar la calidad del agua; prevenir la intrusión salina vertical, ya que por cada medio metro de abatimiento del nivel freático, se levantan 20 m de agua salada in situ, lo que provoca un decremento, en la misma medida, del espesor saturado del agua dulce; se incrementará el caudal de extracción de agua dulce, dependiendo de la respuesta del acuífero.

Con el fin de asegurar el adecuado funcionamiento del sistema de bombeo mixto es necesario un programa de mantenimiento periódico, y la conservación de la estructura en óptimas condiciones; además de eso, se deberá contar con un programa de rehabilitación para conseguir una buena eficiencia, a través del tiempo.

Uno de los principales puntos a considerar en este sistema es la posibilidad de colmatación¹⁹ del filtro, generado por la materia en suspensión, las acciones biológicas y la química del agua. De estos procesos, el de mayor importancia para nuestro sistema es la colmatación química²⁰, la cual puede ocurrir de forma lenta y a largo plazo, por la interacción entre el agua de inyección y la zona de recarga, dado el origen cársico del

¹⁹ Proceso que se caracteriza por la pérdida sostenida de la capacidad de conducción de agua por parte de un medio poroso permeable (disminución de la conductividad hidráulica saturada).

²⁰ Se produce por la formación de precipitados, que reducen los espacios disponibles para el paso del agua.

acuífero, y las posibles precipitaciones de CaCo_3 y sales de calcio y magnesio en suspensión, así como hidróxidos de Fe y Mn.

Para este caso, los antecedentes históricos del funcionamiento de los pozos enclavados en la Isla, permitirán seguir los pasos adecuados para establecer los métodos de mantenimiento y de rehabilitación requeridos en cada uno de ellos.

Los pozos deberán contar con una revisión periódica de su funcionamiento, así como los procedimientos de rutina requeridos para su preservación, este procedimiento varía de un sitio a otro y, más específicamente, de un pozo a otro.

El acceso al los pozos de la Isla de Cozumel cuenta con una facilidad de localización, no se considera un problema, trasladarse de uno a otro.

En la mayoría de los casos, la corrosión²¹ es causada o incrementada por una compleja interacción entre varios factores como la velocidad de flujo y la temperatura -principales propiedades del agua-, que afectan el comportamiento de la corrosión. Con respecto a las velocidades de flujo presentes en el sistema hidráulico de la zona de bombeo, éstas están asociadas con problemas de corrosión-erosión en tuberías, en las cuales, el depósito protector de pared o el material mismo de la tubería son removidos mecánicamente. Por otro lado, los efectos de la temperatura son muy complejos y dependen de la química del agua y del tipo de material de construcción que se encuentren en el sistema.

En la Isla de Cozumel, específicamente en la zona de captaciones, la temperatura del agua varía en el rango de 24 a 26° C, lo que limita la acción de la temperatura en el proceso de corrosión.

Al respecto, se ha identificado que en la mayor parte de la Isla, el agua es del tipo cálcico-bicarbonatada, producto de la disolución de los materiales calcáreos que constituyen la misma, mientras que en la porción central de esta, los pozos extraen agua, generalmente, sódico-bicarbonatada y cálcica, aunque en varios de ellos, se ha registrado agua sódico-clorurada. A partir de los 20 m de profundidad, la salinidad del agua crece hacia abajo, y llega a valores similares al del agua de mar, que es de 35,000 ppm.

²¹ Es el deterioro de un material (o de sus propiedades) debido a una reacción con su medio ambiente.

En el sistema de bombeo, cuando las variaciones pasan de 600 a más de 2000 ppm en la concentración de sólidos disueltos totales (STD), indican una concentración iónica alta en el agua, incrementando la conductividad, lo que a su vez aumenta la capacidad del agua para completar el circuito electroquímico y así conducir una corriente eléctrica.

La dureza total del agua obtenida en el sistema de bombeo va de 170 a 500 ppm, causada, esencialmente, por la presencia de iones de calcio y magnesio; éstas pueden considerarse como aguas duras, aunque menos corrosivas, siempre y cuando esté presente la alcalinidad suficiente (iones de carbonato) para formar un recubrimiento de carbonato de calcio protector sobre las paredes de la tubería.

4.6.- APROVECHAMIENTO DEL AGUA DULCE Y SALADA.

Para realizar la evaluación de las posibles alternativas, para la disposición y/o uso potencial de las aguas salinas extraídas por efecto del bombeo mixto, deben tomarse en cuenta los siguientes factores: características hidrogeológicas del acuífero; profundidad de la zona de agua salina; distancia de la zona de captación a la de disposición o reuso, así como los costos y requerimientos de construcción para su posible aprovechamiento o disposición en el subsuelo.

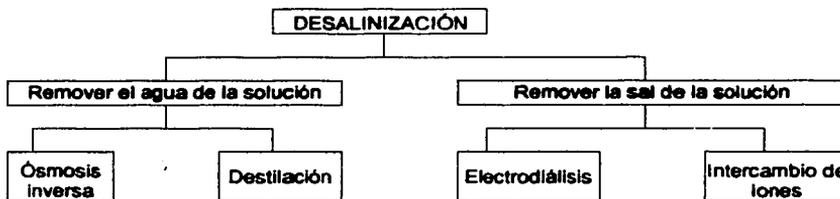
Dentro de las alternativas para la disposición o reuso de los volúmenes de agua salobre continental extraídos mediante el proceso de bombeo mixto, es su tratamiento, con el que se transformará en agua potable.

En la Isla de Cozumel la concentración de aguas salobres es en promedio inferior a las 3000 ppm, no obstante su salinidad puede variar entre 1000 y 4000 ppm, por lo que es preciso asegurar que existen reservas suficientes y que su composición no varíe dentro de este rango en el transcurso de la explotación.

De esta manera, se podrán aplicar cualquiera de los procesos que se muestran a continuación.

El siguiente esquema presenta los métodos más conocidos para el proceso de desalinización.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Cuadro 4.2
Clasificación de los sistemas de desalinización.

El agua salina que se extrae tiene varias alternativas para su uso, después de aplicar cualquier tratamiento de desalinización. Para disponer de un agua potable se consideró a la utilización de plantas desaladoras pequeñas, como una de las alternativas más viables para desechar los volúmenes de agua obtenidos durante el bombeo mixto. Actualmente, el agua desalada se utiliza para satisfacer parte de los servicios en procesos industriales y en forma muy limitada -en invernaderos de alta rentabilidad-, para riego agrícola, pues los costos de desalinizar agua son muy altos, como para emplear este líquido en los métodos tradicionales de riego. El agua desalada puede utilizarse en alguna actividad que no requiera agua potable, como uso municipal riego de parques y jardines, además para fines de acuicultura (cultivo de peces o camarón).

En cuanto al agua salada que se extrae la opción que se está considerando es la de reinyectarla al acuífero ya que la línea de costa queda muy retirada del campo de pozos.

Con el fin de ocupar la infraestructura existente, el depósito del agua salobre extraída por el sistema podrá ser inyectada nuevamente al subsuelo, a una profundidad de 70 a 80 m, como una acción necesaria para proteger el espesor de agua dulce, de la introducción de agua de mala calidad.

No existen especificaciones rígidas sobre la calidad del agua para recarga, puesto que ello depende de las condiciones locales, del método empleado y de las consideraciones económicas que puedan conducir a un tratamiento previo a la infiltración. No obstante, se puede considerar como una distancia de seguridad entre el punto de recarga y el punto de extracción, un promedio de 500 metros, como se presenta en la figura 4.13.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

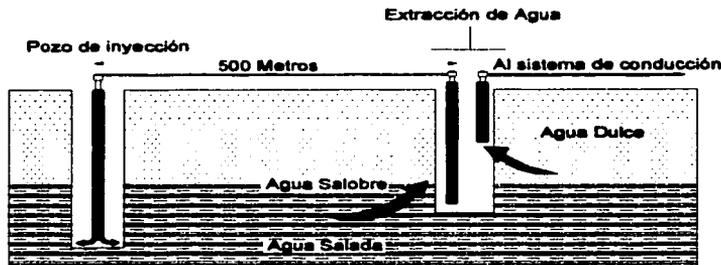


Figura 4.13
Modelo del funcionamiento dinámico del sistema de bombeo mixto.

A su vez, los pozos de inyección tienen la ventaja de ocupar muy poco terreno, por lo que se puede ubicar en áreas urbanas y el agua residual "tratada" puede ser inyectada directamente al subsuelo. Este método de descarga de aguas residuales es particularmente aplicable en islas o lugares donde el terreno es limitado; la recarga cerca de la costa puede tener el doble beneficio de disponer de las aguas residuales y de crear una barrera hidráulica contra la intrusión salina.

Dentro de las consideraciones técnicas, para poder realizar la inyección de las aguas salobres en el subsuelo se encuentran las siguientes:

- El agua salobre será descargada a la profundidad del pozo (entre 70 y 80 m).
- La construcción del pozo de inyección se debe efectuar por etapas: la primera es la perforación hasta atravesar el espesor de agua dulce, de 25 m. A todo lo largo de la perforación, se instalará el contra-ademe, y se cementará por fuera de éste, desde el fondo hasta la parte superior, lo que proveerá una barrera de acero y cemento para proteger el agua potable.
- La segunda etapa es continuar la perforación, de 70 a 80 m, que es precisamente la zona a la cual se pretende inyectar, y nuevamente, cementar la longitud total de la cubierta para sellar el espacio por fuera de la misma. La figura 4.14 muestra el diseño del pozo de inyección ideal para la zona de

Cozumel. Es recomendable un diámetro de 20", terminado con un sello de concreto de 2", y tubo liso de acero de 16", con los últimos 15 metros ranurados.

- Con respecto a la calidad de agua, se puede considerar dentro de las normas establecidas por la Comisión Nacional de Agua, dado que se trata de aguas salobres, con menos de 6,000 ppm y temperaturas que no exceden los 25° C.

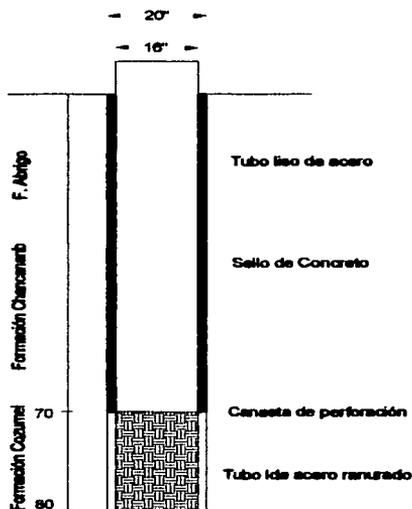


Figura 4.14
Diseño de pozo de inyección.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La descarga de agua subterránea dulce al mar, o a un río, es un fenómeno de gran complicación. Muchos factores no bien conocidos, tales como la anisotropía del suelo, la resistencia al paso del agua de lentejones locales de arcilla y otros, hacen extremadamente difícil un análisis correcto. Por otra parte, la distribución real del agua subterránea dulce y salada en un acuífero es, generalmente, el resultado de una larga historia hidrogeológica e incluso geológica.

- El acuífero de Cozumel (acuífero calcáreo), presenta características especiales, (esta compuesto en su mayor parte por calizas fosilíferas, calcarenitas, arenas calcáreas y depósitos de litoral), ya que se encuentra sometido a un amplio desarrollo cárstico que permite el tránsito del agua salada de mar a través de las oquedades de las rocas en el subsuelo de la isla y la descarga parcial de agua dulce al mar.
- La profundidad al nivel estático del acuífero varía entre 2 y 5 metros, los mayores se ubican al centro de la isla y disminuyen gradualmente hacia el mar. El nivel estático tiene elevaciones máximas de 50 cm sobre el nivel del mar en la porción central de la isla.
- Existe un espesor máximo de agua dulce de 12 m, en la zona correspondiente al eje No. 4, mientras que al noroeste se encuentran profundidades de 8 m. En la zona de captaciones el espesor mínimo registrado es de 4 m, en la parte centro- norte.

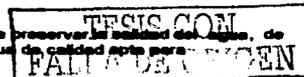
- La recarga vertical (40 Mm³/año) es producto de la infiltración de agua de lluvia, misma que se lleva a cabo por el flujo horizontal del agua subterránea hacia la costa; mientras que la descarga se lleva a cabo a través de pozos de extracción del agua subterránea.
- El bombeo mixto en Cozumel, es una alternativa factible comparada con opciones como la construcción de obras de captación, la modificación del diseño de pozos o la instalación de una planta desalinizadora que estiman altos costos de infraestructura, además de implicar un mayor impacto ecológico. Sin embargo con el bombeo mixto se incrementa la extracción de agua dulce que actualmente es de 1.5 lps en promedio, hasta 4.0 lps sin provocar el ascenso del agua salina, además los costos de éste son muy bajos y el impacto ambiental es mínimo.
- Existen dos zona favorables para la implantación del sistema de bombeo mixto: una, en el extremo oriental de la zona de baterías, y la otra, en el área ocupada por el eje No. 4 (ver plano 1) y su entronque con la carretera transversal, dadas las altas transmisividades y espesores de agua dulce ahí registrados.
- Dentro de las alternativas para la disposición o reuso de los volúmenes de agua salobre continental extraídos mediante el proceso de bombeo mixto, es su tratamiento (osmosis inversa, destilación, electrodiálisis, etc.), con el que se transformará en agua potable.
- La descarga de agua salobre que produce el bombeo simultáneo, puede utilizarse para fines no potables (uso municipal riego de parques y jardines, acuicultura (cultivo de peces o camarón)) o reinyectándola al subsuelo.
- Como cultura general debemos implementar la conservación del agua, existen innumerables estudios para la conservación de la misma, sin embargo el principio del problema radica en crear una educación para el hombre y así mismo preservar nuestros recursos naturales, uno de ellos y quizá el más importante es el agua.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RECOMENDACIONES

- Definir las características del acuífero, desde estratigrafía y parámetros hidrológicos favorables para la implantación del sistema, dado que las condiciones cársticas de la Isla de Cozumel presentan variaciones de un punto a otro en distancias relativamente cortas.
- Dado el riesgo de que el mal manejo de los acuíferos provoque el deterioro de la calidad del agua, por contaminación o por intrusión de agua marina, es imperativo aplicar el cabal cumplimiento de las disposiciones contenidas en los decretos de veda²², como medida precursora de una reglamentación más amplia y de las acciones específicas que seguidamente se recomiendan:
- Condicionar el otorgamiento de permisos de construcción de nuevos aprovechamientos, a que se cumpla rigurosamente el diseño y el régimen de operación que se fijen en cada caso, considerando el espesor de agua dulce existente en el sitio de que se trate.
- Relocalizar gradualmente las captaciones destinadas al consumo humano, que suministran a los núcleos de población y construir las que sean necesarias para cubrir el incremento de su demanda, en áreas emplazadas aguas arriba de los sitios de descarga de aguas residuales.
- Promover la realización de un programa tendiente a construir y rehabilitar fosas sépticas, racionalmente diseñadas y construidas con la finalidad de atenuar la carga contaminante aportada al acuífero.
- Establecer un control más riguroso de las condiciones de descarga de aguas residuales.
- Mejorar el control sistemático de la calidad del agua subterránea en la entidad, prestando especial atención a las áreas donde se encuentran las poblaciones más importantes y donde el acuífero es más vulnerable.

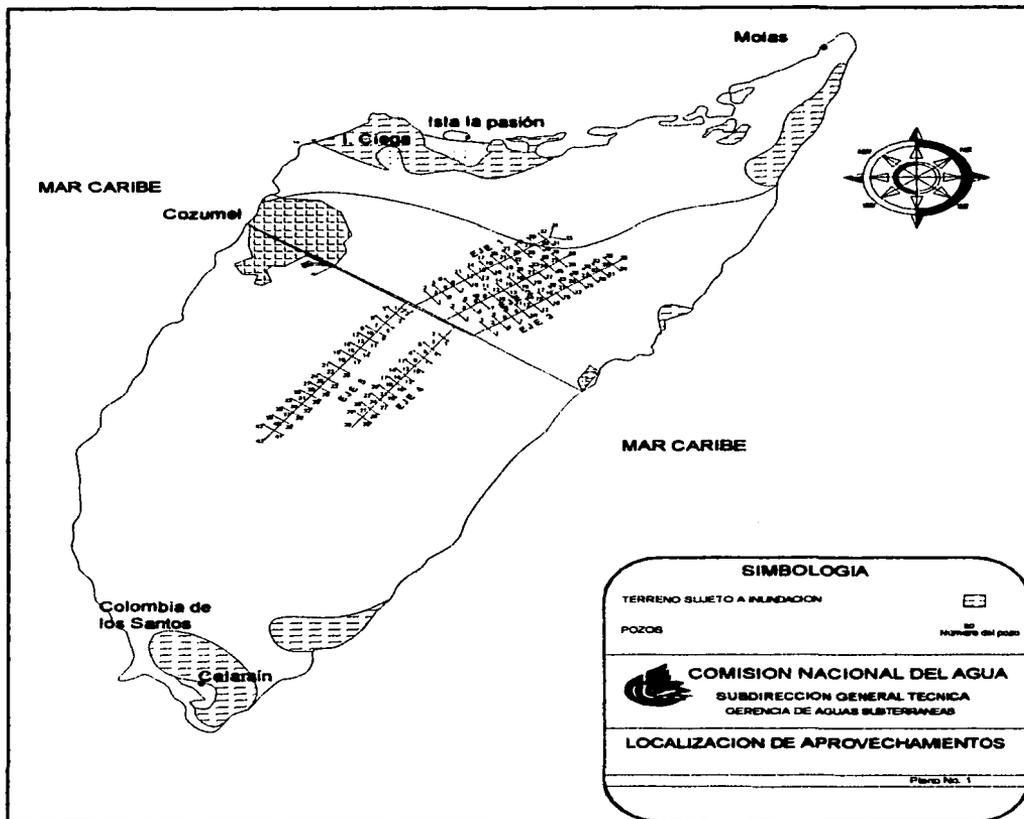
²² Extender la veda de control a toda la entidad e implantar el reglamento respectivo, con objeto de preservar la calidad del agua, de contribuir a resolver los problemas de salud de origen hídrico y de garantizar el suministro de agua de calidad apta para cualquier tipo de desarrollo.



- Continuar con las exploraciones, estudios y programas constructivos encaminados a inyectar las aguas residuales al subsuelo, debajo del acuífero dulce, a fin de reducir paulatinamente la contaminación de la fuente.
- Evitar el emplazamiento de desarrollos pecuarios importantes en el estado, sobre todo, en las inmediaciones de las captaciones que proporcionan agua destinada al servicio público urbano y al uso doméstico.
- Declarar el acuífero de Cozumel como fuente reservada exclusivamente para satisfacer las necesidades de agua potable.
- Automatizar la operación de las baterías de pozos que abastecen los grandes desarrollos, instalando dispositivos de control acoplados a registradores de salinidad o de nivel de agua.

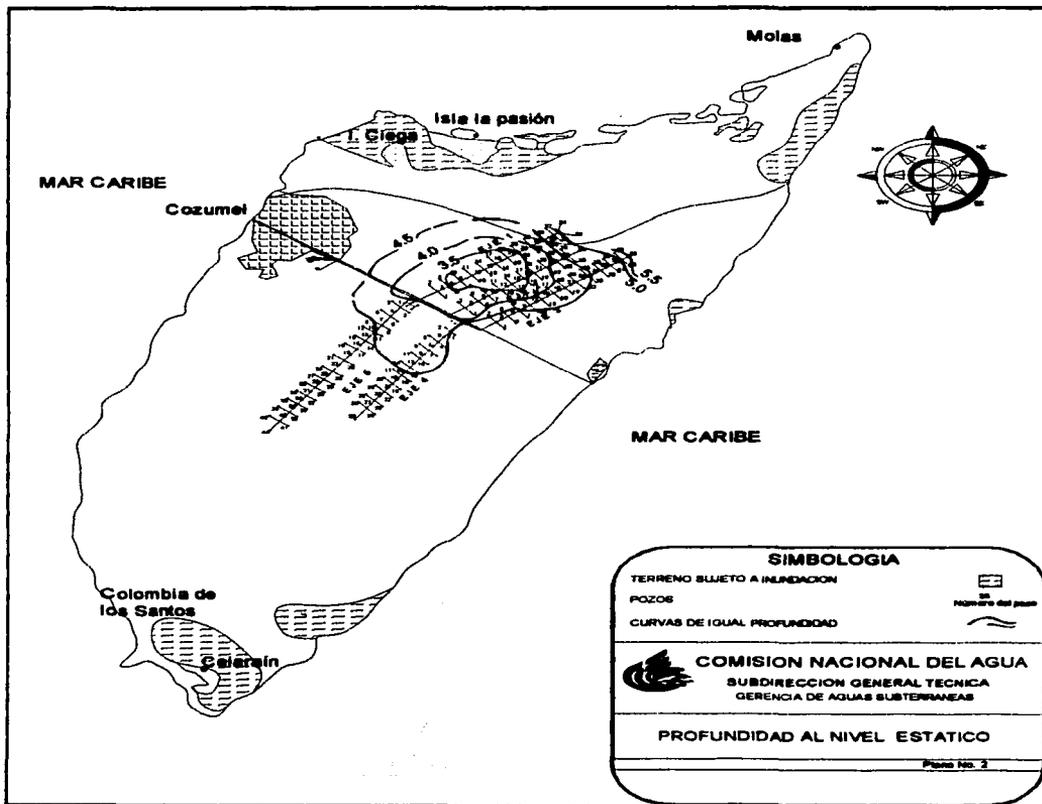
ANEXO

LOCALIZACIÓN DE APROVECHAMIENTOS



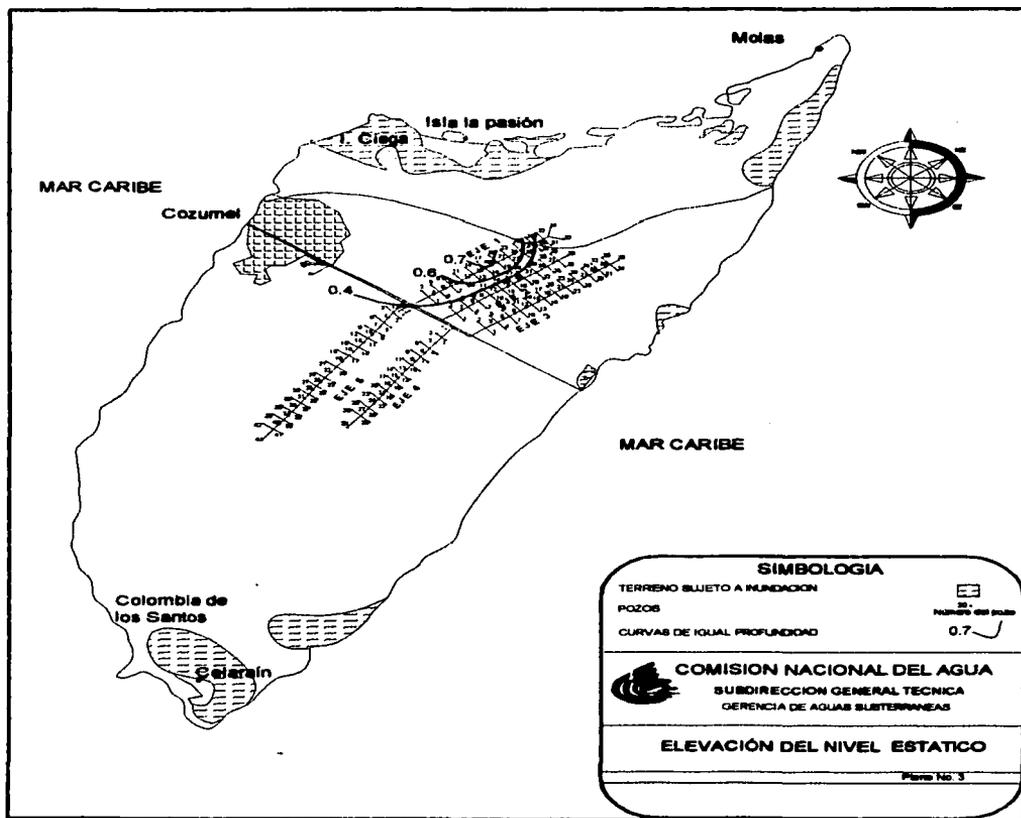
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO



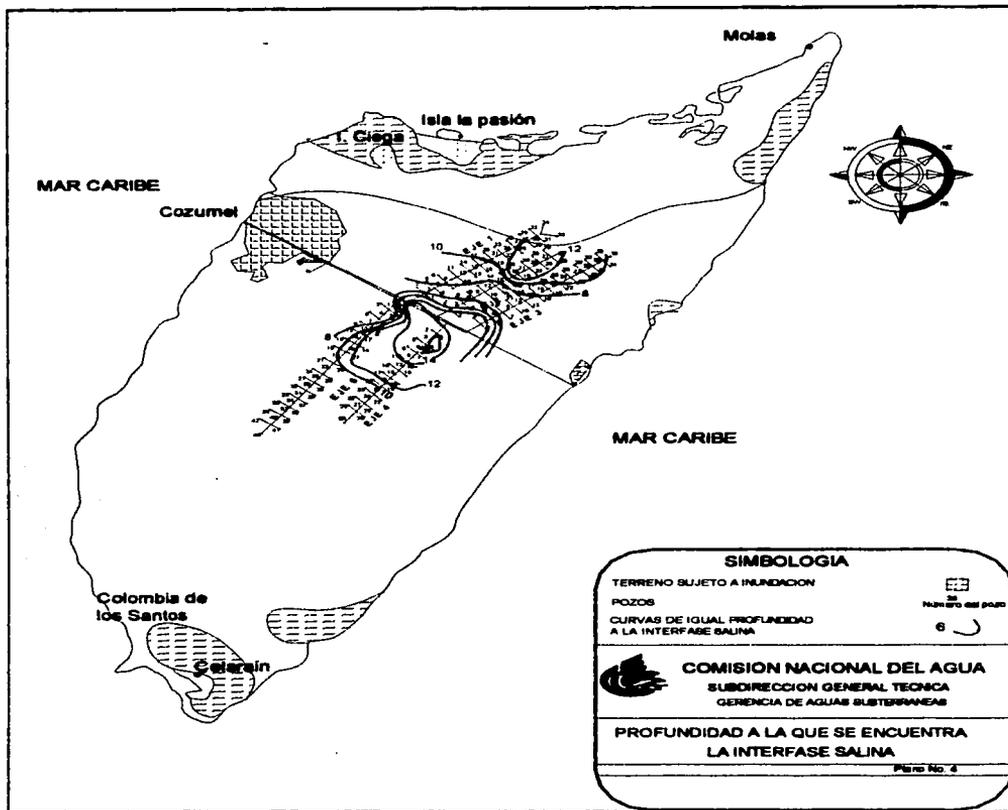
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO



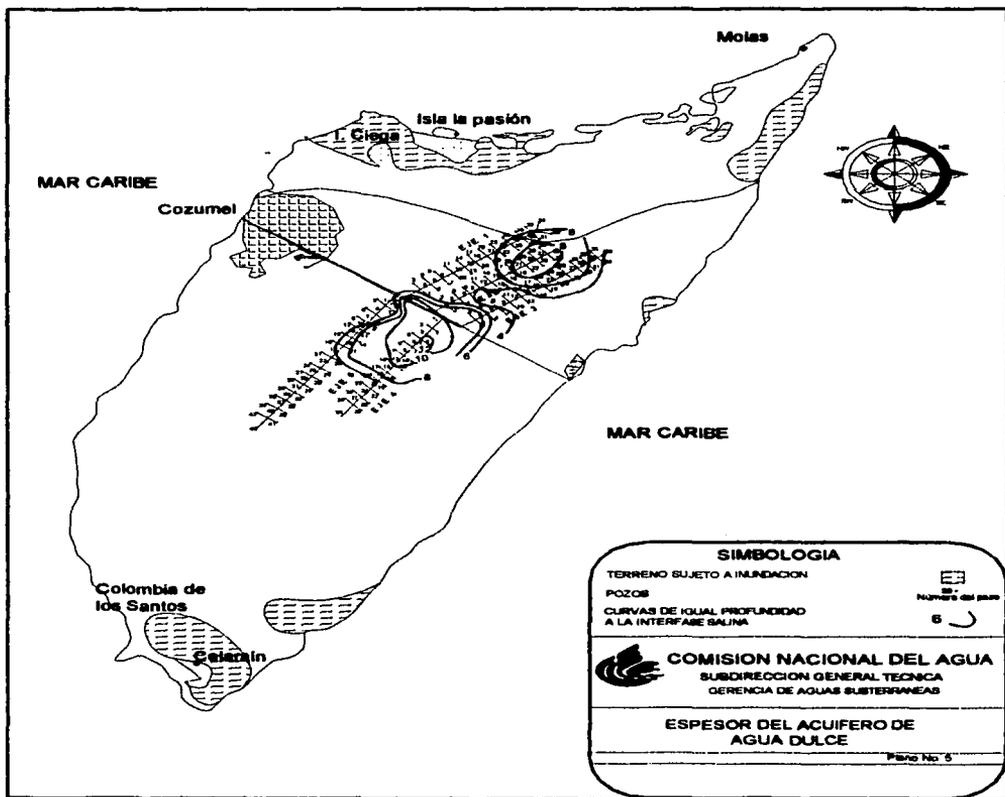
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PROFUNDIDAD A LA QUE SE ENCUENTRA LA INTERFASE SALINA



TRIE CON
FALLA DE ORIGEN

ESPESOR DEL ACUÍFERO DE AGUA DULCE



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

- Benítez Alberto, 1973 " Captación de Aguas Subterráneas ", Dossat, S.A. Madrid.
- Castany G. 1971 " Tratado práctico de las aguas subterráneas ", Omega, S.A.
- Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente 1992 " Estrategias para la protección de aguas subterráneas ".
- Colegio de Ingenieros Civiles de México, 1999 " La ingeniería civil y su compromiso social", CICM.
- Comisión Nacional del Agua, 1994 " Diseño de instalaciones mecánicas y selección de equipo mecánico Tomo I " Subdirección general de infraestructura hidráulica urbana e industrial, Gerencia de Normas Técnicas.
- Comisión Nacional del Agua, 1994 " Diseño de instalaciones mecánicas y selección de equipo mecánico Tomo II " Subdirección general de infraestructura hidráulica urbana e industrial, Gerencia de Normas Técnicas.
- Comisión Nacional del Agua, 2000 " Manual de difusión y divulgación sobre temas selectos de agua subterránea – conceptos básicos de hidrogeología ", Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua, 1994 " Proyectos electromecánicos tipo para plantas de bombeo de agua potable en poblaciones rurales ", Gerencia de Normas Técnicas.
- Custodio Emilio / Ramón Llamas Manuel, 1976 " Hidrología Subterránea ", Ediciones Omega, S.A., Barcelona, Tomo II.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

- Keith Todd David, Ph.D. 1973 " Hidrología (agua subterránea) ", Paraninfo.
- Legget Robert. F., " Geología para Ingenieros ", Ediciones Gili.
- S. Merritt Frederick, "Manual del Ingeniero Civil", Mc. Graw. Hill.
- Subdirección General de Infraestructura hidráulica, urbana e industrial, " Perforación de pozos ", Gerencia de Normas Técnicas.
- Tinajero González Jaime Antonio, 1982 "Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (Geohidrología), Comisión del plan nacional hidráulico, México, D.F.
- Valdez Enrique Cesar, 1990 " Abastecimiento de agua potable ", Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN